

ANALISIS NERACA AIR PASCATAMBANG PADA TAILING STORAGE FACILITY

Analysis of Mine Closure Water Balance on Tailing Storage Facility

M. ANSHARI AKBAR^{1*}, GINTING J. KUSUMA^{2**}, RUDY S. G. BENGGOLO^{2**} dan ABIE BADHURAHMAN^{2**}

¹ Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Cordova, Jl. Pondok Pesantren No. 112 Taliwang 84355, KSB – NTB

² Kelompok Keahlian Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

Korespondensi e-mail : m.anshariaakbar@gmail.com

*Kontributor Utama **Kontributor Anggota

ABSTRAK

Tailing Storage Facility (TSF) adalah media pembuangan tailing yang memiliki dampak lingkungan serta risiko dari penyimpanan tailing tersebut. Neraca air merupakan komponen penting dalam pengelolaan TSF. Dalam penelitian ini dilakukan analisis neraca air untuk mengetahui metode penanganan TSF paling tepat saat pascatambang, sehingga dapat menurunkan risiko pencemaran lingkungan. Analisis terhadap parameter curah hujan dan evaporasi potensial digunakan untuk menghitung debit air yang harus dikelola saat pascatambang. Metode pemilihan data hujan maksimum harian menjadi data yang digunakan untuk menganalisis kebutuhan sarana TSF. Sedangkan untuk pengisian TSF saat pascatambang dilakukan pembuatan skenario kondisi iklim ekstrim untuk parameter curah hujan dan evaporasi potensial yang kemudian dianalisis untuk mengetahui neraca air. Berdasarkan analisis data harian maksimum diperoleh besaran debit air yang harus dikelola pada TSF sebesar 1,511 m³/s. Sedangkan untuk pengisian TSF, skenario pengisian paling cepat membutuhkan waktu 31,8 bulan dan paling lama membutuhkan waktu 110,4 bulan. Untuk menentukan metode penanganan TSF saat pascatambang diperoleh hasil analisis neraca air untuk beberapa skenario kondisi iklim menghasilkan ketebalan minimum kolom air berkisar antara 6 – 8 m. Berdasarkan hasil analisis beberapa skenario kondisi iklim, metode penanganan TSF saat pascatambang adalah penundungan dengan air (water cover).

Kata kunci: neraca air, *tailing storage facility*, curah hujan, evaporasi potensial, skenario kondisi iklim.

ABSTRACT

Tailings Storage Facility (TSF) has environmental impacts and risks arising from the tailings storage. Water balance is an important component in TSF management. In this study, the water balance was analyzed to determine the method of handling TSF during mine closure, to reduce the risk of environmental pollution. Analysis of the rainfall and potential evaporation parameters was used to calculate the water discharge that must be managed in mine closure. The method of selecting daily maximum rainfall data was used to analyze the need for TSF facilities. Meanwhile, for mine closure TSF filling, scenarios for extreme climate conditions were made for the rainfall and potential evaporation parameters which were then analyzed to determine the water balance. Based on the daily data analysis, the maximum amount of water discharge that must be managed at the TSF was 1.511 m³/s. Meanwhile, for TSF charging, it was found that the fastest charging scenario took 31.8 months and for the longest charging it took 110.4 months. To determine the method of handling TSF during mine closure, the results of water balance analysis for several scenarios of climatic conditions resulted in the minimum thickness of the water column ranging from 6 - 8 m. Based on the analysis of several scenarios of climatic conditions, the mine closure method for handling TSF was water cover.

Keywords: water balance, *tailing storage facility*, rainfall, potential evaporation, climate condition scenario.

PENDAHULUAN

Pertambangan merupakan sebagian atau seluruh tahapan kegiatan dalam rangka penelitian, pengelolaan dan pengusahaan mineral atau batubara yang meliputi penyelidikan umum, eksplorasi, studi kelayakan, konstruksi, penambangan, pengolahan dan pemurnian, pengangkutan dan penjualan, serta kegiatan pascatambang (UU No. 4 tahun 2009) (Pemerintah Republik Indonesia, 2009). Menurut Lottermoser (2010) dalam Suppes dan Heuss-Aßbichler (2021) kegiatan pertambangan meliputi tahapan sistematis dengan urutan kegiatan secara umum antara lain eksplorasi, studi kelayakan (*feasibility study*), penambangan, pengolahan, pengangkutan dan pemasaran serta reklamasi dan pascatambang (*mine closure*). Pengolahan dan pemurnian dilakukan untuk mengekstraksi bijih dan menghasilkan konsentrat. Namun di sisi lain pengolahan dan pemurnian menghasilkan produk sampingan yang merupakan material residu, disebut pula sebagai *tailing*.

Tailing ditampung di suatu tempat dengan luas tertentu yang digunakan sebagai fasilitas penyimpanan *tailing* (*Tailing Storage Facility-TSF*). Dalam METSERVE (2012) TSF sangat erat hubungannya dengan dampak lingkungan dan sosial, serta risiko yang timbul dari fasilitas penyimpanan *tailing* tersebut. Dampak yang ditimbulkan secara khusus dapat berupa: sistem pembuangan yang buruk, rembesan yang terkontaminasi serta dampak terhadap air permukaan dan air tanah, dan erosi *tailing* atau ketidakstabilan TSF.

Hal yang paling menjadi perhatian dalam TSF adalah neraca air (*water balance*) (Rotting, Dent dan Reyes, 2018). Menurut Welch (2000) model atau skema neraca air (*water balance*) dikembangkan pada skala spasial dan temporal tergantung pada tujuan pemodelan. Periode keseimbangan untuk setiap kegiatan penambangan berbeda, namun biasanya tahunan, yang dapat merangkum satu siklus hidrologi lengkap.

Salah satu perusahaan pertambangan yang memiliki TSF adalah PT XYZ yang terletak di Kecamatan Katingan Tengah, Kabupaten Katingan, Provinsi Kalimantan Tengah. Lokasi tambang emas dilalui oleh dua sungai, yaitu Sungai Bakam dan Sungai Kalanaman yang

merupakan anak Sungai Katingan. Menurut Hall dan Wilson (2000) dalam Wahyudiono (2017), wilayah ini merupakan area mineralisasi yang menjadi satu bagian dalam jalur mineralisasi Kalimantan *Suture*.

Curah hujan di sekitar lokasi penambangan PT XYZ pada 2009 – 2012, rata-rata sebesar 300 mm, ditetapkan sebagai data curah hujan bulanan di lokasi blok tambang, atau setara dengan 3.600 mm per tahun (Ashari dan Gautama, 2014). Menurut Department of Industry Innovation and Science, Australia (2016), karakteristik lingkungan dengan curah hujan tersebut, fasilitas-fasilitas *tailing* pada PT XYZ memiliki tingkat risiko yang lebih tinggi dibandingkan dengan lingkungan yang memiliki karakteristik iklim kering atau semi kering (curah hujan rata-rata 250 mm) sehingga akan memerlukan tahap rancangan yang lebih ketat, pengendalian kualitas dam (TSF) yang lebih tinggi selama konstruksi, dan perhatian yang lebih mendalam terhadap pengelolaan risiko.

Oleh karena faktor risiko yang cukup tinggi, maka PT XYZ juga sangat rentan terhadap kegagalan dan kecelakaan pada TSF. Berdasarkan International Commission on Large Dams (2001) dalam Solgi (2017), Bennett dan Lacy (2012) terdapat satu laporan mengenai serangkaian kegagalan dan kecelakaan pada TSF yang paling sering terjadi. Penyebab-penyebab utama kegagalan dan kecelakaan yang berhasil diidentifikasi adalah karena:

- a. Kurangnya pengendalian neraca air (*water balance*).
- b. Kurangnya pengendalian atas konstruksi.
- c. Kurangnya pemahaman mengenai hal-hal untuk mengendalikan kegiatan-kegiatan operasional yang aman.

Berdasarkan penyebab utama kegagalan pada TSF, maka perlu dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengendalikan neraca air dengan menganalisis beberapa parameter terkait. Analisis dilakukan untuk mengetahui selisih volume air yang masuk dan volume air yang keluar pada TSF, sehingga skenario penanganannya mampu menurunkan risiko pencemaran lingkungan.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini dilakukan di daerah dengan karakteristik iklim sangat basah atau daerah

dengan iklim tipe A (Marlina, 2016). Berdasarkan klasifikasi iklim oleh Schmidt dan Ferguson (1951) dalam Lakitan (2002), tipe iklim A merupakan tipe iklim sangat basah yang ditandai dengan adanya jumlah bulan basah lebih banyak dibandingkan dengan bulan kering dan pola penyebaran hujan hampir merata pada semua wilayah.

METODE

Data Hujan dan Suhu

Untuk menganalisis neraca air pascatambang pada TSF, diperlukan parameter hidrologi yang paling berpengaruh terhadap keadaan air dalam TSF seperti curah hujan dan evaporasi potensial. Data hujan dan suhu dibutuhkan sebagai data dasar untuk melakukan analisis neraca air. Data hujan dan suhu yang digunakan dalam penelitian ini adalah data dari 2010 hingga 2019. Untuk data hujan diukur menggunakan *Automatic Weather System* (AWS) milik PT XYZ yang berada di area penambangan. Sedangkan untuk data suhu diperoleh dari stasiun pengukuran terdekat dari lokasi penelitian yaitu di Stasiun Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Tjilik Riwut, Palangka Raya (2020).

Data hujan dan suhu tersebut selanjutnya menjadi basis data untuk menghitung beberapa parameter hidrologi yang berpengaruh terhadap kondisi pascatambang yang difokuskan pada penelitian ini seperti: curah hujan, intensitas hujan, debit limpasan, dan evaporasi potensial. Selanjutnya untuk pengelolaan air tambang yang menjadi fokus pada penelitian ini, diperlukan:

1. Analisis untuk memenuhi kebutuhan sarana penyaliran terbuka di area penambangan. Data yang digunakan dalam analisis ini yaitu data hujan harian dengan pendekatan hujan ekstrim/hujan rencana.
2. Analisis terkait kecepatan pengisian TSF pada saat pascatambang. Data yang digunakan dalam analisis ini yaitu data hujan bulanan dan data suhu bulanan.

Kebutuhan Sarana Penyaliran Terbuka pada Area Penambangan

Data yang digunakan pada analisis pengelolaan air untuk kebutuhan sarana penyaliran terbuka

pada area penambangan dipilih menggunakan metode *Partial Duration Series* (PDS) yaitu dengan mengambil data harian maksimum yang berada di atas *Peak Over Threshold* (POT) (Iliopoulou, Malamos dan Koutsoyiannis, 2022).

Curah Hujan Rencana dan Intensitas Hujan

Salah satu yang perlu diperhatikan dalam menganalisis data hujan adalah periode ulang. Menurut Triatmodjo (2008) dalam Upomo dan Kusumawardani (2016) periode ulang yaitu waktu hipotetik yang menunjukkan hujan dengan besaran tertentu akan disamai atau dilampaui sekali dalam jangka waktu tersebut. Dasar dalam menentukan periode ulang yang akan digunakan dalam penelitian ini salah satunya merujuk teori Kite (1997) dalam Danasla dkk. (2021) yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penentuan periode ulang curah hujan untuk saluran

Lokasi	Periode Ulang (tahun)
Sarana tambang	2 – 5
Lereng tambang dan penimbunan	5 – 10
Sumuran utama	10 – 25
Penyaliran keliling tambang	25
Pengaliran aliran sungai	100

Sumber: Kite (1997) dalam Danasla dkk. (2021)

Dari kelima lokasi tersebut sarana tambang merupakan kategori yang paling identik dengan TSF, sehingga periode ulang yang digunakan dalam penelitian ini adalah periode ulang untuk lokasi sarana tambang.

Curah hujan rencana untuk keperluan pada penelitian ini diperoleh dengan melakukan analisis terhadap data hujan maksimum harian yang ditentukan berdasarkan metode PDS. Untuk menganalisis data hujan maksimum sering menggunakan distribusi nilai ekstrim tipe I atau distribusi Gumbel. Selanjutnya untuk menganalisis curah hujan untuk kebutuhan sarana tambang diperlukan analisis hujan jangka pendek atau intensitas hujan. Pada penelitian ini, untuk menghitung intensitas curah hujan jangka pendek dari data hujan 24 jam menggunakan rumus Mononobe (Fahraini dan Rusdiansyah, 2020).

Debit Limpasan

Untuk menghitung debit limpasan, menggunakan data curah hujan rencana dan intensitas hujan yang telah dihitung sebelumnya. Kemudian menggunakan data *catchment area* pada sekitar sarana penyaliran terbuka untuk memperoleh besaran debit air yang perlu dikelola. Pada penelitian ini perhitungan debit limpasan menggunakan persamaan matematik Metode Rasional (Hasan, Hadihardaja dan Kardhana, 2018).

Kecepatan Pengisian TSF pada Saat Pascatambang

Data yang digunakan pada analisis pengelolaan air terkait pengisian TSF pada saat pascatambang berupa data hujan bulanan dan data suhu bulanan untuk mendapatkan nilai evaporasi potensial.

Curah Hujan

Berdasarkan data curah hujan bulanan, bisa diperoleh parameter ekstrim untuk suatu kondisi hujan. Penentuan kondisi ekstrim bertujuan untuk membuat skenario kondisi iklim sebagai dasar analisis untuk menentukan metode penanganan TSF. Data curah hujan bulanan yang mewakili parameter kondisi hujan tersebut terdiri dari data curah hujan minimum, curah hujan rata-rata, curah hujan maksimum, curah hujan *most likely*, dan curah hujan persentil 40 (P40).

Evaporasi Potensial (Evp)

Berdasarkan data suhu bulanan, bisa diperoleh parameter ekstrim untuk suatu kondisi evaporasi potensial (Evp). Untuk menghitung data evaporasi potensial, menggunakan rumus Thornthwaite (1948) dalam Chairunnisa *dkk.* (2021) dan Manggau, Alam dan Iskandarsyah (2020). Sama halnya dengan analisis data curah hujan, penentuan kondisi ekstrim untuk evaporasi potensial bertujuan untuk membuat skenario kondisi iklim sebagai dasar analisis untuk menentukan metode penanganan TSF. Data evaporasi potensial bulanan yang mewakili parameter kondisi ekstrim terdiri dari data evaporasi potensial minimum (Evp Min), evaporasi potensial rata-rata (Evp Rata-rata), dan evaporasi potensial maksimum (Evp Maks).

Volume *Tailing* dan TSF

Untuk menganalisis data pengisian pada TSF, diperlukan beberapa data pendukung untuk mengetahui volume pengisian pada TSF tersebut. Data yang diperlukan antara lain volume *tailing* rata-rata bulanan, volume air dari *process plant* rata-rata tahunan, dan *water recycle* rata-rata tahunan. Untuk mendapatkan data tersebut, perlu menghitung volume total tiap tahun sejak TSF dioperasikan. Selanjutnya perlu diketahui beberapa detail dari TSF untuk menghitung batas maksimum kebutuhan TSF serta batas minimum air dalam TSF untuk kebutuhan analisis metode penanganan TSF pada saat pascatambang. Beberapa data yang diperlukan antara lain data luas area TSF dan *catchment area* di sekitar TSF, volume total TSF, *water level* dalam TSF, dan volume air yang mampu dilewatkan oleh *spillway* pada tiap bulan dan tahunnya.

Skema Neraca Air dalam TSF

Skema neraca air dalam TSF menentukan lamanya TSF akan meluap, karena salah satu isu yang paling menentukan dalam penanganan TSF pada saat pascatambang adalah berapa lama TSF tersebut akan *overflow*. Karena itu, skema neraca air dalam TSF diperlukan untuk menganalisis neraca air terhadap waktu. Ilustrasi skema neraca air dalam TSF ditunjukkan pada Gambar 1.

Skema neraca air dalam TSF tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. *Slurry* akan dikeluarkan dari *process plant* (pabrik pengolahan) melalui jalur pipa menuju ke TSF.
2. *Tailing* (padatan) dalam TSF akan mengendap secara gravitasi dan air yang tersisa dalam TSF menjadi volume air yang harus dikelola sebagai neraca air.
3. Selain air dari *process plant* yang dialirkan dalam bentuk *slurry*, volume air dalam TSF juga bertambah dari air hujan dan air limpasan yang kemudian menjadi parameter dari *water inflow*.
4. Air dalam TSF akan dipompa ke *process water pond* dan selanjutnya akan digunakan kembali untuk kebutuhan air di *process plant*. Hal ini disebut sebagai *water recycle* yang juga menjadi salah satu parameter dari *water outflow*.
5. Selain *water recycle*, evaporasi juga menjadi parameter penting dalam *water*

outflow dan perlu dianalisis karena memiliki nilai yang tidak konstan.

- Volume isian dalam TSF yang berasal dari *slurry*, air hujan, dan air limpasan, nantinya akan dikurangi dengan jumlah *water recycle* ditambah dengan evaporasi. Dari hasil perhitungan volume tersebut, bisa diketahui lamanya pengisian TSF dan kapan terjadinya *overflow*.

Pada skema neraca air dalam TSF, parameter *slurry* dari *process plant* dan *water recycle* dianggap konstan dalam satuan waktu tertentu sehingga menggunakan nilai rata-rata. Sedangkan untuk air hujan, air limpasan, dan evaporasi menjadi parameter yang akan dianalisis untuk mengetahui neraca air dalam TSF terhadap satuan waktu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada fasilitas penyimpanan *tailing* yang berada pada perusahaan pertambangan PT XYZ. Lokasi perusahaan PT XYZ terletak di Desa Mirah Kalanaman, Kecamatan Katingan Tengah, Kabupaten Katingan, Provinsi Kalimantan Tengah (Gambar 2).

Analisis Hujan Untuk Kebutuhan Sarana Penyaliran Terbuka

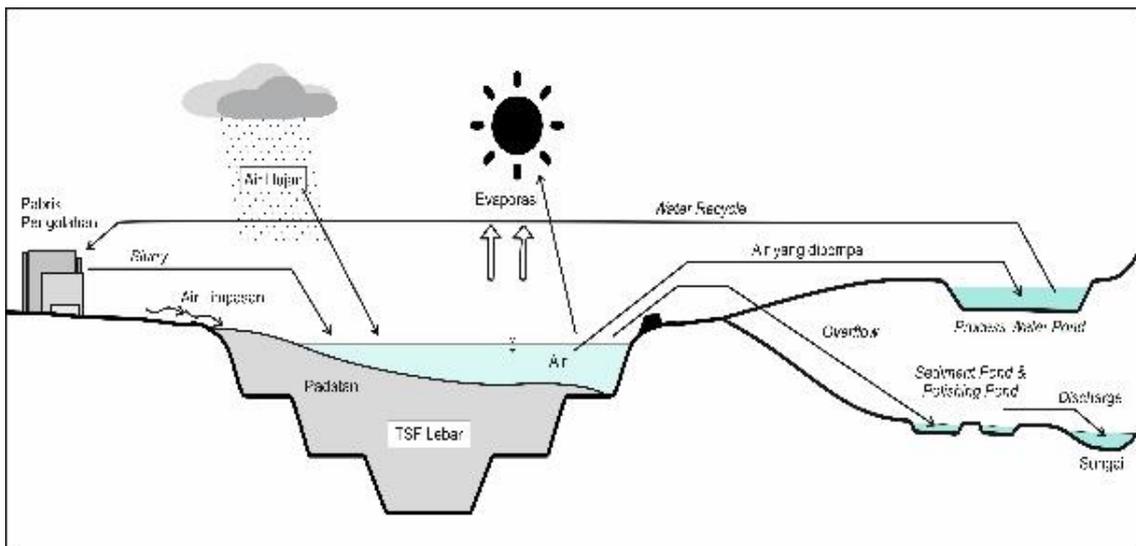
Data yang digunakan pada analisis hidrologi untuk kebutuhan sarana penyaliran terbuka pada area penambangan yaitu data hujan harian pada periode 2010 – 2019. Data diambil sebanyak 30 data yang merupakan data curah hujan maksimum dalam 1 hari. Setelah dihitung dan dianalisis, data tertinggi adalah 170 mm dan terendah adalah 87 mm dengan rata-rata 108,35 mm seperti ditunjukkan pada rangkuman statistik data (Tabel 2).

Tabel 2. Parameter statistik data hujan harian ekstrim

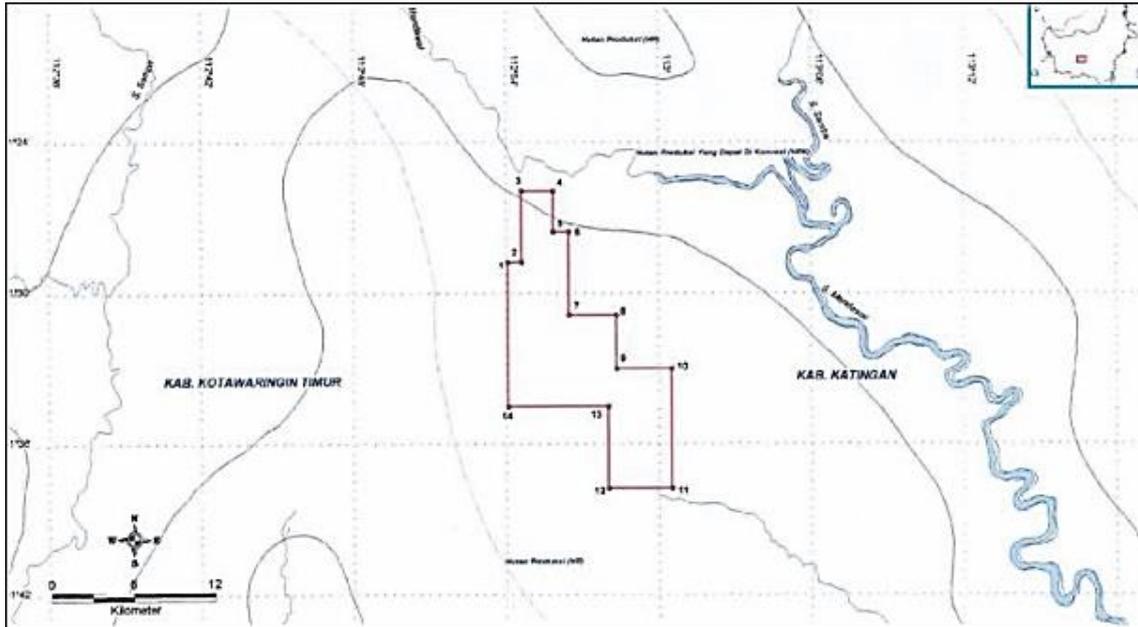
Parameter	Nilai
Jumlah Data	30
Minimal (mm)	87,00
Maksimal (mm)	170,00
Rata-rata (mm)	108,35
Standar Deviasi	20,05
Koefisien Variasi	0,19
Koefisien Skewness	1,90
Koefisien Kurtosis	5,74

1. Curah Hujan Rencana dan Intensitas Hujan

Hasil perhitungan curah hujan rencana dengan periode ulang waktu (T) dan intensitas hujan dengan periode ulang waktu yang sama ditunjukkan pada Tabel 3 dan 4.



Gambar 1. Skema neraca air dalam TSF



Gambar 2. Peta lokasi penelitian

2. Debit Limpasan

Hasil perhitungan debit limpasan dan volume air limpasan berdasarkan curah hujan rencana dan intensitas hujan yang telah dihitung sebelumnya merupakan

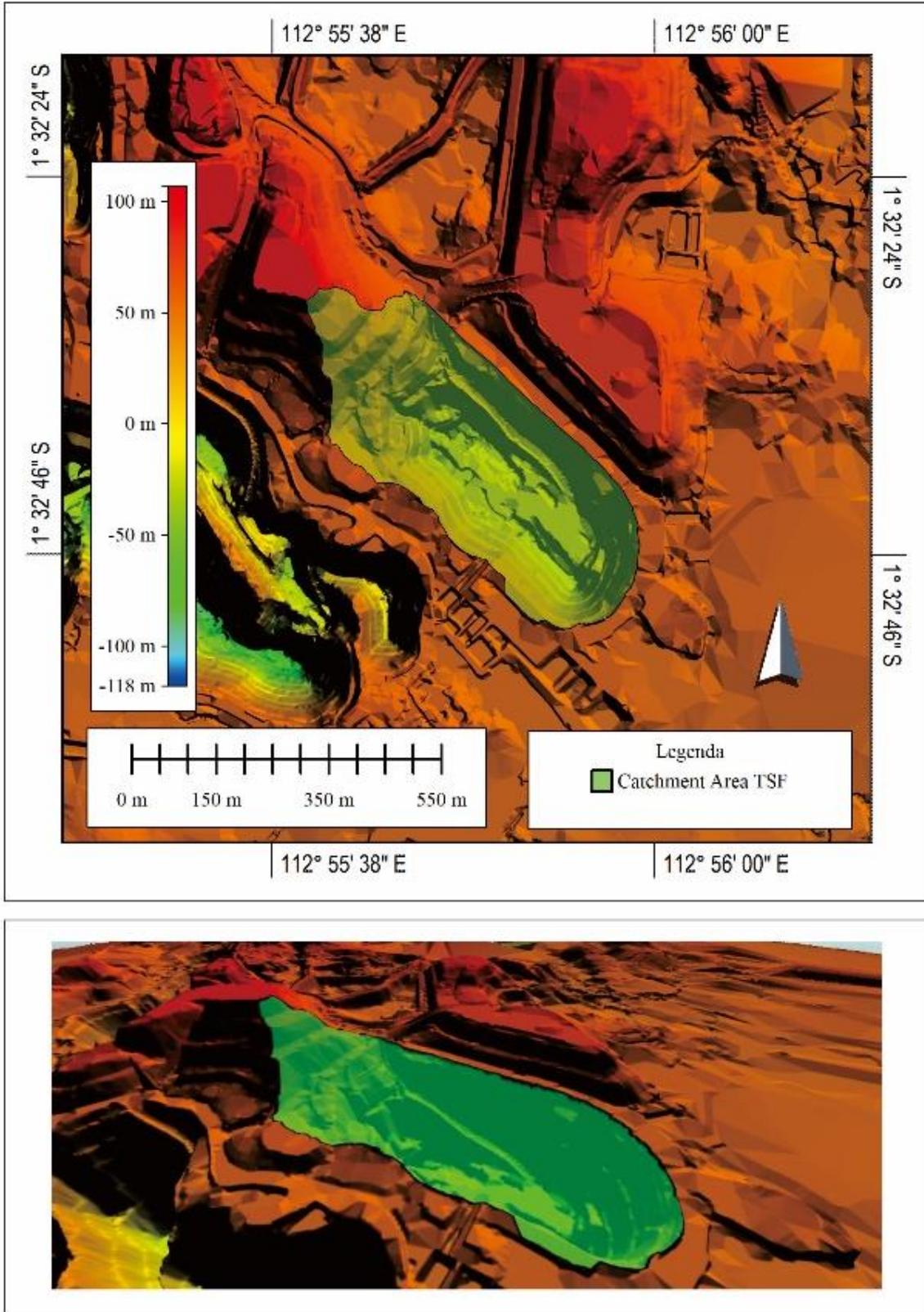
besaran debit limpasan yang harus dikelola. Luas *cathment area* dapat dilihat pada Gambar 3. Adapun data debit limpasan dan data volume air limpasan ditunjukkan pada Tabel 5 dan 6.

Tabel 3. Curah hujan rencana dengan periode ulang (T)

Periode Ulang, T (tahun)	Reduced Variate, Y_T	Curah Hujan dengan Periode Ulang T, X_T (mm)	Intensitas Hujan, I_t (mm/jam)
2	0,37	105,35	27,87
5	1,50	125,38	33,17
10	2,25	138,63	36,68
25	3,20	155,38	41,11
50	3,90	167,81	44,40
100	4,60	180,14	47,66

Tabel 4. Intensitas hujan pada periode ulang (T)

Periode Ulang, T (tahun)	Curah Hujan dengan Periode Ulang T, X_T (mm)	Intensitas Hujan, I_t (mm/jam)					
		1	2	3	4	5	6
2	105,35	36,86	23,22	17,72	14,63	12,61	11,16
5	125,38	43,69	27,52	21,00	17,34	14,94	13,23
10	138,63	48,21	30,37	23,18	19,13	16,49	14,60
25	155,38	53,92	33,97	25,92	21,40	18,44	16,33
50	167,81	58,16	36,64	27,96	23,08	19,89	17,61
100	180,14	62,37	39,29	29,98	24,75	21,33	18,89



Gambar 3. *Catchment area* sekitar TSF

Tabel 5. Debit limpasan

Catchment Area (km ²)	0,182
Intensitas Hujan (mm/jam)	33,184
Koefisien Limpasan	0,9
Konversi	0,278
Debit Limpasan (m ³ /s)	1,511

Tabel 6. Volume air limpasan

Curah Hujan (mm)	125,38
Catchment Area (m ²)	182.000
Koefisien Limpasan	0,9
Volume Air Limpasan (m ³)	20.537

Menurut Kite (1997) dalam Danasla dkk. (2021) periode ulang yang disarankan dalam perencanaan bangunan sarana tambang adalah 5 tahun. Data hasil perhitungan curah hujan rencana dengan periode ulang 5 tahun adalah 125,38 mm dan intensitas hujan pada periode ulang 5 tahun adalah 33,17 mm/jam. Kemudian dengan menggunakan data curah hujan rencana dan intensitas hujan yang telah dihitung, debit

limpasan dihitung dengan menggunakan persamaan Rasional. Perhitungan debit limpasan berguna untuk mengetahui besaran debit air yang perlu dikelola pada sarana penyaliran terbuka. Berdasarkan perhitungan, besar debit limpasan yang perlu dikelola pada saluran penyaliran terbuka adalah 1,511 m³/s. Saluran penyaliran terbuka yang menjadi sarana untuk mengelola debit limpasan tersebut adalah *sediment pond* dan *polishing pond* (Gambar 4).

Analisis Curah Hujan dan Evaporasi Potensial Untuk Pengisian TSF pada Saat Pascatambang

Berdasarkan data curah hujan bulanan, bisa diperoleh parameter ekstrim untuk suatu kondisi hujan. Hal yang sama juga berlaku pada data evaporasi potensial yang mewakili kondisi ekstrim. Tabel 7 dan 8 menunjukkan data curah hujan dan data evaporasi potensial yang digunakan sebagai parameter hidrologi. Selanjutnya dibutuhkan data volume *tailing* dan data TSF seperti ditunjukkan pada Tabel 9 dan 10.

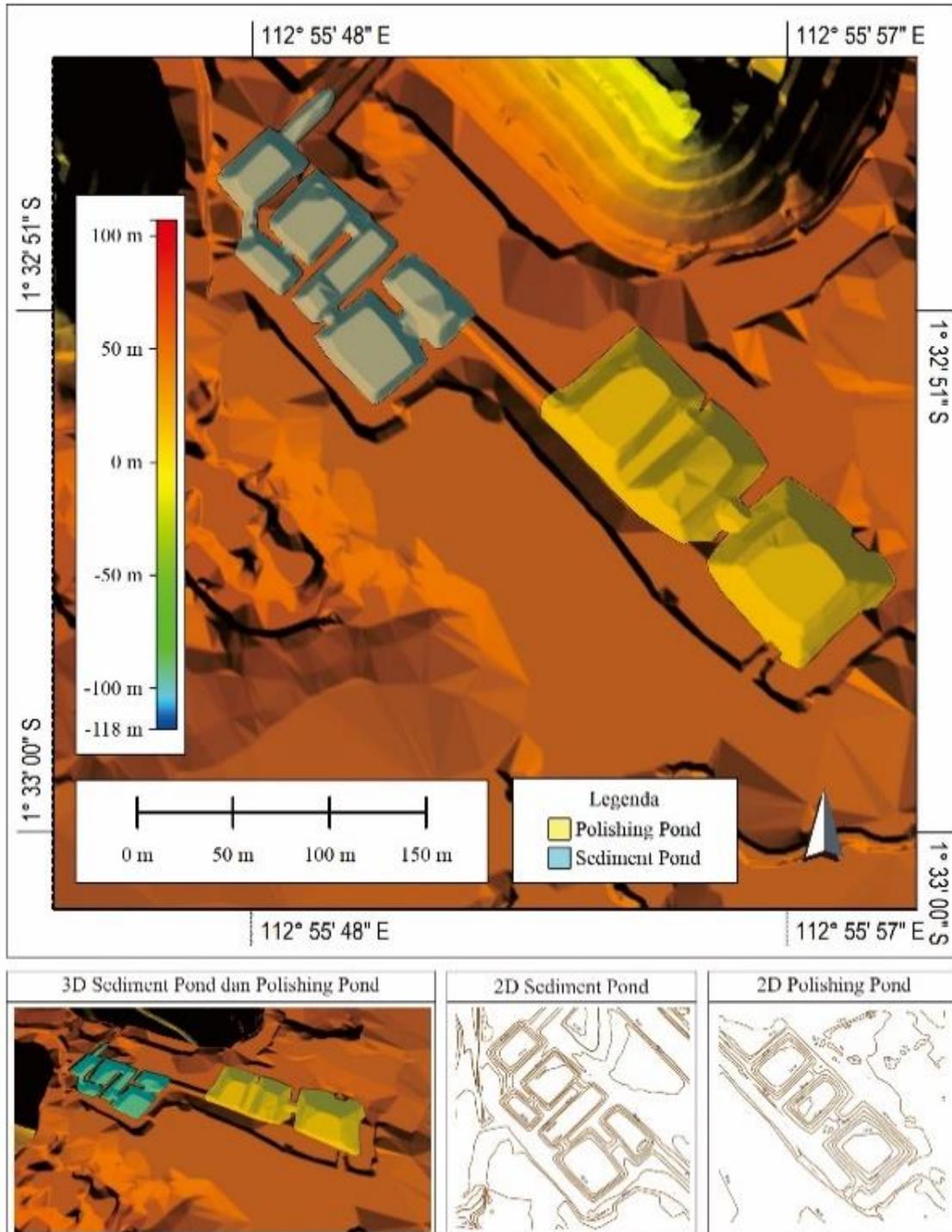
Tabel 7. Distribusi data curah hujan bulanan

Bulan	Curah Hujan (mm)				
	Minimum (Q0)	Rata-rata (Aktual)	Maksimum (Q4)	Most Likely	Persentil 40 (P40)
Januari	156,00	285,49	483,50	318,79	284,21
Februari	109,50	296,25	418,50	261,38	232,15
Maret	201,50	350,01	519,00	357,01	325,31
April	259,00	326,79	463,00	362,90	344,51
Mei	130,50	306,40	534,00	333,31	292,28
Juni	101,50	229,87	425,50	261,49	228,39
Juli	38,50	189,64	443,00	239,92	196,81
Agustus	73,00	165,07	349,00	211,07	186,51
September	13,00	180,30	371,00	196,37	160,86
Oktober	62,05	314,14	451,00	260,14	224,75
November	212,50	321,85	550,50	384,88	349,55
Desember	226,50	305,51	399,00	313,08	294,92
Total	1583,55	3271,31	5407,00	3500,35	3120,25

Tabel 8. Evaporasi potensial bulanan

Bulan	Evp (mm/d)			Hari (d)	Evp (mm/bulan)		
	Min	Rata-rata	Maks		Min	Rata-rata	Maks
Januari	3,39	4,84	11,70	31	105,10	149,93	362,80
Februari	3,09	4,44	11,02	28	86,58	124,21	308,67
Maret	3,48	4,98	12,51	31	107,98	154,28	387,77
April	3,51	4,98	12,29	30	105,19	149,45	368,68
Mei	3,72	5,52	13,56	31	115,20	171,04	420,36
Juni	3,40	5,02	12,17	30	101,95	150,56	365,08
Juli	3,20	4,82	12,27	31	99,34	149,45	380,40
Agustus	3,07	4,93	13,27	31	95,25	152,69	411,37
September	3,06	4,99	13,85	30	91,88	149,67	415,43

Bulan	Evp (mm/d)			Hari (d)	Evp (mm/bulan)		
	Min	Rata-rata	Maks		Min	Rata-rata	Maks
Oktober	3,39	5,46	14,66	31	105,23	169,25	454,56
November	3,33	5,06	12,70	30	100,03	151,69	381,00
Desember	3,50	4,89	11,92	31	108,41	151,68	369,37
Total					1222,14	1823,88	4625,51



Gambar 4. Saluran penyaliran terbuka

Tabel 9. Volume air dan padatan yang masuk dan keluar dari TSF

Tahun	Volume <i>Tailing</i>	Volume Air dari <i>Process Plant</i> m ³	<i>Water Recycle</i>
2015	424.122	906.678	1.252.526
2016	565.259	964.806	488.792
2017	621.216	1.419.901	1.419.147
2018	661.611	1.481.655	-
2019	611.988	1.331.796	-
Total	2.884.196	6.104.836	3.160.465
Rata-rata Tahunan	576.839	1.220.967	1.053.488
Rata-rata Bulanan	48.070	101.747	87.791

Tabel 10. Data TSF

Luas Area TSF (m ²)	125.000
<i>Catchment Area</i> sekitar TSF (m ²)	182.000
Volume Total TSF (m ³)	3.914.340
<i>Water Level</i> Maksimum (mdpl)	+ 47,5
<i>Spillway Level</i> (mdpl)	+ 47,2
Volume air rata-rata yang dilewatkan oleh <i>Spillway</i> (m ³)	
Rata-rata Bulanan	103.696
Rata-rata Tahunan	1.217.655

Untuk menganalisis data pengisian TSF pada saat pascatambang, perlu memerhatikan parameter yang paling berpengaruh pada sarana TSF saat pascatambang yaitu curah hujan dan evaporasi. Kemudian dari parameter hidrologi tersebut dibuatkan skenario kondisi iklim yang bisa mewakili keadaan ekstrim. Parameter kondisi iklim yang dibutuhkan ditunjukkan pada Tabel 11. Sarana TSF dapat dilihat pada Gambar 5.

Tabel 11. Parameter kondisi iklim untuk keadaan ekstrim

No.	Curah Hujan (CH)	No.	Evaporasi Potensial (Evp)
1.	Maksimum	1.	Maksimum
2.	Rata-rata	2.	Rata-rata
3.	Minimum	3.	Minimum
4.	<i>Most Likely</i>		
5.	Persentil 40		

Dari parameter kondisi iklim yang telah ditentukan, dibuatkan skenario kondisi iklim sebagai acuan dalam menganalisis neraca air dalam TSF. Ada beberapa skenario kondisi iklim yang telah dibuat, seperti ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Skenario kondisi iklim

Skenario	Kondisi Iklim	
1	CH Maks	Evp Maks
2	CH Maks	Evp Rata-rata
3	CH Maks	Evp Min
4	CH Rata-rata	Evp Maks
5	CH Rata-rata	Evp Rata-rata
6	CH Rata-rata	Evp Min
7	CH Min	Evp Maks
8	CH Min	Evp Rata-rata
9	CH Min	Evp Min
10	<i>Most Likely</i>	Evp Maks
11	<i>Most Likely</i>	Evp Rata-rata
12	<i>Most Likely</i>	Evp Min
13	P40	Evp Maks
14	P40	Evp Rata-rata
15	P40	Evp Min

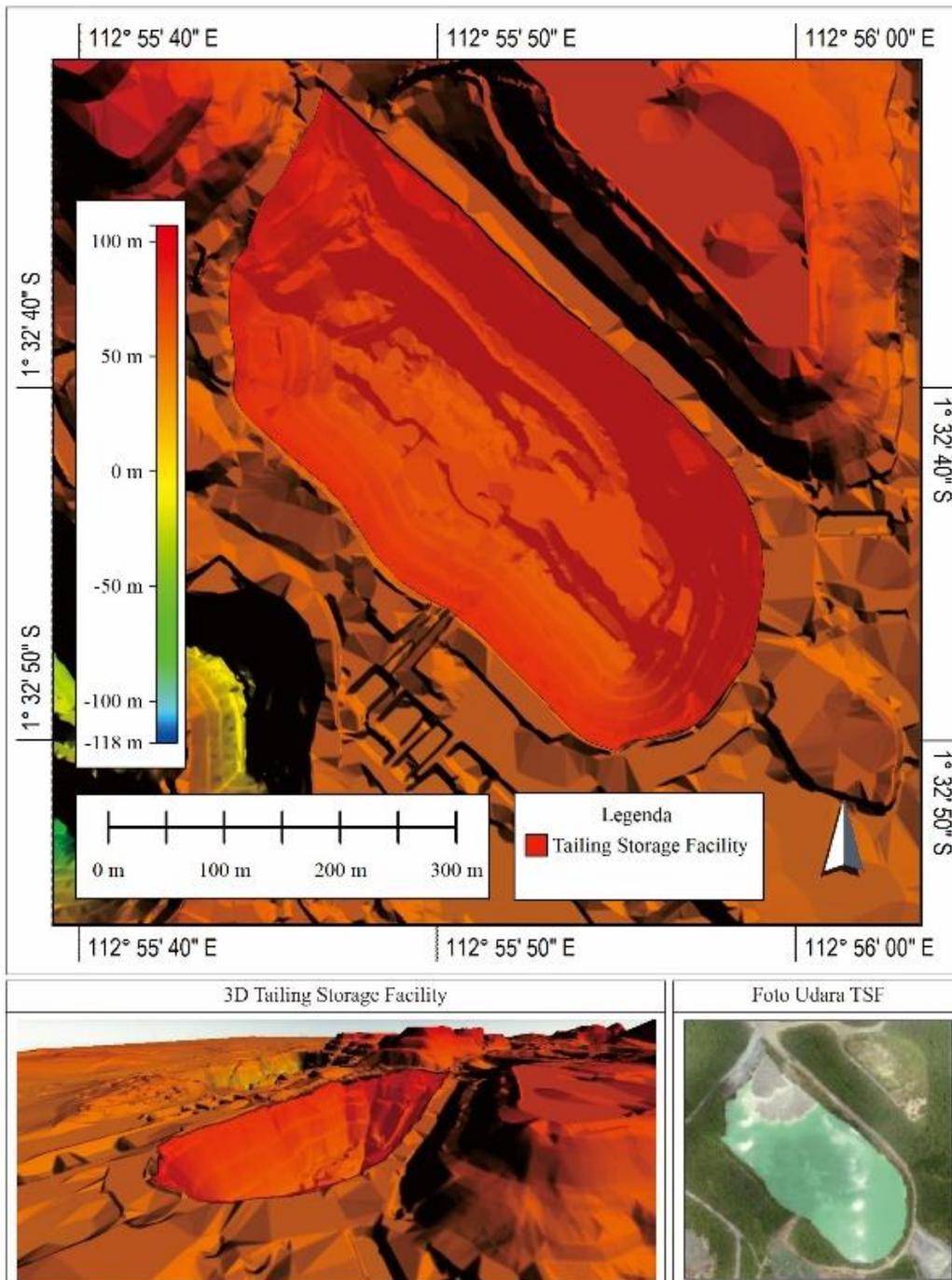
1. Analisis Neraca Air Bulanan Berdasarkan Skenario Kondisi Iklim

Untuk menganalisis neraca air bulanan berdasarkan skenario kondisi iklim perlu dilakukan perhitungan selisih antara curah hujan dan evaporasi potensial untuk mengetahui pada skenario berapa akan terjadi neraca air positif ataupun sebaliknya. Untuk mengetahui neraca air positif atau negatif, perlu dihitung dan dianalisis nilai kumulatif bulanan pada setiap skenario agar pengambilan

kesimpulan mengenai neraca air bulanan bisa dilakukan pada bulan terakhir perhitungan setelah semua bulan diakumulasi. Setelah diperoleh nilai kumulatif neraca air bulanan tersebut, dihitung volume air dalam TSF setelah dikalikan dengan luas TSF. Setelah mendapatkan volume air dalam TSF, kemudian dibandingkan dengan volume air

rata-rata bulanan yang dilewatkan oleh *spillway* untuk mengetahui kondisi akhir dari neraca air untuk setiap skenario.

Tabel 13 menunjukkan volume air untuk nilai kumulatif neraca air bulanan yang dibandingkan dengan volume air rata-rata bulanan yang dilewatkan oleh *spillway*.



Gambar 5. Sarana TSF

Tabel 13. Perbandingan volume neraca air dan volume *spillway* bulanan

Skenario	Selisih Kumulatif Bulanan		Luas Area TSF m ²	Volume m ³	<i>Spillway</i> Bulanan m ³	Keterangan
	mm	m				
1	781,49	0,78		97.687		cukup
2	3583,12	3,58		447.890		<i>overflow</i>
3	4184,86	4,18		523.108		<i>overflow</i>
4	-1354,19	-1,35		-169.274		defisit
5	1447,43	1,45		180.929		<i>overflow</i>
6	2049,17	2,05		256.147		<i>overflow</i>
7	-3041,96	-3,04		-380.244		defisit
8	-240,33	-0,24	125.000	-30.041	103.696	defisit
9	361,41	0,36		45.176		cukup
10	-1125,16	-1,13		-140.645		defisit
11	1676,47	1,68		209.558		<i>overflow</i>
12	2278,21	2,28		284.776		<i>overflow</i>
13	-1505,26	-1,51		-188.157		defisit
14	1296,37	1,30		162.046		<i>overflow</i>
15	1898,11	1,90		237.264		<i>overflow</i>

Analisis terhadap data ketersediaan air di TSF per bulan dengan volume air rata-rata yang bisa dialirkan melalui *spillway* pada tiap bulannya, maka diperoleh hasil:

- Pada skenario 1 & 9, volume air yang bisa dialirkan oleh *spillway* adalah cukup.
- Pada skenario 2, 3, 5, 6, 11, 12, 14, & 15, volume air yang dialirkan pada *spillway* terjadi *overflow*.
- Pada skenario 4, 7, 8, 10, & 13, volume air dalam TSF terjadi defisit, sehingga tidak memenuhi volume air pada *spillway*.

2. Analisis Neraca Air Total Bulanan Berdasarkan Skenario Kondisi Iklim

Sebelum menghitung neraca air total bulanan berdasarkan skenario kondisi iklim, perlu dilakukan perhitungan terhadap volume air hujan yang bertambah dalam TSF setiap akhir tahun, dan juga volume evaporasi potensial yang berkurang dari TSF setiap akhir tahun. Tabel 14 menunjukkan volume air hujan yang bertambah dalam TSF setiap akhir tahun, sedangkan Tabel 15 menunjukkan volume evaporasi potensial yang berkurang dari TSF setiap akhir tahun.

Tabel 14. Perhitungan volume air hujan pada TSF untuk setiap kondisi iklim

Kondisi Iklim, Hujan	Curah Hujan		Koefisien Limpasan	Luas Area Tangkapan Hujan (m ²)	Volume Air Hujan (m ³ /tahun)
	(mm/tahun)	(m/tahun)			
Q4 (Maksimum)	5407,00	5,41			885.667
Aktual (Rata-rata)	3271,31	3,27			535.841
Q0 (Minimum)	1583,55	1,58	0,9	182.000	259.385
<i>Most Likely</i>	3500,35	3,50			573.357
P40	3120,25	3,12			511.097

Tabel 15. Perhitungan volume evaporasi potensial pada TSF untuk setiap kondisi iklim

Kondisi Iklim, Evp	Evp		Luas Area TSF (m ²)	Volume Evp (m ³ /tahun)
	(mm/tahun)	(m/tahun)		
Maksimum	4625,51	4,63		578.188
Rata-rata	1823,88	1,82	125.000	227.985
Minimum	1222,14	1,22		152.767

Neraca air total bulanan merupakan perhitungan selisih total dari curah hujan bulanan dengan total evaporasi potensial bulanan. Analisis ini perlu dilakukan untuk mengetahui keadaan neraca air pada TSF saat pascatambang, karena kedua parameter hidrologi ini menjadi parameter utama ketika proses penambangan sudah tidak memengaruhi volume air dalam TSF. Tabel 16 menunjukkan hasil analisis neraca air total bulanan berdasarkan skenario kondisi iklim.

Dari hasil analisis neraca air total bulanan berdasarkan skenario kondisi iklim, maka diperoleh:

- a. Pada skenario 3 (CH Maks & Evp Min) menunjukkan bahwa volume air yang akan keluar dari TSF adalah 732.899 m³/tahun yang merupakan volume paling besar dari semua skenario kondisi iklim.
- b. Pada skenario 7 (CH Min & Evp Maks) menunjukkan bahwa terjadi defisit air dalam TSF yaitu volume air -318.803 m³/tahun yang merupakan defisit volume paling besar dari semua skenario kondisi iklim.
- c. Pada skenario 4, 10, dan 13 (perbandingan CH Rata-rata, *Most Likely*, dan P40 dengan Evp Maks) terjadi selisih air yang tidak terlalu jauh dari ketiga skenario tersebut.

3. Analisis Neraca Air Terhadap Waktu Pengisian TSF

Untuk menganalisis neraca air terhadap waktu pengisian TSF, perlu diketahui dulu skema neraca air dalam TSF itu sendiri. Seperti yang sudah diilustrasikan dalam Gambar 1 tentang skema neraca air dalam TSF, maka dapat diperoleh lama waktu pengisian TSF hingga terjadi *overflow* pada setiap skenario kondisi iklim yang telah dibuat seperti ditunjukkan pada Tabel 17.

Dari hasil analisis neraca air terhadap waktu pengisian TSF, maka dapat diketahui bahwa skenario 3 yang merupakan kondisi curah hujan maksimum dan evaporasi potensial minimum menjadi skenario dengan pengisian TSF paling cepat yaitu hanya membutuhkan waktu 31,8 bulan atau 2,65 tahun. Sedangkan untuk pengisian TSF paling lama yaitu membutuhkan waktu selama 110,4 bulan atau 9,2 tahun terjadi pada skenario 7 yang merupakan kondisi curah hujan minimum dan evaporasi potensial maksimum.

Analisis Volume Air Dalam TSF

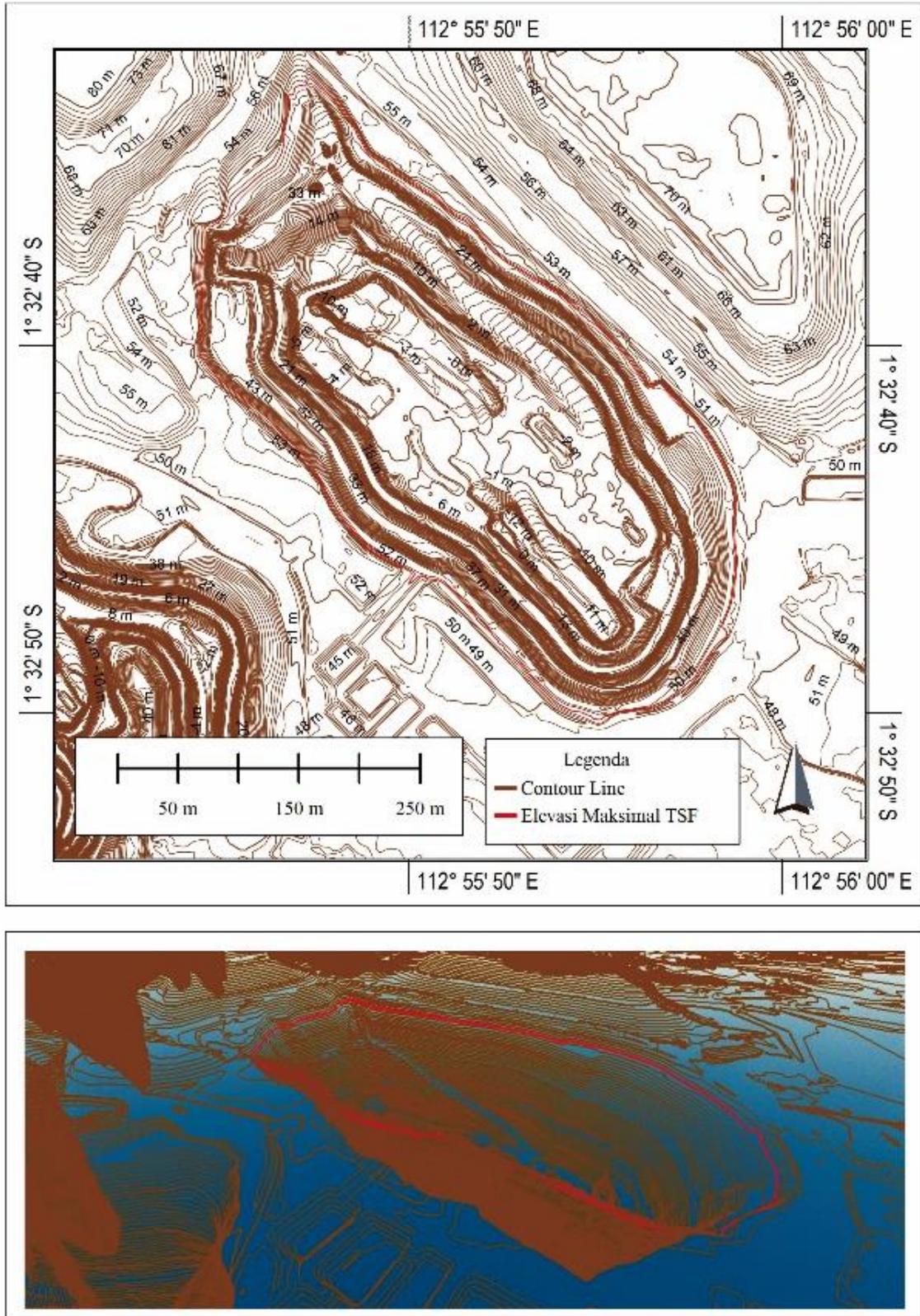
Untuk menganalisis volume air dalam TSF, perlu mengetahui geometri dari TSF itu sendiri agar perhitungan terhadap volume air yang tersimpan dalam TSF bisa sesuai. Selain itu, harus diketahui total padatan (*tailing*) yang sudah tersimpan di dalam TSF dan mengendap. Garis kontur pada area TSF dapat dilihat pada Gambar 6. Adapun volume TSF per elevasi ditunjukkan pada Gambar 7.

Tabel 16. Perhitungan neraca air saat pascatambang berdasarkan skenario kondisi iklim

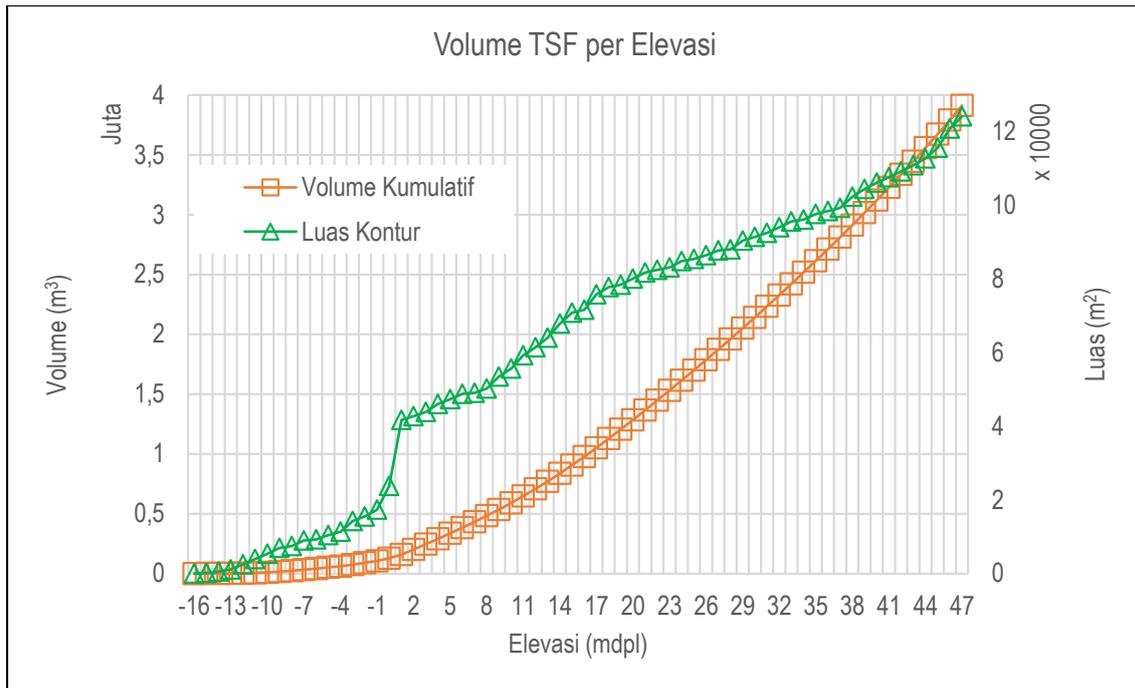
Skenario	Kondisi Iklim		Volume Air Hujan	Volume Evaporasi Potensial	Volume <i>Overflow</i>
			m ³ /tahun		
1	CH Maks	Evp Maks	885.667	578.188	307.478
2	CH Maks	Evp Rata-rata	885.667	227.985	657.681
3	CH Maks	Evp Min	885.667	152.767	732.899
4	CH Rata-rata	Evp Maks	535.841	578.188	-42.347
5	CH Rata-rata	Evp Rata-rata	535.841	227.985	307.856
6	CH Rata-rata	Evp Min	535.841	152.767	383.074
7	CH Min	Evp Maks	259.385	578.188	-318.803
8	CH Min	Evp Rata-rata	259.385	227.985	31.400
9	CH Min	Evp Min	259.385	152.767	106.618
10	<i>Most Likely</i>	Evp Maks	573.357	578.188	-4.831
11	<i>Most Likely</i>	Evp Rata-rata	573.357	227.985	345.372
12	<i>Most Likely</i>	Evp Min	573.357	152.767	420.590
13	P40	Evp Maks	511.097	578.188	-67.091
14	P40	Evp Rata-rata	511.097	227.985	283.112
15	P40	Evp Min	511.097	152.767	358.329

Tabel 17. Skema neraca air terhadap waktu terjadinya overflow

Skenario	Volume Tailing	Total air dari Pabrik	Volume Hujan	Volume Evaporasi	Water Recycle	Volume air keluar dari TSF	Total Air + Tailing	Volume TSF	TSF Meluap
	m ³ /bulan	m ³ /tahun	m ³ /bulan	m ³	bulan				
1		885.667	578.188	474.957	39.580	87.650	44,7		3,72
2		885.667	227.985	825.160	68.763	116.833	33,5		2,79
3		885.667	152.767	900.378	75.032	123.101	31,8		2,65
4		535.841	578.188	125.132	10.428	58.498	66,9		5,58
5		535.841	227.985	475.335	39.611	87.681	44,6		3,72
6		535.841	152.767	550.553	45.879	93.949	41,7		3,47
7		259.385	578.188	-151.323	-12.610	35.460	110,4		9,20
8	48.070	1.220.967	259.385	198.879	16.573	64.643	60,6	3.914.340	5,05
9		259.385	152.767	274.097	22.841	70.911	55,2		4,60
10		573.357	578.188	162.648	13.554	61.624	63,5		5,29
11		573.357	227.985	512.851	42.738	90.807	43,1		3,59
12		573.357	152.767	588.068	49.006	97.076	40,3		3,36
13		511.097	578.188	100.387	8.366	56.436	69,4		5,78
14		511.097	227.985	450.590	37.549	85.619	45,7		3,81
15		511.097	152.767	525.808	43.817	91.887	42,6		3,55



Gambar 6. Garis kontur pada area TSF



Gambar 7. Volume TSF per elevasi

Berdasarkan Tabel 9, volume padatan (*tailing*) dalam TSF adalah 2.884.197 m³ atau berada pada elevasi +36 sampai +38 mdpl. Jika level air yang bisa dimaksimalkan dalam TSF berada pada elevasi +47 mdpl, maka dapat diperoleh data volume air yang bisa dipertahankan dalam TSF adalah 1.030.143 m³. Berdasarkan hasil analisis neraca air bulanan dalam TSF dan diakumulasi dari total volume air dalam TSF yang telah dijelaskan pada Tabel 13, maka diperoleh 5 skenario yang mengakibatkan terjadinya defisit air dalam TSF yaitu skenario 4, 7, 8, 10, dan 13. Kemudian, setelah dikorelasikan dengan volume TSF, maka

diperoleh elevasi dari setiap skenario tersebut adalah seperti ditunjukkan oleh Tabel 18.

Selanjutnya untuk mengetahui volume air total bulanan yang tersimpan dalam TSF untuk satu tahun, perlu dilakukan perbandingan hasil perhitungan neraca air total bulanan pada Tabel 16 dengan volume air rata-rata per tahun yang dilewatkan oleh *spillway*. Dari perbandingan tersebut, bisa diperoleh skenario mana saja yang mengalami defisit air dalam TSF. Untuk mengetahui hasil perbandingan volume air total bulanan dengan volume air rata-rata per tahun yang dilewatkan oleh *spillway* dapat dilihat pada Tabel 19.

Tabel 18. Elevasi air yang tersisa dalam TSF pada beberapa skenario kondisi iklim

Skenario	Volume Defisit m ³	Volume Air Elevasi Maksimum m ³	Volume Air Sisa pada TSF m ³	Elevasi mdpl
4	-169.274		3.745.066	+46
7	-380.244		3.534.096	+44
8	-30.041	3.914.340	3.884.299	+47
10	-140.645		3.773.695	+46
13	-188.157		3.726.183	+46

Tabel 19. Perbandingan volume *overflow* pada skenario kondisi iklim dengan volume air yang dilewatkan oleh *spillway*

Skenario	Kondisi Iklim		Volume	Volume Air yang	Hasil
			<i>Overflow</i>	Melalui <i>Spillway</i>	
			m ³ /tahun		
1	CH Maks	Evp Maks	307.478		memenuhi
2	CH Maks	Evp Rata-rata	657.681		memenuhi
3	CH Maks	Evp Min	732.899		memenuhi
4	CH Rata-rata	Evp Maks	-42.347		tidak memenuhi
5	CH Rata-rata	Evp Rata-rata	307.856		memenuhi
6	CH Rata-rata	Evp Min	383.074		memenuhi
7	CH Min	Evp Maks	-318.803		tidak memenuhi
8	CH Min	Evp Rata-rata	31.400	1.217.655	memenuhi
9	CH Min	Evp Min	106.618		memenuhi
10	<i>Most Likely</i>	Evp Maks	-4.831		tidak memenuhi
11	<i>Most Likely</i>	Evp Rata-rata	345.372		memenuhi
12	<i>Most Likely</i>	Evp Min	420.590		memenuhi
13	P40	Evp Maks	-67.091		tidak memenuhi
14	P40	Evp Rata-rata	283.112		memenuhi
15	P40	Evp Min	358.329		memenuhi

Jika dibandingkan volume air (*overflow*) dengan volume air yang bisa dialirkan melalui *spillway*, maka dapat diketahui bahwa pada 11 skenario kondisi iklim (1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15) dengan neraca air yang positif, mampu dialirkan melalui *spillway* dan tidak melewati kapasitas dari *spillway* itu sendiri. Sedangkan pada skenario 4, 7, 10, 13, dengan neraca air yang negatif, dikhawatirkan akan terjadi penurunan level air dalam TSF hingga di bawah level *spillway*. Namun yang menjadi perhatian utama adalah skenario 7 yaitu mengalami defisit air yang cukup tinggi.

Selanjutnya dari skenario kondisi iklim yang mengalami defisit air, bisa diperoleh data elevasi level air dalam TSF untuk 4 skenario yang mengalami defisit tersebut. Tabel 20

menunjukkan elevasi level air dalam TSF untuk skenario kondisi iklim yang mengalami defisit.

Dari Tabel 20 bisa diketahui bahwa pada skenario 4, 10, dan 13, level air dalam TSF berada pada elevasi +46 mdpl. Sedangkan pada skenario 7, level air dalam TSF berada pada elevasi +44 mdpl. Untuk diketahui *spillway* berada pada elevasi +47,2 mdpl.

Jika diamati dari elevasi padatan dalam TSF maka dapat diketahui bahwa untuk skenario 4, 10, dan 13 memiliki ketebalan air dalam TSF sebesar 8 – 10 m. Sedangkan untuk skenario 7, ketebalan air dalam TSF adalah 6 – 8 m. Tabel 21 menunjukkan ketebalan air dalam TSF untuk skenario kondisi iklim yang mengalami defisit.

Tabel 20. Elevasi level air dalam TSF untuk skenario kondisi iklim yang mengalami defisit

Skenario	Kondisi Iklim		Volume Air (m ³ /tahun)	Selisih (m ³ /tahun)	Elevasi (mdpl)
4	CH Mean	Evp Maks	-42.347	3.871.993	+46
7	CH Min	Evp Maks	-318.803	3.595.537	+44
10	<i>Most Likely</i>	Evp Maks	-4.431	3.909.509	+46
13	P40	Evp Maks	-67.091	3.847.249	+46

Tabel 21. Ketebalan air dalam TSF untuk skenario kondisi iklim yang mengalami defisit

Skenario	Kondisi Iklim		Elevasi Padatan (mdpl)	Volume Ketebalan Air dalam TSF (m ³)	Elevasi (mdpl)	Ketebalan Air (m)
4	CH Mean	Evp Maks			+46	8 – 10
7	CH Min	Evp Maks	+36 s/d +38	1.001.277	+44	6 – 8
10	<i>Most Likely</i>	Evp Maks			+46	8 – 10
13	P40	Evp Maks			+46	8 – 10

Jika diasumsikan padatan dalam TSF diratakan, maka secara keseluruhan elevasi padatan tersebut adalah +38 mdpl, maka volume ketebalan air adalah $\pm 1.001.277 \text{ m}^3$. Oleh karena itu dapat diketahui bahwa untuk skenario 4, 10, dan 13 ketebalan air dalam TSF adalah 8 m, dengan volume ketebalan air $\pm 878.730 \text{ m}^3$. Sedangkan untuk skenario 7, ketebalan air dalam TSF adalah 6 m, dengan volume ketebalan air $\pm 646.193 \text{ m}^3$. Tabel 22 menunjukkan ketebalan kolom air dalam TSF jika diasumsikan padatan dalam TSF diratakan. Sedangkan Gambar 8 menunjukkan padatan dalam TSF diratakan.

Analisis Metode Penanganan TSF

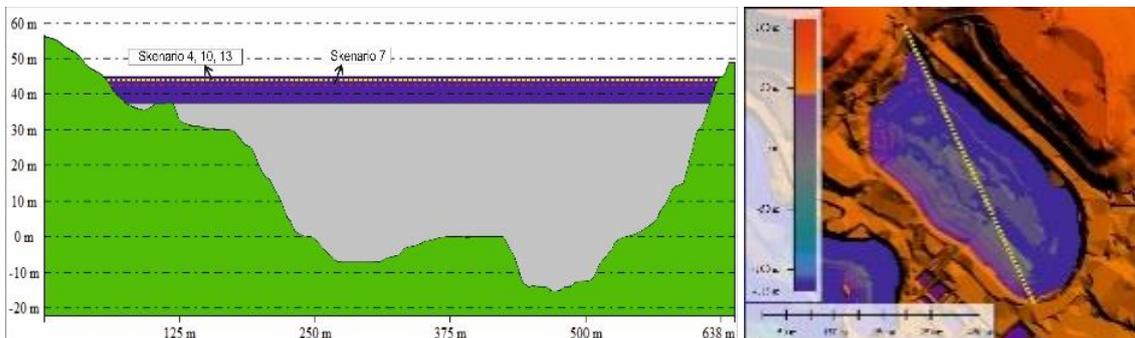
Dari data ketebalan kolom air sesuai dengan elevasi *spillway* dan neraca air dari sebagian besar skenario kondisi iklim menunjukkan neraca air yang positif, maka dapat ditentukan metode penanganan TSF pada saat pascatambang yang sesuai dengan analisis iklim yang telah dilakukan adalah metode *water cover* (penudungan dengan air) (Gautama, 2014). Hal ini dikarenakan ketebalan kolom air yang mencapai 6m mampu mencegah terjadinya difusi oksigen dan terjadinya resuspensi dari butiran *tailing*.

Selanjutnya dengan menggunakan plot data pada *Cover & Climate Types* (The International Network for Acid Prevention, 2014), dan dengan memerhatikan data curah hujan yang telah dianalisis, maka dapat diperoleh curah hujan tahunan untuk lokasi penambangan adalah:

1. Aktual (*mean*) = 3271,31 mm
2. *Most likely* = 3500,35 mm
3. Persentil 40 = 3120,25 mm

Selain itu, letak geografis, lokasi penambangan berada pada iklim tropis lembab (*tropical humid*) (Peel, Finlayson dan McMahon, 2007) dan data suhu rata-rata pada lokasi penambangan adalah 26,89 - 27,81 °C. Gambar 9 menunjukkan plot data pada *Cover & Climate Types* sebagai salah satu cara untuk menentukan metode penanganan TSF pada saat pascatambang.

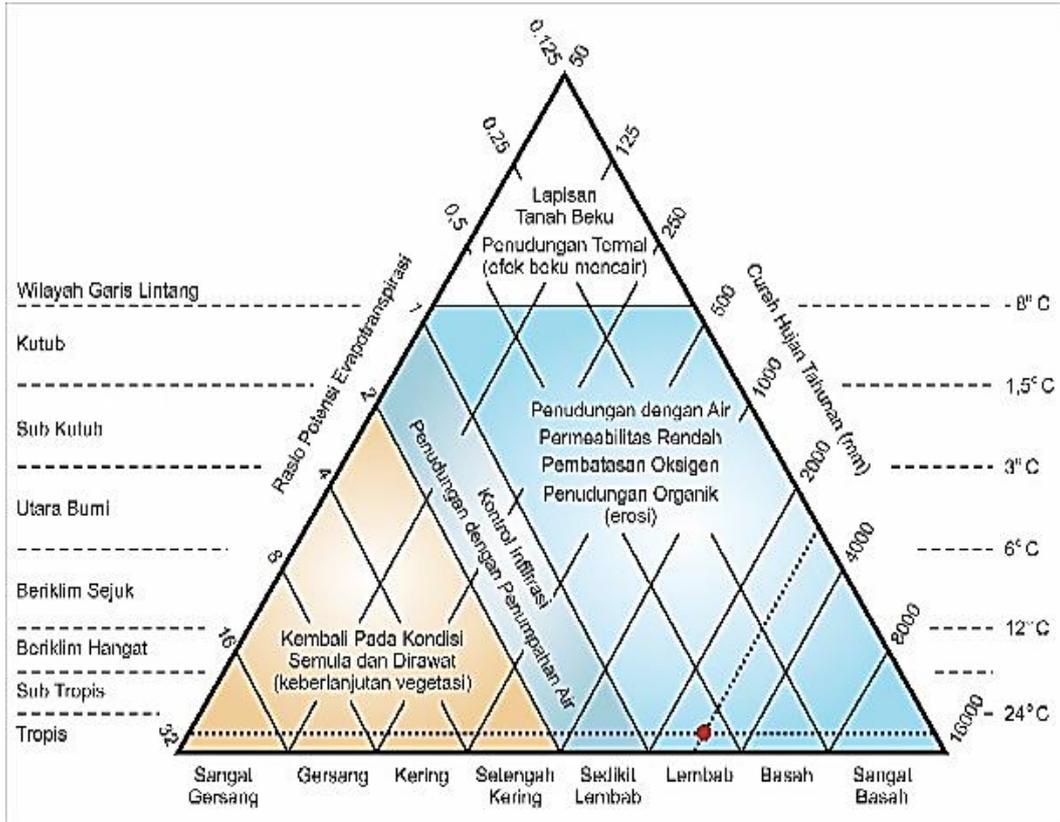
Berdasarkan data curah hujan, klasifikasi iklim, dan suhu pada lokasi penambangan, maka dapat diplot pada *Cover & Climate Types* dan diperoleh bahwa metode penanganan TSF yang tepat adalah dengan metode *water cover* (penudungan dengan air).



Gambar 8. Padatan dalam TSF diratakan

Tabel 22. Ketebalan air dalam TSF jika diasumsikan padatan diratakan

Skenario	Kondisi Iklim	Elevasi Padatan (mdpl)	Elevasi (mdpl)	Ketebalan Air (m)
4	CH Mean	Evp Maks	+46	8
7	CH Min	Evp Maks	+44	6
10	<i>Most Likely</i>	Evp Maks	+46	8
13	P40	Evp Maks	+46	8



Gambar 9. Plot data pada *Cover & Climate Types* untuk daerah penambangan PT XYZ

KESIMPULAN

Perhitungan neraca air dengan parameter curah hujan dan evaporasi potensial, menunjukkan bahwa terjadi defisit air pada 4 skenario kondisi iklim, yaitu: (1) Skenario 4 (curah hujan rata-rata dan evaporasi potensial maksimum) dengan defisit volume air sebesar $-42.347 \text{ m}^3/\text{tahun}$, sehingga level air dalam TSF berada pada elevasi $+46 \text{ mdpl}$; (2) Skenario 7 (curah hujan minimum dan evaporasi potensial maksimum) dengan defisit volume air sebesar $-318.803 \text{ m}^3/\text{tahun}$, sehingga level air dalam TSF berada pada elevasi $+44 \text{ mdpl}$; (3) Skenario 10 (curah hujan *most likely* dan evaporasi potensial maksimum) dengan defisit volume air sebesar $-4.431 \text{ m}^3/\text{tahun}$, sehingga level air dalam TSF berada pada elevasi $+46 \text{ mdpl}$; dan (4) Skenario 13 (curah hujan persentil 40 dan evaporasi potensial maksimum) dengan defisit volume air sebesar $-67.091 \text{ m}^3/\text{tahun}$, sehingga level air dalam TSF berada pada elevasi $+46 \text{ mdpl}$. Berdasarkan hasil analisis skenario kondisi iklim pada lokasi TSF, seperti neraca air yang sebagian besar menunjukkan neraca air yang positif dan

ketebalan kolom air dalam TSF pada beberapa skenario dengan neraca air negatif menunjukkan ketebalan kolom air yang mencapai 6 m, dan juga berdasarkan klasifikasi iklim, curah hujan, dan suhu yang diplot pada *Cover & Climate Types* maka metode penanganan TSF pada saat pascatambang adalah dengan cara penundungan dengan air (*water cover*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Lingkungan Tambang ITB yang telah membantu dalam penelitian ini, serta para dosen Teknik Pertambangan ITB.

DAFTAR PUSTAKA

Ashari, A. dan Gautama, R.S. (2014) *Karakterisasi geokimia tailing tambang emas terkait metode penempatan tailing pada tailing storage facility*. Institut Teknologi Bandung.

- Bennett, K. dan Lacy, H. (2012) "Closure planning and decommissioning of tailings storage facilities," in *Proceedings of the Seventh International Conference on Mine Closure*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, hal. 139–148. Tersedia pada: https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1208_14_Bennett.
- Chairunnisa, N., Arif, C., Perdinan dan Wibowo, A. (2021) "Analisis neraca air di Pulau Jawa-Bali sebagai upayaantisipasi krisis air," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 6(2), hal. 61–80. Tersedia pada: <https://doi.org/10.29244/jstil.6.2.61-80>.
- Danasla, M.A., Kusuma, G.J., Tuheteru, E.J. dan Gautama, R.S. (2021) "Hydrology model establishment of pit lake: Extreme event rainfall data analysis," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 882(1), hal. 012048. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/882/1/012048>.
- Department of Industry Innovation and Science (2016) *Tailings management: Leading practice sustainable development program for the mining industry*. Canberra: Australian Government.
- Fahraini, A. dan Rusdiansyah, A. (2020) "Analisis keandalan metode analisa frekuensi dan intensitas hujan berdasarkan data curah hujan klimatologi Banjarbaru," *Jurnal Teknologi Berkelanjutan (Sustainable Technology Journal)*, 9(1), hal. 11–23.
- Gautama, R.S. (2014) *Pembentukan, pengendalian dan pengelolaan air asam tambang*. Bandung: ITB Press.
- Hall, R. dan Wilson, M.E.J. (2000) "Neogene sutures in eastern Indonesia," *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6), hal. 781–808. Tersedia pada: [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(00\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(00)00040-7).
- Hasan, F., Hadihardaja, I.K. dan Kardhana, H. (2018) *Metode rasional modifikasi untuk berbagai kejadian hujan di Sub-DAS Cimanyar*. Institut Teknologi Bandung.
- Iliopoulou, T., Malamos, N. dan Koutsoyiannis, D. (2022) "Regional ombrian curves: Design rainfall estimation for a spatially diverse rainfall regime," *Hydrology*, 9(5), hal. 67. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/hydrology9050067>.
- 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.
- Kite, G.W. (1997) *Manual for the SLURP hydrologic model version 11.3*. Saskatoon, Canada: National Water Research Institute.
- Lakitan, B. (2002) *Dasar-dasar klimatologi*. Jakarta: RajaGrafindo Persada.
- Lottermoser, B. (2010) *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>.
- Manggau, M.A., Alam, B.Y.C.S. dan Iskandarsyah, T.Y.W.M. (2020) "Simulasi pengaruh perubahan tataguna lahan dan temperatur terhadap potensi cadangan airtanah pada perhitungan neraca air DAS Cijulang, Pangandaran," *Padjadjaran Geoscience Journal*, 4(4), hal. 322–337.
- Marlina, S. (2016) "Kajian curah hujan untuk pemutahiran tipe iklim beberapa wilayah di Kalimantan Tengah," *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, 1(2), hal. 9–17. Tersedia pada: <https://doi.org/10.33084/mitl.v1i2.141>.
- METSERVE (2012) *Tailings storage facility management plan: McArthur River Mine Phase 3 Development Project*. Australia.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L. dan McMahon, T.A. (2007) "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification," *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), hal. 1633–1644. Tersedia pada: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Pemerintah Republik Indonesia (2009) *Undang-undang Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan mineral dan batubara*. Indonesia.
- Rotting, T.S., Dent, J. dan Reyes, R. (2018) "Life-of-mine water management and treatment strategies," in C. Wolkersdorfer, L. Sartz, A. Weber, J. Burgess, dan G. Tremblay (ed.) *11th ICARD IMWA MWD Conference: Risk to Opportunity*, hal. 442–447.
- Solgi, N. (2017) *Water balance of metal mining tailings management facilities: influence of climate conditions and tailings management options*. University of British Columbia. Tersedia pada: <https://doi.org/10.14288/1.0344016>.

- Suppes, R. dan Heuss-Aßbichler, S. (2021) "How to identify potentials and barriers of raw materials recovery from tailings? Part I: A UNFC-Compliant screening approach for site selection," *Resources*, 10(3), hal. 26. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/resources10030026>.
- The International Network for Acid Prevention (2014) *Global acid rock drainage (GARD) guide: prediction, prevention management*. The International Network for Acid Prevention.
- Thornthwaite, C.W. (1948) "An approach toward a rational classification of climate," *Geographical Review*, 38(1), hal. 55–94. Tersedia pada: <https://doi.org/10.2307/210739>.
- Triatmodjo, B. (2008) *Hidrologi terapan*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Upomo, T.C. dan Kusumawardani, R. (2016) "Pemilihan distribusi probabilitas pada analisa hujan dengan metode goodness of fit test," *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 18(2), hal. 139–148. Tersedia pada: <https://doi.org/10.15294/jtsp.v18i2.7480>.
- Wahyudiono, J. (2017) "Karakteristik petrologi dan geokimia batuan gunung api oligosen akhir - miosen di daerah Gunung Muro, Kalimantan Tengah," *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 18(2), hal. 105–115.
- Welch, D.E. (2001) "Tailings basin water management," in W.A. Hustrulid, M.K. McCarter, dan D.J.A. Van Zyl (ed.) *Slope stability in surface mining*. Littleton: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, hal. 391–398.