

Artikel Penelitian

Kajian Neraca Air dan Estimasi Potensi Air Tambang Pit Nusa, Kecamatan Lhoknga, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh.

Study on Water Ballance and Mine Water Supply Estimation on Pit Nusa, Lhoknga District, Aceh Besar Regency, The Province of Aceh

Faizal Agung Riyadi*

Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta.
Jl. Padjajaran, Sleman, Yogyakarta, Indonesia. 55283

*Penulis korespondensi
e-mail: faizal.agung@upnyk.ac.id

ABSTRAK

Kajian ini bertujuan untuk menganalisis neraca air dan mengestimasi potensi air tambang di rencana Pit Nusa, Kecamatan Lhoknga, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh. Penelitian dilakukan melalui pendekatan hidrologi dan hidrogeologi dengan mempertimbangkan komponen utama neraca air, yaitu presipitasi (*P*), evapotranspirasi (*ET*), infiltrasi (*Inf.*), dan limpasan permukaan (*Runoff*). Presipitasi dihitung berdasarkan nilai intensitas hujan rencana dengan metode Gumbel. Evapotranspirasi dihitung menggunakan metode Thornthwaite dengan koreksi lintang 5° LU. Perhitungan infiltrasi dilakukan berdasarkan konduktivitas hidrolik batuan rata-rata ($K = 2,608 \times 10^{-7}$ m/s) yang diperoleh dari pengujian konduktivitas hidrolik di lapangan. Debit limpasan dianalisis dan dihitung menggunakan rumus rasional berdasarkan rasio sebesar 70,325% terhadap nilai presipitasi. Hasil kajian menunjukkan rasio neraca air $P : ET : Inf. : Runoff = 100\% : 17,82\% : 11,86\% : 70,32\%$ untuk daerah tangkapan 1 km². Estimasi debit air tambang harian mencapai 22.271,82 m³/hari dari limpasan dan 1.181,64 m³/hari (Pit bagian Utara) serta 886,22 m³/hari (Pit bagian Selatan) dari air tanah. Secara kumulatif, potensi air tambang dari air limpasan tahunan mencapai 267.261,84 m³/tahun untuk tiap 1 km² daerah tangkapan hujan. Potensi rembesan air tanah yang berasal dari batuan yang terekspos selama kegiatan penambangan adalah sebesar 212.694,625 m³/tahun untuk tiap 1 km lebar bukaan tambang. Potensi air tanah untuk Pit bagian Utara sebesar 425.389,25 m³/tahun dan Pit Bagian Selatan 319.041,94 m³/tahun.

Kata Kunci: air tambang, hidrologi, hidrogeologi, neraca air, pengelolaan sumber daya air

ABSTRACT

*This study aims to analyze the water balance and estimate mine water potential in the planned Pit Nusa, Lhoknga Subdistrict, Aceh Besar Regency, Aceh Province. The research employs hydrological and hydrogeological approaches by considering key water balance components: precipitation (*P*), evapotranspiration (*ET*), infiltration (*Inf.*), and surface runoff (*Runoff*). Precipitation was calculated based on design rainfall intensity using the Gumbel method. Evapotranspiration was estimated using the Thornthwaite method with a latitude correction of 5°N. Infiltration was calculated based on the average hydraulic conductivity of rock ($K = 2.608 \times 10^{-7}$ m/s), obtained from field hydraulic conductivity tests. Runoff discharge was analyzed using the rational formula, accounting for 70.325% of precipitation. The results show a water balance ratio of $P : ET : Inf. : Runoff = 100\% : 17.82\% : 11.86\% : 70.32\%$ for a 1 km² catchment area. The estimated daily mine water discharge reaches 22,271.82 m³/day from runoff and 1,181.64 m³/day (North Pit) and 886.22 m³/day (South Pit) from groundwater. Cumulatively, annual runoff potential is 267,261.84 m³/year per 1 km² catchment area. Groundwater seepage potential from exposed rock formations during mining activities is estimated at 212,694.625 m³/year per 1 km of mine opening width. Total annual groundwater potential is 425,389.25 m³/year for the North Pit and 319,041.94 m³/year for the South Pit. These findings provide a basis for designing effective mine drainage systems to mitigate environmental impacts and ensure operational sustainability. The study recommends periodic monitoring of climatic variables and optimization of water management infrastructure to address seasonal fluctuations.*

Keywords: mine water, hydrology and hydrogeology, water balance, water resources management

Naskah masuk : 10 Mei 2025
Revisi pertama : 25 Juni 2025
Naskah diterima : 26 Juni 2025
Naskah dipublikasi online : 26 Juni 2025

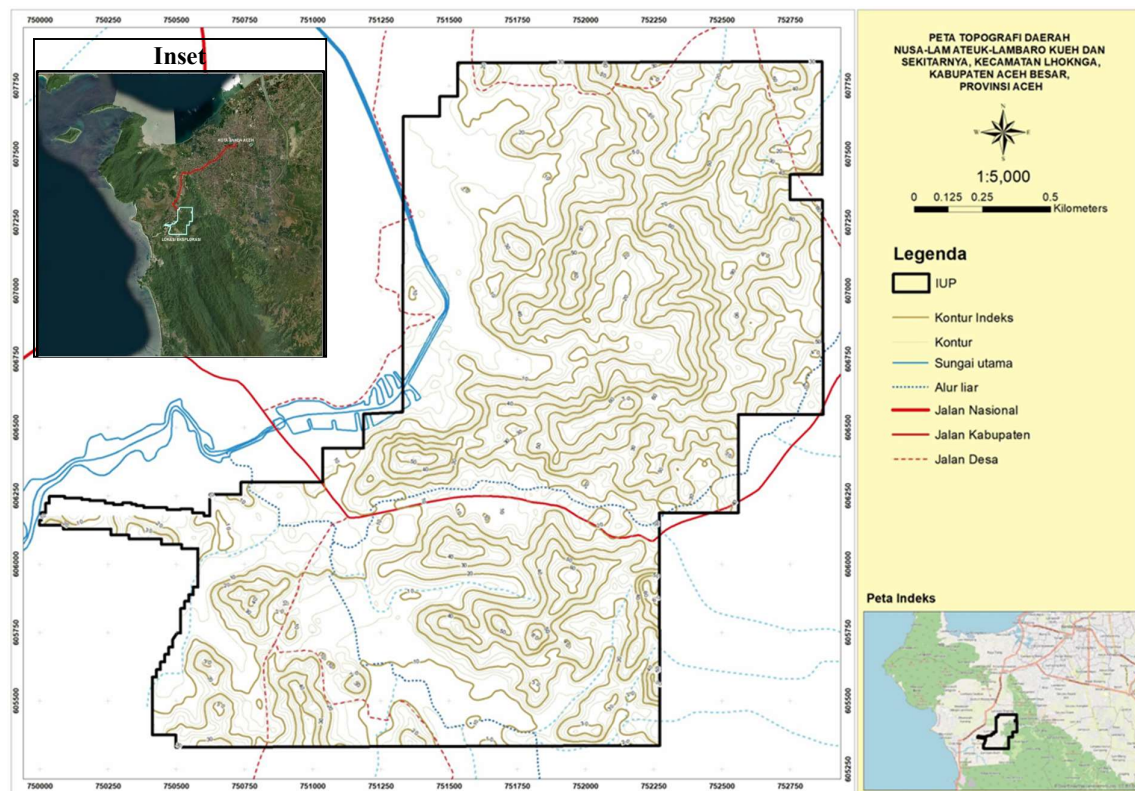
I. PENDAHULUAN

Sebuah perusahaan pertambangan yang berlokasi di berencana untuk melakukan rencana ekspansi IUP dan penambangan di Kecamatan Lhoknga, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh. Daerah penelitian berjarak sekitar 15 km dari Kota Banda Aceh. Perjalanan dari Banda Aceh menuju lokasi eksplorasi dengan estimasi kesampaian daerah sekitar 25 menit melalui Jalan Raya Lintas Sumatera menggunakan kendaraan roda 2 maupun roda 4.

Dalam rangka melaksanakan kaidah teknik pertambangan yang baik (*good mining practice*), Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 menjadi pedoman yang mengatur tentang aspek kesehatan dan keselamatan kerja, perlindungan lingkungan, manajemen operasi penambangan, serta fungsi pengawasan dan kepatuhan terhadap regulasi yang

terkait dengan penyelenggaraan kegiatan penambangan.

Salah satu komponen yang diperlukan dalam pemenuhan atas pedoman pelaksanaan penambangan yang baik adalah aspek hidrologi dan hidrogeologi dari suatu daerah rencana penambangan (Custodio, & Llamas, 2001; Pasa, dkk. 2024; Riyadi, 2013; Riyadi, 2023; Riyadi & Cahyadi, 2025). Rencana pengelolaan dan pengendalian air di luar tambang menggunakan cara penyaluran air limpasan (SNI 2415:2016), sedangkan penanggulungan air di dalam tambang dengan cara membuat saluran-saluran drainase di lereng dan di lantai tambang, kemudian membuat ceruk (*sump*) dan memompa air tersebut ke kolam pengendapan (*settling pond*) dan akhirnya dikeluarkan ke luar tambang (Pasa, dkk. 2024; Riyadi, 2023; Riyadi & Cahyadi, 2025; Riyadi, dkk. 2019; Ernawati, dkk. 2020).



Gambar 1. Peta daerah penelitian yang menunjukkan kontur topografi dan pola aliran Sungai.

Daerah penelitian berada di Zona Jajaran Barisan Pulau Sumatra dengan morfologi berupa perbukitan bergelombang hingga dataran, dan topografi menurun dari timur laut (90 mdpl) ke barat daya (10 mdpl) (Gambar 1). Geomorfologi terbagi menjadi tiga satuan: dataran endapan alluvial, lembah struktural, dan perbukitan batulanau-serpih. Litologi utamanya meliputi serpih, batulanau, batulanau masif, batulempung, dan endapan alluvial, berdasarkan pengamatan megaskopis, mineralogi, dan geokimia.

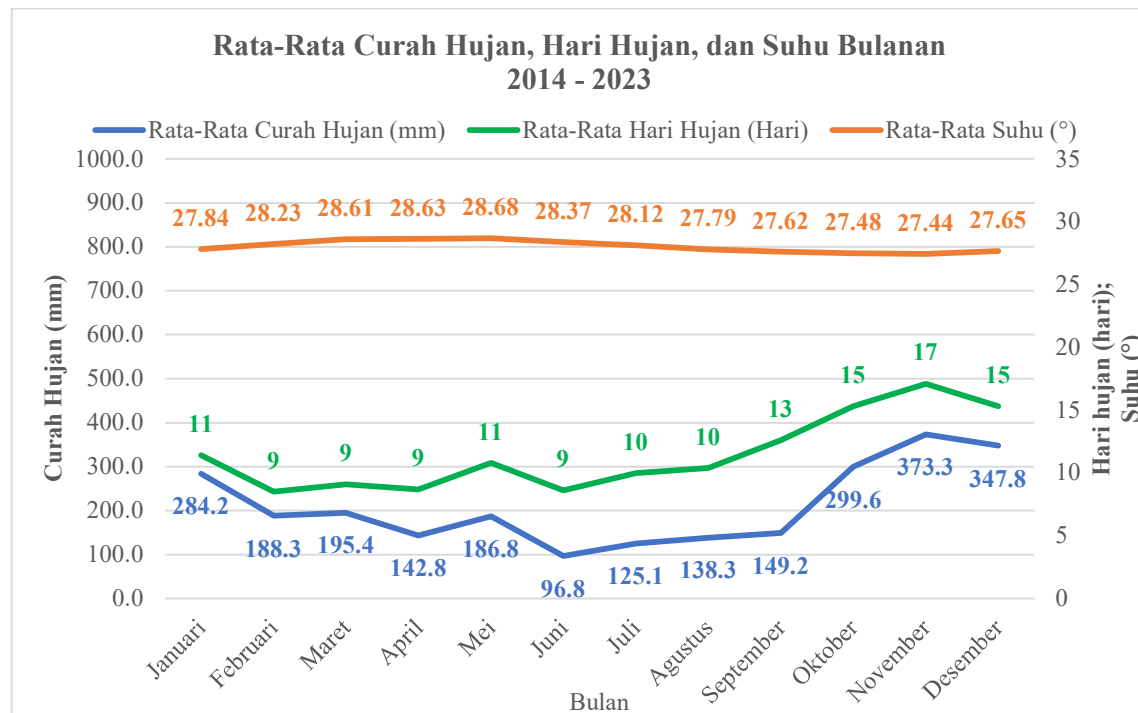
(Pusat Kajian LKFT UGM, 2024). Secara struktural, daerah ini dipengaruhi oleh sesar geser barat laut–tenggara sebagai bagian dari Sesar Besar Sumatra (Natawidjaja, 2018; Sieh & Natawidjaja, 2000) serta sesar sekunder berarah timur laut–barat daya dan barat–timur, dengan lipatan dan kekar yang terbentuk intensif (Pusat Kajian LKFT UGM, 2024).

Hidrologi daerah Lhoknga memiliki sistem air yang cukup baik yang bersumber dari sungai-sungai besar

dan banyaknya alur yang ada. Kondisi air pada sungai di bagian barat daerah penelitian pada banyak tempat mengalami surplus dengan aliran tidak henti bahkan saat musim kemarau. Aliran air pada daerah penelitian semuanya mengarah ke barat yang bermuara ke pesisir pantai Aceh. Kerapatan sungai dengan debit tidak terlalu tinggi pada daerah ini, terbentuk akibat lereng yang terjal dan bentuk morfologi sungai yang stadia muda-dewasa. Sistem aliran sungai pada daerah Lhoknga terbentuk dari sistem sungai besar di Desa Lambaro Kueh yang berada di sisi barat daerah penelitian dengan debit sedang – lemah yang searah dengannya yang berujung ke sungai di Desa Lambaro Kueh. Sekitar 4 km sisi barat daerah penelitian berbatasan dengan pantai Aceh. Aliran air tanah di daerah penelitian terbatas pada zona celah, rekahan, dan saluran pelarutan (Soetrisno, 1993 dalam Pusat Kajian LKFT UGM, 2024). Batulanau, batulempung, dan serpih yang ada pada daerah penelitian umum memiliki kelulusan rendah sampai sangat rendah. Secara hidrolik, material di daerah penelitian

merupakan akuitard (Domenico & Schwartz, 1990). Berdasarkan informasi dari penduduk, kedalaman muka air tanah cukup dangkal antara 6-12 m dibawah permukaan tanah.

Berdasarkan data BMKG (2024), rata-rata curah hujan bulanan di lokasi studi menunjukkan variasi yang cukup signifikan antar tahun. Nilai terendah tercatat pada tahun 2015 sebesar 93,12 mm dan tertinggi pada tahun 2021 sebesar 317,18 mm. Total curah hujan tahunan juga bervariasi, dengan nilai terendah pada tahun 2015 (1117,4 mm) dan tertinggi pada tahun 2021 (3806,1 mm), menunjukkan fluktuasi hingga lebih dari tiga kali lipat antar tahun. Pola musiman terlihat jelas, di mana bulan November dan Desember cenderung memiliki curah hujan lebih tinggi, sedangkan bulan Juli dan Agustus lebih kering. Adanya peningkatan curah hujan pada tahun-tahun terakhir (2021–2023) mengindikasikan kemungkinan adanya variasi iklim atau perubahan pola cuaca (Jain, dkk., 2023; Montes-Pajuelo, dkk. 2024).



Gambar 2. Rata-Rata Curah Hujan, Hari Hujan, dan Suhu Bulanan 2014 – 2023 (NASA, 2024)

Tabel 1 – 3 menunjukkan tabulasi data curah hujan bulanan, hari hujan bulanan, hari hujan harian rata-rata untuk tiap bulan, tahun 2014 hingga 2023. Rata-rata hari hujan bulanan berkisar antara 9 hari (tahun 2015) hingga 13 hari (tahun 2022), dengan kebanyakan tahun berada dalam rentang 10–12 hari. Jumlah hari hujan tahunan bervariasi dari 109 hari (2015) hingga 163 hari (2022) (BMKG, 2024). Meski umumnya jumlah hari hujan berkorelasi dengan total curah hujan, hal ini tidak selalu berlaku. Sebagai contoh, tahun 2021 memiliki curah hujan tahunan tertinggi namun hanya mencatat

149 hari hujan, menunjukkan intensitas hujan harian yang tinggi. Sebaliknya, tahun 2022 mencatat jumlah hari hujan tertinggi (163 hari), tetapi dengan total curah hujan yang sedikit lebih rendah, menandakan curah hujan yang lebih ringan namun lebih sering. Hal ini menunjukkan bahwa tahun dengan curah hujan tinggi tidak selalu memiliki frekuensi hujan tinggi, tergantung pada intensitas hujan setiap hari.

Berdasarkan data suhu pada Tabel 4 (NASA, 2024), rata-rata suhu tiap bulan selama periode ini bervariasi,

dengan puncak suhu umumnya terjadi pada bulan Mei dan Juni, sementara suhu cenderung menurun pada bulan-bulan akhir tahun, seperti Oktober hingga Desember. Berdasarkan data suhu bulanan, suhu rata-rata tertinggi terjadi di bulan Juni (28,87 °C) dan suhu rata-rata terendah di bulan Januari (27,84 °C). Secara umum, suhu bulanan berkisar antara 27,65 °C hingga 28,87 °C sepanjang tahun. Grafik pada Gambar 2 menunjukkan suhu rata-rata curah hujan, hari hujan, dan suhu rata-rata bulanan tahun 2014 hingga 2023. Berdasarkan pada Rangkuti, dkk. (2020), jam hujan harian di daerah penelitian adalah 4 jam.

Kajian hidrologi dan hidrogeologi sangat diperlukan sebagai dasar untuk perencanaan dan perancangan

teknis. Kajian ini diperlukan sehubungan dengan rencana pengelolaan air tambang dengan suatu sistem penyaliran tambang. Pengelolaan air tambang diperlukan sebagai upaya perlindungan lingkungan dan sumber daya lingkungan di sekitar area tambang, termasuk aspek kesehatan dan keselamatan kerja, yang juga berkaitan dengan kelancaran operasi penambangan (EPA, 2024; Pemerintah Republik Indonesia, 2021). Oleh karena itu, kajian ini menjadi bagian penting dari proses pengelolaan air di lingkungan pertambangan sebagai tanggung jawab lingkungan untuk mencapai keberlanjutan operasi pertambangan. Tujuan kajian ini adalah untuk mengkaji neraca air dan mengestimasi potensi air yang masuk ke dalam rencana tambang..

Tabel 1 Data Curah Hujan Bulanan (mm) 2014 – 2023 (BMKG 2024)

Tahun	Curah Hujan Bulanan (mm) 2014 - 2023											
	Jan.	Feb.	Mar.	April	Mei	Juni	Juli	Agust.	Sept.	Okt.	Nov.	Des.
2014	142.5	87.6	7.0	112.0	78.0	69.3	33.1	133.5	141.1	466.5	510.7	425.1
2015	60.8	5.5	7.8	269.8	7.7	0.0	83.0	71.0	147.8	198.4	128.7	136.9
2016	301.8	269.7	80.1	49.0	247.7	54.5	80.6	388.9	61.1	354.5	490.9	200.0
2017	325.4	53.4	293.1	45.0	150.3	22.9	5.1	87.4	135.1	26.9	358.5	542.1
2018	240.7	229.6	68.2	120.3	117.3	63.9	56.3	97.5	173.7	343.7	326.6	498.5
2019	143.6	252.4	242.4	141.9	176.0	92.0	130.5	74.3	124.7	466.3	271.6	268.8
2020	8.0	119.9	214.7	333.1	660.9	96.1	202.2	102.4	233.7	196.1	480.1	237.6
2021	620.3	89.0	450.2	227.2	212.9	191.3	393.7	180.6	224.8	338.1	388.3	489.7
2022	395.4	420.2	336.5	69.8	153.0	296.4	154.9	193.9	118.8	405.5	366.0	461.8
2023	603.7	355.9	253.6	59.8	64.5	81.5	111.6	53.7	131.6	199.6	411.9	217.9

Tabel 2. Data Hari Hujan Bulanan (Hari) 2014 – 2023 (BMKG 2024)

Tahun	Hari Hujan (hari) 2014 - 2023											
	Jan.	Feb.	Mar.	April	Mei	Juni	Juli	Agust.	Sept.	Okt.	Nov.	Des.
2014	8	5	4	11	11	10	10	10	15	21	17	20
2015	11	2	2	12	1	0	18	10	14	13	15	11
2016	13	12	5	5	15	6	10	15	14	16	22	20
2017	16	8	10	5	14	7	1	11	14	4	14	15
2018	11	7	4	5	7	7	8	10	10	16	17	11
2019	10	12	12	10	10	10	8	10	10	21	15	11
2020	3	6	9	15	20	10	14	8	13	17	20	14
2021	16	6	17	13	10	17	10	12	9	14	18	16
2022	13	15	21	7	12	11	13	12	10	16	17	16
2023	13	12	7	4	8	8	8	6	17	15	16	19

Tabel 3. Data CH Harian Rata-Rata (mm/hari) 2014 – 2023 (Diolah Dari BMKG 2024)

Tahun	CH Harian Rata-Rata (mm/hari) 2014 - 2023												Max.
	Jan.	Feb.	Mar.	April	Mei	Juni	Juli	Agust.	Sept.	Okt.	Nov.	Des.	
2014	17,81	17,52	1,75	10,18	7,09	6,93	3,31	13,35	9,41	22,21	30,04	21,26	30,04
2015	5,53	2,75	3,90	22,48	7,70	0,00	4,61	7,10	10,56	15,26	8,58	12,45	22,48
2016	23,22	22,48	16,02	9,80	16,51	9,08	8,06	25,93	4,36	22,16	22,31	10,00	25,93
2017	20,34	6,68	29,31	9,00	10,74	3,27	5,10	7,95	9,65	6,73	25,61	36,14	36,14
2018	21,88	32,80	17,05	24,06	16,76	9,13	7,04	9,75	17,37	21,48	19,21	45,32	45,32
2019	14,36	21,03	20,20	14,19	17,60	9,20	16,31	7,43	12,47	22,20	18,11	24,44	24,44
2020	2,67	19,98	23,86	22,21	33,05	9,61	14,44	12,80	17,98	11,54	24,01	16,97	33,05
2021	38,77	14,83	26,48	17,48	21,29	11,25	39,37	15,05	24,98	24,15	21,57	30,61	39,37
2022	30,42	28,01	16,02	9,97	12,75	26,95	11,92	16,16	11,88	25,34	21,53	28,86	30,42
2023	46,44	29,66	36,23	14,95	8,06	10,19	13,95	8,95	7,74	13,31	25,74	11,47	46,44

Tabel 4. Data Suhu Rata-Rata Bulanan (°C) 2014-2023 (Diolah Dari NASA, 2024).

Tahun	Suhu Rata-Rata Bulanan (°) 2014 - 2023											
-------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

	Jan.	Feb.	Mar.	April	Mei	Juni	Juli	Agust.	Sept.	Okt.	Nov.	Des.	Rata-rata
2014	27.51	27.81	28.81	28.47	28.66	28.66	28.15	27.40	27.45	27.40	27.40	27.57	27.94
2015	27.72	27.96	28.72	28.16	28.36	28.41	28.15	27.64	27.50	27.91	27.37	28.01	27.99
2016	28.46	28.48	29.06	29.46	29.28	28.30	28.07	27.90	27.39	27.24	27.26	27.32	28.18
2017	27.35	27.94	28.12	28.31	28.39	28.25	28.08	27.65	27.60	27.75	27.37	27.70	27.88
2018	27.57	28.38	28.56	28.49	28.40	28.38	28.00	27.67	27.37	27.27	27.64	27.68	27.95
2019	28.24	28.57	28.70	28.85	28.83	28.59	28.30	28.10	27.86	27.12	27.60	27.56	28.19
2020	28.15	28.54	28.92	28.71	28.27	28.23	27.94	28.03	27.58	27.43	27.66	27.42	28.08
2021	27.81	28.43	28.49	28.17	28.59	28.18	28.02	27.54	27.73	27.70	27.25	27.76	27.97
2022	27.85	28.15	28.19	28.63	28.77	28.01	28.09	27.82	27.61	27.32	27.21	27.36	27.92
2023	27.69	28.01	28.48	29.04	29.26	28.73	28.45	28.16	28.09	27.69	27.64	28.15	28.28

II. METODE

Kajian ini menggunakan data primer dan sekunder. Data primer mencakup muka air tanah dan konduktivitas hidrolis batuan dari hasil pengujian lapangan. Data sekunder di antaranya kontur topografi, informasi geologi, geomorfologi, aliran Sungai, data curah hujan, dan suhu. Sumber data dapat didapatkan dari studi literatur, laporan kajian terdahulu.

Data curah hujan, hari hujan dan suhu menjadi dasar untuk memahami karakteristik cuaca, menghitung potensi air, dan menyusun neraca air sebagai bagian dari perancangan sistem penyaliran tambang. Data curah hujan dan hari hujan digunakan untuk mengidentifikasi pola dan intensitas hujan yang merupakan sumber utama pengisian (*recharge*) air tanah di daerah studi. Sedangkan data suhu digunakan untuk memperkirakan evapotranspirasi, yaitu kehilangan air dari permukaan tanah dan vegetasi, yang penting dalam menentukan neraca air di wilayah penelitian (Hartini, 2017; NASA, 2024).

Data curah hujan bulanan dan hari hujan masing-masing ditampilkan dalam Tabel 1 dan Tabel 2. Curah hujan harian rata-rata dihitung dari pembagian curah hujan bulanan dengan jumlah hari hujan per bulan, sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Data suhu rata-rata bulanan disajikan pada Tabel 4. Data curah hujan dan hari hujan tahun 2014–2023 dalam kajian ini diperoleh dari Stasiun BMKG Sultan Iskandar Muda di Kabupaten Aceh Besar, yang merupakan stasiun meteorologi terdekat dengan lokasi studi sekitar 20 km (BMKG, 2024). Data stasiun ini dipilih karena letaknya representatif terhadap kondisi geografis daerah studi. Data suhu yang digunakan dalam perhitungan evapotranspirasi adalah suhu rata-rata bulanan pada lokasi Lhoknga yang didapatkan dari situs NASA (2024).

Neraca Air dan Potensi Air Tambang

Perhitungan neraca air dan air tambang merupakan langkah penting dalam pengelolaan sumber daya air di daerah rencana penambangan. Neraca air dihitung dengan mempertimbangkan 4 komponen utama, yaitu air limpasan, air tanah yang masuk ke pit, evapotranspirasi, dan infiltrasi. Air hujan yang turun pada suatu daerah sebagian sebagian besar mengalir di

permukaan di permukaan setelah terjadi penjenjuran terhadap tanah dan batuan akibat infiltrasi air kedalam tanah dan batuan, sementara itu, penguapan air dalam bentuk evapotranspirasi akan mengurangi jumlah potensial air yang mengalir dan yang masuk ke dalam tanah dan batuan. Persamaan neraca air menunjukkan kesetimbangan antara komponen presipitasi air hujan (*P*) dengan air yang menguap melalui evapotranspirasi (*Et*), terinfiltrasi air ke dalam tanah dan batuan (*Inf.*), serta yang melimpas di permukaan (*Runoff*), dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$P = ET + Inf. + Runoff$$

Potensi air yang masuk ke dalam pit merupakan jumlah dari Runoff ditambah dengan potensi air tanah yang masuk ke dalam pit. Untuk menghitung debit air tambang perlu mempertimbangkan potensi dari air air hujan, limpasan, air tanah, serta fenomena evapotranspirasi yang mengurangi jumlah air yang dapat masuk ke dalam Pit.

Presipitasi Air Hujan

Air hujan merupakan komponen utama yang menyumbang air tambang. Presipitasi air hujan dihitung berdasarkan analisis data curah hujan menggunakan metode Gumbel dengan periode ulang 30 tahun. Intensitas hujan rencana dihitung dengan persamaan Mononobe berdasarkan durasi hujan harian 4 jam (Rangkuti, dkk. 2020). Metode Gumbel juga menjadi metode yang diaplikasikan pada banyak penelitian (Cahyadi, dkk. 2020; Cahyadi, dkk. 2024; Minda, 2024; Temtime, 2024; Montes-Pajuelo, dkk. 2024; Zhang & Li, 2024 dan digunakan dalam standar analisis hidrologi untuk perencanaan drainase (SNI 2415:2016). Metode tersebut dipilih karena relevansi dengan iklim karakteristik hujan daerah tropis Metode ini mampu memberikan estimasi hujan rencana yang handal untuk periode ulang sesuai umur tambang. Selain itu, metode Gumbel sederhana untuk diterapkan dengan data yang terbatas, tanpa memerlukan transformasi atau asumsi distribusi yang kompleks (Kumar & Singh, 2024; Krakauer, 2024). Persamaan gumbel dinyatakan dengan rumus berikut:

$$X_t = \bar{X} + K_t . S_d$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

X_t : Curah hujan rencana Gumbel (mm/ hari)

$\bar{X}$: Rata-rata curah hujan harian dari data, misalnya untuk $n = 10$ tahun terakhir (mm/ hari)

K_t : Gradien regresi linier antara data observasi dan *reduced variate*.

S_d : Standar deviasi data curah hujan

$$K_t = (Y_t - \bar{Y}_n) / S_n$$

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum (Y_n - \bar{Y}_n)^2}{n - 1}}$$

Y_t : Nilai *reduced variate* yang dihitung dari periode ulang tertentu, misalnya selama umur tambang (*tahun*)

$\bar{Y}_n$: Rata-rata dari *reduced variate* gumbel

S_n : Standar deviasi *reduced variate* gumbel

$$Y_t = -\ln \left(-\ln \left(\frac{(T - 1)}{T} \right) \right)$$

$$Y_n = -\ln \left(-\ln \left(\frac{(n + 1) - m}{(n + 1)} \right) \right)$$

$\ln$: logaritma natural

T : Periode ulang hujan

n : jumlah data

m : urutan data

Selain curah hujan rencana, resiko hidrologi berdasarkan perhitungan curah hujan rencana gumbel perlu diperhitungkan terkait dengan. Resiko hidrologi merupakan kemungkinan suatu kejadian hujan dengan intensitas tertentu akan terjadi minimal satu kali pada periode ulang hujan. Penentuan resiko hidrologi dihitung berdasarkan pada periode ulang hujan dan umur tambang dilakukan dengan menyesuaikan data dan keperluan desain yang berkaitan dengan umur tambang serta tetap memperhitungkan risiko hidrologi (Sosrodarsono, 1983).

$$P_t = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{T_{LoM}}$$

P_t : Resiko / Peruang hidrologi (kemungkinan suatu kejadian akan terjadi minimal satu kali pada periode ulang tertentu).

T : Periode ulang (dalam rancangan ini digunakan periode ulang tahun).

T_{LoM} : Umur tambang (*tahun*).

Sementara itu, dalam untuk perhitungan presipitasi dan limpasan secara rasional diperlukan parameter intensitas hujan (I , mm/jam). Intensitas hujan dapat dihitung dari curah hujan harian rencana gumbel menggunakan persamaan Mononobe sebagai berikut:

$$I = \frac{R_{24}}{24} \cdot \left(\frac{24}{t} \right)^{\frac{2}{3}}$$

I : Intensitas hujan (mm/jam)

R_{24} : Curah hujan selama 24 jam (curah hujan harian rencana gumbel)

t : Jam hujan harian rata-rata.

Evapotranspirasi (ET)

Kehilangan air akibat evapotranspirasi dihitung berdasarkan kondisi iklim setempat. Nilai evapotranspirasi dihitung dengan metode Thornthwaite (1948) yang memanfaatkan suhu bulanan rata-rata. Koreksi terhadap nilai evapotranspirasi dilakukan berdasarkan faktor lintang geografis daerah penelitian (5° LU). Suhu berkontribusi terhadap peningkatan evapotranspirasi, yaitu gabungan proses penguapan dan transpirasi. Dalam kajian ini, metode Thornthwaite digunakan untuk menghitung evapotranspirasi potensial (ET) berdasarkan suhu bulanan rata-rata dan koreksi berdasarkan lintang geografis. Hasil perhitungan evapotranspirasi menjadi komponen penting dalam menentukan neraca air di lokasi penelitian.

Metode perhitungan estimasi evapotranspirasi potensial menggunakan indeks panas bulanan adalah rumus Thornthwaite (1948). Rumus Thornthwaite adalah metode empiris yang digunakan untuk menghitung evapotranspirasi potensial berdasarkan suhu rata-rata bulanan (Hartini, 2017), tanpa memerlukan data meteorologi yang lebih kompleks seperti radiasi atau kecepatan angin.

Evapotranspiration (ET):

$$ET = 1.62 \left(\frac{10 \cdot T_m}{I} \right)^a$$

Annual Heat Index (I)

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1.514}$$

Keterangan :

ET = evapotranspirasi potensial bulanan

I = indeks panas tahunan

T_m = suhu rerata pada bulan ke m

a = konstanta

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 179 \times 10^{-4} I + 0,492$$

Perhitungan evapotranspirasi Thornthwaite (1948) dihitung berdasarkan hubungan antara suhu rata-rata bulanan. Potensi evapotranspirasi disesuaikan dengan perhitungan 1 bulan mencakup 30 hari dan dalam 1 hari terjadi 12 jam kemungkinan waktu penyinaran.

Lokasi perhitungan awal rumus Thornthwaite dilakukan pada lokasi iklim sedang, sehingga pada perhitungan di lokasi tropis seperti pada daerah penelitian perlu adanya koreksi lintang. Daerah penelitian berdekatan dengan kedudukan lintang 5° Lintang Utara (LU). Posisi tersebut ditentukan sebagai parameter faktor koreksi dalam perhitungan evapotranspirasi (Tabel 5).

Tabel 5. Faktor koreksi evapotranspirasi bulanan untuk kedudukan 5° LU (Thornthwaite, 1948)

Bulan	Factor Koreksi Kedudukan 5° LU
Januari	1,02
Februari	0,93
Maret	1,03
April	1,02
Mei	1,06
Juni	1,03
Juli	1,06
Agustus	1,05
September	1,01
Oktober	1,03
November	0,99
Desember	1,02

Infiltrasi (*Inf.*)

Infiltrasi air ke dalam tanah dihitung dengan memperhatikan jenis tanah, kemiringan lahan, tingkat saturasi tanah, serta curah hujan. Estimasi nilai infiltrasi dilakukan berdasarkan konduktivitas hidrolik dari uji konduktivitas hidrolik di lapangan. Perhitungan potensi infiltrasi air hujan kedalam tanah dan batuan dilakukan dengan pendekatan bahwa air hujan sebagian akan meresap ke dalam tanah dengan kecepatan tertentu berdasarkan karakteristik hidrolik material. Suplai air tanah kedalam pit dikontrol oleh nilai konduktivitas batuan yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai konduktivitas hidrolik permukaan. Oleh karena itu, perhitungan estimasi potensi infiltrasi dihitung menggunakan nilai konduktivitas hidrolik (*K*) batuan. Potensi infiltrasi (*Inf.*, m³/s) dihitung dengan mengalikan luas daerah dengan nilai konduktivitas hidrolik. Untuk menghitung infiltrasi harian (m³/hari) waktu infiltrasi harian akibat hujan disesuaikan dengan jam hujan harian selama 4 jam per hari.

$$Inf. = K A$$

Debit Air Limpasan (*Runoff*)

Air limpasan dihitung berdasarkan luas daerah tangkapan hujan, intensitas curah hujan, dihitung dengan rumus rasional yang sesuai dengan kondisi neraca air daerah penelitian. Besarnya debit limpasan dipengaruhi oleh luas daerah tangkapan, intensitas hujan, dan karakteristik permukaan tanah. Air hujan yang masuk ke dalam pit dihitung sebagai air limpasan permukaan dengan menggunakan rumus rasional. Rumus ini memperhitungkan debit limpasan (*Q*)

berdasarkan luas daerah tangkapan (*A*), intensitas hujan (*I*), dan koefisien limpasan (*C*).

$$Q = 0,278 C I A$$

Air Tanah Yang Masuk Kedalam Pit

Selain dari air hujan, sumber air tanah tambang juga berasal dari air tanah. volume air tanah yang masuk ke dalam pit tambang dihitung dengan mempertimbangkan kondisi hidrogeologi daerah tersebut, termasuk parameter akuifer seperti konduktivitas hidrolik, gradien hidrolik, dan luas area kontak antara akuifer dengan pit (Darcy, 1856). Perhitungan air tanah yang dilakukan merupakan analisis debit potensial pada lokasi daerah tambang. Pendekatan empiris dilakukan untuk daerah penelitian menggunakan persamaan Darcy berikut:

$$Q = K \cdot i \cdot A$$

dan

$$A = b \cdot L$$

Keterangan :

- Q* = Debit Potensial (m³/detik)
- K* = Konduktivitas Hidrolik Material (m/detik)
- i* = Gradien Hidrolik,
- A* = Luas Penampang Aliran (m²)
- b* = Tebal Material (m)
- L* = Panjang Lintasan (m)

Material di daerah penelitian termasuk dalam golongan akuitard (Domenico & Schwartz, 1990). Hasil pemboran dan logging geoteknik menunjukkan bahwa nilai konduktivitas hidrolik (*K*) material dari batuan dikontrol oleh struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian berupa bidang-bidang diskontinyu berupa rekahan yang saling berpotongan, dan diduga terdapat struktur sesar setempat pada daerah penelitian. Berdasarkan hasil uji slug test yang dilakukan pada 12 titik bor menggunakan metode Bouwer & Rice (1976) diperoleh hasil rata-rata nilai *K* material batuan di bawah permukaan adalah sebesar 2,608×10⁻⁷ m/s. Berdasarkan pada data pengukuran muka air tanah, gradien hidrolik di daerah penelitian berkisar antara 1° - 5° atau berkisar antara 1,75% - 8,75%. Ketika penambangan dilakukan, material pada bagian bagian kaki (*toe*) terbawah dari lereng bukaan tambang terekspos dalam kondisi jenuh (*b*) adalah 5 m.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Neraca Air

Perhitungan neraca air mempertimbangkan berbagai komponen, mencakup potensi volume air hujan, volume evapotranspirasi, potensi infiltrasi, debit air limpasan, untuk luasan daerah 1 km².

• Presipitasi Air Hujan

Berdasarkan data hujan (BMKG 2024) rata-rata hujan di daerah penelitian terjadi selama 4 jam per hari dan rata-rata hujan perbulan adalah 11 hari. Nilai ini

merupakan parameter yang digunakan untuk menghitung hujan harian, terjadi 4 jam dalam sehari (Rangkuti, dkk. 2020).

Rata-rata curah hujan harian maksimum berdasarkan data curah hujantahun 2014-2023 (Tabel 3) adalah 33,36 mm/hari. Rata-rata curah hujan tersebut digunakan ke dalam perhitungan standar deviasi. n merupakan jumlah pengamatan dalam satu tahun, dengan nilai tetap 10 di setiap tahun. Kemudian, m adalah ranking atau urutan nilai curah hujan berdasarkan besarnya (1 untuk tertinggi, 10 untuk terendah). Standar deviasi dari data rata-rata curah hujan maksimal selama 10 tahun $Sd = 8,37$. Rata-rata *reduced variate* gumbel $Yn = 0,50$, dan standar deviasi dari *reduced variate* gumbel $Sn = 1,00$.

Tabel 6 menunjukkan hasil perhitungan intensitas hujan menggunakan rumus Mononobe untuk beberapa variasi Periode Ulang Hujan (PUH). Sebagai contoh, untuk PUH sebesar 30 Tahun, nilai curah hujan rencana yang didapatkan setelah perhitungan adalah sebesar 57,50 mm/hari. Intensitas hujan dengan jam hujan selama 4 jam berdasarkan rumus mononobe adalah sebesar 7,91 mm/jam dengan resiko hidrologi adalah sebesar 63,83% (Tabel 7).

Hubungan antara intensitas hujan dan PUH pada lokasi studi. Dapat dilihat bahwa semakin besar nilai periode ulang hujan yang digunakan, maka akan semakin besar pula nilai intensitas hujannya. Hal ini dikarenakan intensitas hujan berbanding lurus dengan curah hujan rencana yang didapatkan. Curah hujan rencana yang didapatkan dipengaruhi oleh periode ulang hujan yang diambil, dalam hal ini adalah umur tambang 30 Tahun

Tabel 6. Perhitungan Curah Hujan Harian dengan Metode Distribusi Gumbel

Tahun	Curah Hujan Harian X (mm/hari)	$\bar{X}$	$(X - \bar{X})^2$	Sd	n	m	Yn	$\bar{Yn}$	$(Yn - \bar{Yn})^2$	Sn
2014	30,04	33,36	11,02	8,37	10	7	-0,01	0,50	0,26	1,00
2015	22,48		118,33			10	-0,87		1,88	
2016	25,93		55,28			8	-0,26		0,57	
2017	36,14		7,72			4	0,79		0,09	
2018	45,32		142,96			2	1,61		1,23	
2019	24,44		79,66			9	-0,53		1,06	
2020	33,05		0,10			5	0,50		0,00	
2021	39,37		36,10			3	1,14		0,42	
2022	30,42		8,68			6	0,24		0,07	
2023	46,44		171,01			1	2,35		3,44	

Tabel 7 perhitungan Curah Hujan Rencana, Intensitas Hujan dan Resiko Hidrologi

Curah Hujan Rata-rata (mm/day)						33.36
Umur Tambang (Tahun)						30
Jam Hujan (jam)						4
PUH	Yr	K	CH Rencana Harian Gumbel (Xt, mm/days)	Intensitas Hujan Mononobe (mm/jam)	Resiko Hidrologi (%)	
2	0.37	-0.13	32.29	4.44	100.00	
5	1.50	1.00	41.76	5.74	99.88	
10	2.25	1.75	48.03	6.61	95.76	
20	2.97	2.47	54.04	7.44	78.54	
25	3.20	2.70	55.95	7.70	70.61	
30	3.38	2.88	57.50	7.91	63.83	
40	3.68	3.17	59.94	8.25	53.21	
50	3.90	3.40	61.83	8.51	45.45	
100	4.60	4.10	67.66	9.31	26.03	

Tabel 8. Perhitungan evapotranspirasi potensial rata-rata

Bulan	Suhu (°C)	I	ET bulanan (cm)	Faktor koreksi Lintang	ET bulanan koreksi (cm)
Januari	27,84	13,46	16,05	1,02	16,37
Februari	28,23	13,74	17,04	0,93	15,84
Maret	28,61	14,03	18,04	1,03	18,59
April	28,62	14,03	18,07	1,02	18,43
Mei	28,68	14,08	18,23	1,06	19,33
Juni	28,37	13,85	17,40	1,03	17,92
Juli	28,12	13,66	16,75	1,06	17,76
Agustus	27,79	13,42	15,92	1,05	16,72
September	27,62	13,30	15,51	1,01	15,67
Oktober	27,48	13,20	15,18	1,03	15,63
November	27,45	13,17	15,10	0,99	14,95
Desember	27,66	13,33	15,61	1,02	15,92
Total		163,27	198,91		203,13
Rata-rata		13,61	16,58		16,93

Tabel 9. Volume evapotranspirasi harian untuk luas daerah tangkapan hujan 1 km²

Luas (km ²)	Luas (m ²)	ET koreksi (m/bulan)	Vol. ET Harian (m ³ /hari)
1,00	1.000.000,00	0,1693	5.642,50

- Evapotransporasi

Perhitungan menunjukkan nilai *ET* bulan Januari sampai dengan desember berada pada rentang 15,51 sampai 18,23 cm per bulan, dengan rata-rata sebesar 16,58 cm per bulan. Nilai evapotranspirasi bulanan (*ET*) yang didapatkan dikalikan dengan faktor koreksi lintang yang ada pada Tabel 5 untuk memperoleh nilai *ET* koreksi. Tabel 8 menunjukkan hasil perhitungan hingga diperoleh nilai evapotranspirasi bulanan (*ET*) koreksi sebesar 16,93 cm. Nilai tersebut dapat diubah menjadi meter per hari (1 bulan 30 hari) untuk memperoleh nilai evapotranspirasi harian (*Eth*). Evapotranspirasi harian adalah sebesar 0,564 cm/hari atau sama dengan 5.642,50 m/hari (Tabel 9). Volume evapotranspirasi per hari (m³/hari) dihitung dengan mengalikan potensi evapotranspirasi harian (*ET*) terhadap luas daerah tangkapan hujan (*A*) 1 km², sehingga diperoleh jumlah volume yang menunjukkan banyaknya air yang terevapotranspirasi dalam satu hari. Berdasarkan perhitungan, volume evapotranspirasi harian yang terjadi adalah sebesar 5.642,50 m³/hari tiap 1 km².

- Infiltrasi

Perhitungan potensi infiltrasi air hujan kedalam tanah dan batuan dilakukan dengan pendekatan bahwa air hujan sebagian akan meresap ke dalam tanah dengan kecepatan tertentu berdasarkan karakteristik hidrolik material. Berdasarkan hasil pengukuran infiltrasi permukaan pada material soil diperoleh nilai rata-rata konduktivitas hidrolik sebesar $2,330 \times 10^{-3}$ m/s

sedangkan nilai rata-rata konduktivitas hidrolik material batuan adalah sebesar $2,608 \times 10^{-7}$ m/s. Suplai air tanah kedalam pit lebih dikontrol oleh nilai konduktivitas batuan yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai konduktivitas hidrolik permukaan. Oleh karena itu, perhitungan estimasi potensi infiltrasi dihitung menggunakan nilai konduktivitas hidrolik (*K*) sebesar $2,608 \times 10^{-7}$ m/s. Potensi infiltrasi dihitung dengan mengalikan luas 1 km² dengan nilai konduktivitas hidrolik dengan waktu pengisian (hujan) selama 4 jam hujan. Volume infiltrasi air harian maksimal ke dalam batuan adalah sebesar 3.755,52 m³/hari.

- Air Limpasan

Kondisi neraca air di daerah penelitian dapat ditunjukkan sebagai rasio dari parameter-parameter air hujan (*P*), evapotranspirasi (*ET*), infiltrasi (*Inf*), dan air yang melimpas (*Runoff*) di daerah tangkapan hujan. Tabel 10 menunjukkan neraca air dan rasio antar parameter neraca air daerah penelitian. Air hujan harian untuk tiap luasan daerah 1 km² adalah sebesar 31.669,85 m³/hari (rasio 100%). Rasio air limpasan terhadap total air hujan harian diperoleh dengan mengurangi rasio volume air hujan 100% dengan rasio volume evapotranspirasi harian sebesar 5.642,50 m³/hari (17,871%); dan debit infiltrasi harian sebesar 3.755,52 m³/hari (11,858%). Berdasarkan proporsi tersebut, nilai rasio air limpasan harian sebesar 70,325%. Proporsi tersebut digunakan dalam perhitungan debit limpasan rasional sebagai koefisien

limpasan (C), sehingga debit air limpasan adalah sebesar 31.669,85 m³/hari.

Tabel 10. Neraca air daerah penelitian

Parameter	Nilai Volume Harian / Debit*	Rasio
Presipitasi Hujan (P , m ³ /hari)	31.669,85	100%
Evapotranspirasi (ET , m ³ /hari)	5.642,50	17,871%
Infiltrasi ($Inf.$, m ³ /hari)	3.755,52	11,858%
Air Limpasan ($Runoff$, m ³ /hari)	22.271,82	70,325%

*Dihitung dengan luas daerah tangkapan hujan 1 km²

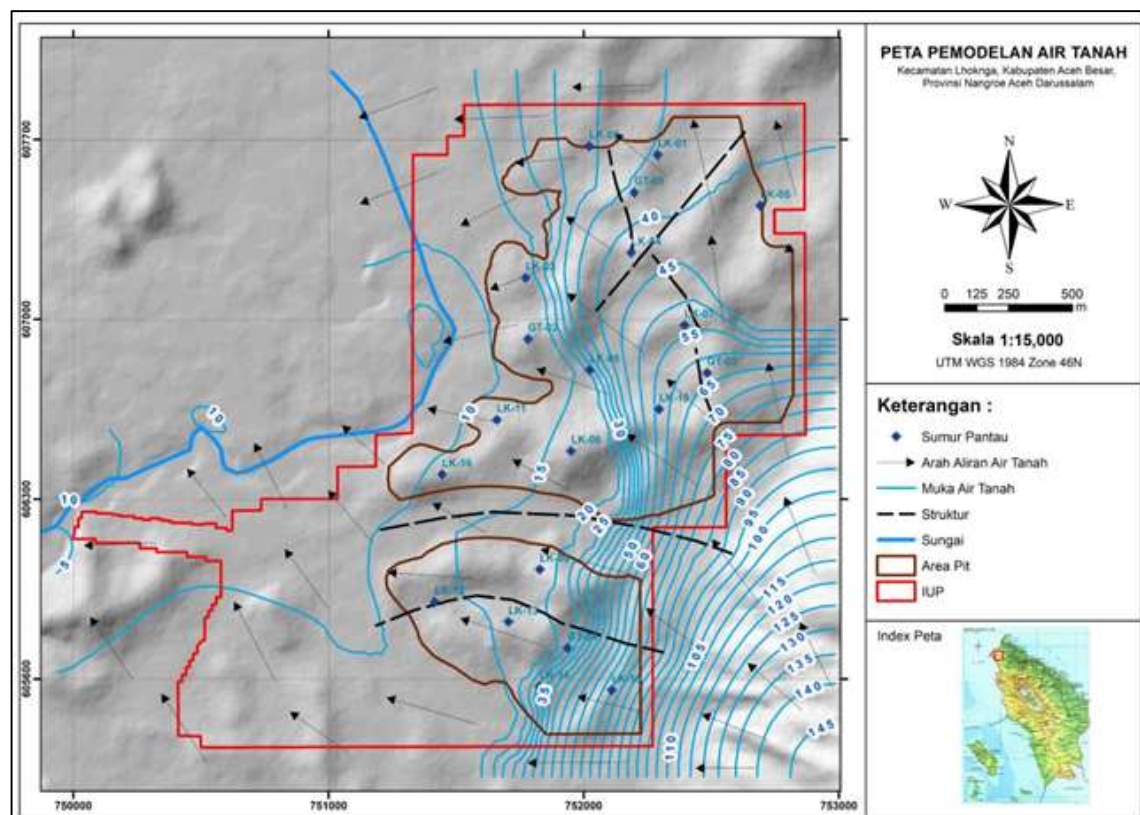
Air Tanah Yang Masuk Kedalam Pit

Potensi air tanah yang masuk ke dalam pit dihitung menggunakan berdasarkan Hukum Darcy. Nilai konduktivitas hidrolik (K) rata-rata dari hasil pengujian slugtest sebesar $2,608 \times 10^{-7}$ m/s. Gambar 3 menunjukkan peta iso-muka air tanah yang memuat vektor aliran air tanah daerah penelitian. Variasi gradien hidrolik (i) di daerah penelitian berkisar 1°-5°

(1,75%-8,75%) dengan arah aliran umum mengarah dari timur ke barat.

Perhitungan potensi aliran air tanah yang masuk kedalam pit ketika penambangan dilakukan berdasarkan pada kondisi rembesan air terjadi pada material bagian terbawah dari lereng (*toe*) bukaan tambang terekspos dalam kondisi jenuh (b) adalah 5 m. Sehingga luas penampang aliran (A) dapat dihitung berdasarkan dari lebar lereng yang terbuka. Tabel 11 menunjukkan hasil perhitungan potensi aliran air tanah untuk Pit bagian Utara (Pit A) dan Pit bagian Selatan (Pit B).

Potensi aliran air tanah pada daerah penelitian untuk lebar bukaan tambang (L) Pit bagian Utara (Pit A) adalah sekitar 2.000 m (2 km), potensi air tanah rata-rata sebesar 1.181,64 m³/hari. Lebar bukaan tambang (L) Pit bagian Utara (Pit A) adalah sekitar 1.500 meter (1,5 km), estimasi potensi aliran air tanah untuk Pit bagian Selatan (Pit B) adalah sebesar 886,22 m³/hari. Secara umum, potensi air tanah untuk lebar bukaan tambang 1 km adalah sebesar 590,82 m³/hari.



Gambar 3. Peta iso- muka air tanah yang memuat vektor aliran air tanah daerah penelitian

Tabel 11. Estimasi potensi aliran air tanah yang masuk ke dalam pit

K Average	Gradien hidrolik - i		Luas Penampang Aliran - A* (m2)	Q = K*i*A				Keterangan
	(°)	(%)		(m³/s)	m³/hari (24 jam)	m3/bulan (30 hari)	m³/tahun (360 hari)	
2,608×10 ⁻⁷	1	1.75	10000	4,553×10 ⁻³	3,934×10 ²	1,180×10 ⁴	1,420×10 ⁵	Pit bagian Utara . Berlaku untuk tiap tebal 5 m material jenuh yang terekspos. Lebar bukaan (L) tambang 2000m
	2	3.49		9,108×10 ⁻³	7,870×10 ²	2,361×10 ⁴	2,831×10 ⁵	
	3	5.24		1,367×10 ⁻²	1,181×10 ³	3,543×10 ⁴	4,251×10 ⁵	
	4	6.99		1,824×10 ⁻²	1,576×10 ³	4,728×10 ⁴	5,670×10 ⁵	
	5	8.75		2,282×10 ⁻²	1,972×10 ³	5,915×10 ⁴	7,098×10 ⁵	
Rata-Rata			1.368×10 ⁻²	1.182×10 ³	3.545×10 ⁴	4.254×10 ⁵		
2,608×10 ⁻⁷	1	1.75	7500	3.423×10 ⁻³	2.957×10 ²	8.872×10 ³	1.065×10 ⁵	Pit bagian Selatan . Berlaku untuk tiap tebal 5 m material jenuh yang terekspos. Lebar bukaan (L) tambang 1500m
	2	3.49		6.826×10 ⁻³	5.898×10 ²	1.769×10 ⁴	2.123×10 ⁵	
	3	5.24		1.025×10 ⁻²	8.856×10 ²	2.657×10 ⁴	3.188×10 ⁵	
	4	6.99		1.367×10 ⁻²	1.181×10 ³	3.544×10 ⁴	4.253×10 ⁵	
	5	8.75		1.712×10 ⁻²	1.479×10 ³	4.436×10 ⁴	5.323×10 ⁵	
Rata-Rata			1.026×10 ⁻²	8.862*×10 ²	2.659×10 ⁴	3.190×10 ⁵		

Potensi Air Tambang

Potensi air tambang dihitung berdasarkan pada akumulasi dari air limpasan (*Runoff*) dan suplai air tanah yang keluar dari lereng bukaan pit. Potensi air limpasan merupakan bagian dari air hujan jatuh dipermukaan tanah, batuan, dan vegetasi yang tidak sempat menguap (*evapotranspirasi*) dan tidak bisa meresap kedalam tanah sehingga melimpas di permukaan. Perhitungan hujan bulanan dihitung berdasarkan rata-rata hari hujan yang terjadi perbulan adalah 11 hari.

Potensi air tanah yang masuk ke dalam tambang berasal dari rembesan air tanah dari dalam batuan yang terekspos ketika penambangan dilakukan; secara kontinyu selama 24 jam perhari. Perhitungan suplai air tanah bulanan dihitung dengan ketentuan 30 hari perbulan. Sementara itu, perhitungan potensi tahunan dihitung selama 12 bulan. Tabel 12 menunjukkan nilai hasil perhitungan potensi air tambang harian, bulanan dan tahunan; mencakup komponen air limpasan dan suplai air tanah untuk Pit Bagian Utara (Pit A) dengan lebar bukaan tambang 2 km, dan Pit Bagian Selatan (Pit B) dengan lebar bukaan tambang 1,5 km.

Tabel 12. Nilai potensi air tambang

Komponen Potensi Air Tambang	Debit / Volume Perhari (m ³ /hari)	Debit / Volume Perbulan (m ³ /bulan)	Debit / Volume Tahunan (m ³ /tahun)
Air Limpasan**	22.271,82	244.990,02	267.261,84
Air PitA	1.181,64	35.449,104	425.389,25
Tanah** Pit B	886,22	26.586,83	319.041,94

Keterangan:

* Dihitung tiap 1 km² Daerah Tangkapan Hujan

- jam hujan 4 jam hujan per hari;

- hari hujan 11 hari perbulan

** Suplai air tanah terjadi 24 jam / hari

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan kajian neraca air pada daerah penelitian diketahui rasio $P : Et : Inf : Runoff$ adalah = 100% : 17,871% : 11,858% : 70,325%. Untuk tiap 1 km² daerah tangkapan hujan, potensi air dari hujan sebesar 31.669,85 m³/hari; volume evapotranspirasi harian sebesar 5.642,50 m³/hari (17,871%) dengan lama waktu penyinaran harian 12 jam; dan debit infiltrasi harian sebesar 3.755,52 m³/hari; dan debit air limpasan adalah sebesar 31.669,85 m³/hari. Potensi suplai air tanah pada rencana Pit bagian Utara (Pit A) dengan lebar bukaan tambang 2 km adalah sebesar 1.181,64 m³/hari; sedangkan untuk rencana Pit bagian Selatan (Pit B) dengan lebar bukaan tambang 1,5 km adalah sebesar 886,22 m³/hari. Secara umum suplai air tanah adalah sebesar 590,82 m³/hari untuk lebar bukaan tambang 1 km, dengan arah aliran air tanah dari timur menuju ke arah barat.

Untuk daerah tangkapan hujan dengan luas yang berbeda selama proses penambangan berlangsung, potensi air tambang dapat dihitung dengan nilai luas daerah tangkapan hujan yang sesuai dengan kondisi lapangan. Sedangkan suplai air tanah untuk ukuran lebar bukaan pit yang berbeda maka dapat mengalikan dengan lebar bukaan tambang yang aktual selama proses penambangan berjalan.

Perhitungan potensi air tambang pada kajian ini dilakukan berdasarkan data yang tersedia pada saat kajian ini dibuat. Ketidaksesuaian hasil perhitungan potensi air tambang pada kajian ini dapat terjadi akibat adanya perbedaan kondisi hujan aktual; perubahan pola hujan dan jam hujan; suhu, lama penyinaran actual dan faktor klimatologi lain yang tidak dipertimbangkan dalam kajian ini. Pada saat penambangan dilakukan, perlu dilakukan pengukuran

debit air tambang secara aktual untuk melakukan validasi terhadap hasil kajian ini, sehingga dapat dilakukan perbaikan dan penyesuaian terhadap parameter analisis yang digunakan. Dalam kajian ini, terdapat keterbatasan dalam kajian terkait variabilitas iklim. Untuk kajian lanjutan, disarankan untuk memodelkan skenario perubahan iklim. Validasi dan integrasi faktor iklim yang lebih dinamis diperlukan untuk akurasi prediksi jangka panjang. Skenario perubahan pola hujan dan suhu perlu diintegrasikan dalam analisis lanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Dr. rer. nat. Ir. Arifudin Idrus, ST., MT., IPU yang telah memfasilitasi kegiatan pengambilan lapangan; KBK PSDA Teknik Pertambangan UPN “Veteran” Yogyakarta untuk dukungan yang diberikan dalam proses pengolahan data dan analisis; dan LPPM UPN “Veteran” Yogyakarta dalam memfasilitasi program kegiatan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2024). *Data curah hujan, hari hujan, dan suhu bulanan Stasiun Sultan Iskandar Muda, Aceh Besar (2014–2023)*
- Bouwer, H., Rice, R. C. (1976). A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, vol. 12, no. 3, pp. 423–428.
- Cahyadi, T. A., Basuki, F. N., Titisariwati, I., Rosadi, P.E., Riyadi, F. A., Eko, H.; Quantification of open channel flow in open pit mining with Nakayasu method. *AIP Conf. Proc.* 6 September 2024; 3019 (1): 060005. <https://doi.org/10.1063/5.0225763>
- Cahyadi, T. A., Dinata, D. C., Haryanto, D., Hartono, T., Titisariwati, I., & Fahlevi, R. (2020). Evaluasi saluran terbuka dengan menggunakan distribusi Gumbel dan model Thomas Fiering. *Kurvatek*, 5(1), 29–36. <https://doi.org/10.33579/krvtek.v5i1.1570>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hydrogeology of Groundwater Resources*. Springer.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Victor Dalmont.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1990). *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2024). *Ground Water Monitoring Requirements for Hazardous Waste Treatment, Storage and Disposal Facilities*. United States Environmental Protection Agency <https://www.epa.gov/hwpermitting/ground-water-monitoring-requirements-hazardous-waste-treatment-storage-and-disposal>. Diakses 5 Mei 2025
- Gumbel, E. J. (1958). *Statistics of extremes*. Columbia University Press.
- Hartini, E. (2017). *Hidrologi & hidrolika terapan*. Universitas Dian Nuswantoro. Semarang.
- Ikyapa, P., & Abah, R. C. (2024). Flood frequency analysis based on Gumbel's distribution method: A case study of the Benue River. *Nigerian Association of Hydrological Sciences Journal*, 10(12), 15–22. https://nahs.org.ng/wp-content/uploads/journal/published_paper/volume-10/issue-12/kxEFUJHE.pdf
- Jain, V., Dhingra, A., Gupta, E. et al. Influence of Land Surface Temperature and Rainfall on Surface Water Change: An Innovative Machine Learning Approach. *Water Resour Manage* 37, 3013–3035 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03476-2>
- Kalyanapu, A., Owusu, C., Wright, T., & Datta, T. (2023). Low-cost real-time water level monitoring network for Falling Water River watershed: A case study. *Geosciences*, 13(3), 65. <https://doi.org/10.3390/geosciences13030065>.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2018). *Keputusan Menteri ESDM No. 1827/K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Teknis Penambangan yang Baik*. <https://jdih.esdm.go.id>
- Krakauer, N. Y. (2024). Extending the blended generalized extreme value distribution. *arXiv preprint*, arXiv:2407.06875. <https://arxiv.org/pdf/2407.06875>
- Kumar, S., & Singh, R. (2024). Three-parameters Gumbel distribution. *International Journal of Sustainable Development*, 10(2), 45–52. <https://doi.org/10.11648/j.ijds.20241002.12>
- Minda, C. B. (2024). Flood frequency analysis with Gumbel's extreme value distribution. *Qeios*. <https://www.qeios.com/read/0F56EB.2>
- Montes-Pajuelo, R., Rodríguez-Pérez, Á. M., López, R., & Rodríguez, C. A. (2024). Analysis of Probability Distributions for Modelling Extreme Rainfall Events and Detecting Climate Change: Insights from Mathematical and Statistical Methods. *Mathematics*, 12(7), 1093. <https://doi.org/10.3390/math12071093>
- NASA. (2024). *Daily surface meteorological data for Lhoknga, Aceh (2014–2023)* [Data set]. Diakses dari <https://power.larc.nasa.gov>
- NASA. (2024). *Daily surface meteorological data for Lhoknga, Aceh (2014–2023)* Power: Prediction Of Worldwide Energy Resources. <https://power.larc.nasa.gov/>. Diakses November 2024.
- Natawidjaja, D. H. (2018). Neotectonics of the Sumatran Fault And Paleogeodesy of the Sumatran Subduction Zone. https://earthjay.com/earthquakes/20220225_sumatra/natawidjaja_2002_neotectonics.pdf
- Patel, K., Singh, R., & Zhao, L. (2023). A hybrid machine learning-Gumbel model for predicting extreme temperature events. *Climate Dynamics*,

- 60(2), 345–360. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06756-0>
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup
- Pusat Kajian LKFT Universitas Gadjah Mada (LKFT UGM). (2024). *Laporan Eksplorasi Studi Quarry Siltstone Land Expansion di Daerah Nusa dan Sekitarnya, Kecamatan Lhoknga, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh. Pusat Kajian LKFT Universitas Gadjah Mada.*
- Ernawati, R., Bubala, H., Cahyadi, T.A Bargawa, W.S. Nurkhamim (2020). The management and control of water overflows from the settling ponds to coastal waters in PT. X. *AIP Conf. Proc.* 8 July 2020; 2245 (1): 070027. <https://doi.org/10.1063/5.0007250>
- Riyadi, F.A., Cahyadi, T. A., (2025). Surface Water and Mine Drainage System Management for Open Pit Gold Mine in Central Java, Indonesia. *Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1486 012032. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1486/1/012032/meta>
- Riyadi, F.A., Cahyadi, T. A., Nurkhamim, & Supandi. (2019). Desain Saluran Terbuka Berbasis Microsoft Excel: Perhitungan Dan Pemodelan Yang Praktis Dan Effisien. *KURVATEK*, 4(2), 61–78. <https://doi.org/10.33579/krvt.v4i2.1563>
- Riyadi, F. A., (2013). Geologi Dan Kajian Kestabilan Lereng Dengan Kontrol Muka Air Tanah Pada Lereng High Wall Pit Batu Laki Utara, Kecamatan Satui, Kabupaten Tanah Bumbu, Provinsi Kalimantan Selatan. Studi Kasus Upaya Stabilisasi Lereng Dengan Pelandaian Lereng Dan Dewatering. Skripsi. Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta
- Riyadi, F. A., (2019). Studi Hidrogeologi Untuk Penanggulangan Aliran Air Di Dalam Material Penyusun Alas Saluran. Tesis. Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta
- Sieh, K., and D. Natawidjaja (2000), Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia, *J. Geophys. Res.*, 105(B12), 28295–28326, <https://doi.org/10.1029/2000JB900120>
- SNI 2415:2016. (2016). Analisis hidrologi untuk perencanaan drainase perkotaan. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 7752 : 2012. (2021). Tata Cara Pengukuran Laju Infiltrasi Tanah di Lapangan Menggunakan Infiltrometer Cincin Ganda. Badan Standardisasi Nasional.
- Soetrisno, S. (1993). Studi aliran air tanah pada zona rekahan batuan di daerah vulkanik (Tesis Magister, Universitas Gadjah Mada).
- Temtime, G. S. (2024). Flood frequency analysis using Gumbel distribution method: A case of Robigumero River, Abay Basin, Ethiopia. *Hydrology*, 12(1), 1–7. <https://doi.org/10.11648/j.hyd.20241201.11>
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Pasa , T.I., Rosadi, P.A., Cahyadi, T.A., Riyadi, F.A. Firmansyah, I. Evaluasi Mine Dewatering System pada Penambangan Batubara Pit A2 PT Multi Harapan Utama, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timu. <https://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/jtp/article/view/14553>
- Zhang, Y., & Li, X. (2024). Revisiting the use of the Gumbel distribution: A comprehensive statistical analysis regarding modeling extremes and rare events. *Mathematics*, 12(16), 2466. <https://doi.org/10.3390/math12162466>