

PENDEKATAN KUANTITATIF DALAM PENENTUAN DEBIT AIR MINE INFLOW PADA TAMBANG TERBUKA

A QUANTITATIVE APPROACH FOR ESTIMATING MINE INFLOW IN OPEN PIT MINES

Desta Nugraha Ardinanta^{1,*}, Tedy Agung Cahyadi², Peter Eka Rosadi³, Wawong Dwi Ratminah⁴,
Gunawan Nusanto⁵, Erwin Septianto⁶

^{1,2,3,4,5}Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas
Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Indonesia

*Email corresponding: destanugrahaardinanta@gmail.com

Email : tedyagungc@upnyk.ac.id

Email : peterekarosadi@upnyk.ac.id

Email : wawong.dr@upnyk.ac.id

Email : ingkoen@yahoo.com

⁶PT Adidaya Alam Borneo, Subten Engineering, Kalimantan Selatan, Indonesia

Email: erwin.septianto95@gmail.com

[Cara sitasi]: D. N. Ardinanta, T. A. Cahyadi, P. E. Rosadi, W. D. Ratminah, G. Nusanto, dan E. Septianto, "Pendekatan Kuantitatif dalam Penentuan Debit Air Mine Inflow Pada Tambang Terbuka," *Kurvatek*, vol. 10, no. 2, pp. 137-144, 2025. doi: 10.33579/krvtk.v10i2.5789 [Online].

Abstrak — Limpahan air ke tambang terbuka menjadi tantangan utama dalam operasional pertambangan karena dapat menyebabkan gangguan teknis dan peningkatan biaya. Studi ini bertujuan mengestimasi total debit air masuk ke area tambang (*mine inflow*) melalui dua pendekatan yaitu, Metode Rasional untuk menghitung limpasan permukaan dan Hukum Darcy untuk memperkirakan rembesan air tanah. Data yang digunakan meliputi curah hujan maksimum, luas daerah tangkapan, koefisien limpasan, konduktivitas hidrolik, gradien hidrolik, dan luas penampang akuifer. Hasil analisis menunjukkan debit maksimum limpasan permukaan sebesar 0,81 m³/detik dan rembesan air tanah sebesar 0,16 m³/detik. Estimasi debit total ke lantai tambang adalah 0,778 m³/detik, sementara potensi total ke seluruh area tambang mencapai 0,97 m³/detik. Estimasi ini dapat menjadi dasar dalam perencanaan sistem penyaliran tambang yang efektif dan mendukung keberlanjutan operasional.

Kata kunci: *Mine Inflow*, Metode Rasional, Hukum Darcy

Abstract — Water overflow into open pit mines represents a significant challenge in mining operations, as it has the potential to cause technical disruptions and increased costs. The objective of this study is to estimate the total mine inflow through two approaches. Firstly, the Rational Method is employed to calculate surface runoff. Secondly, Darcy's Law is utilised to estimate groundwater seepage. The data utilised encompass parameters such as maximum rainfall, catchment area, runoff coefficient, hydraulic conductivity, hydraulic gradient, and aquifer cross-sectional area. The analysis yielded a maximum surface runoff discharge of 0.81 m³/sec and groundwater seepage of 0.16 m³/sec. The estimated total discharge to the mine floor is 0.778 m³/sec, while the total potential to the entire mine area reaches 0.97 m³/sec. These estimates can serve as a foundation for the effective planning of a mine drainage system that supports operational sustainability.

Keywords: *Mine Inflow*, Rational Method, Darcy's Law

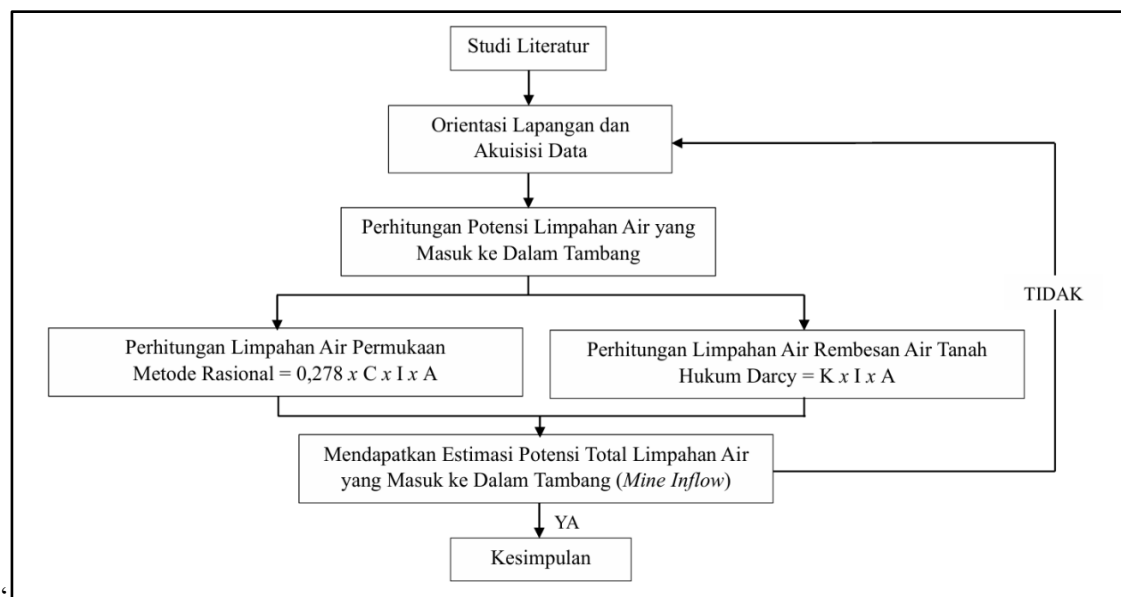
I. PENDAHULUAN

Masuknya air ke dalam tambang batubara merupakan permasalahan umum yang terjadi di berbagai wilayah di dunia [1], [2], [3], [4]. Aliran masuk yang tidak terduga dalam jumlah besar dapat menyebabkan kerugian signifikan terhadap operasional tambang secara keseluruhan [5]. Pada tambang terbuka, keberadaan air dapat menimbulkan berbagai dampak teknis, seperti peningkatan biaya operasional [6] dan gangguan terhadap proses pemuatan dan pengangkutan material [7]. Besar kecilnya aliran air yang masuk sangat dipengaruhi oleh kedalaman tambang, kondisi hidrogeologi massa batuan, dan lokasi tambang terhadap aliran air permukaan dan kondisi iklim [8].

Dalam studi ini, sumber utama limpahan air yang masuk ke tambang terbuka berasal dari limpasan air permukaan dan rembesan air tanah. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menghitung estimasi total limpahan air tambang (*mine inflow*) dengan pendekatan kuantitatif. Estimasi rembesan air tanah dilakukan dengan menggunakan Hukum Darcy [9], sedangkan limpasan air permukaan dihitung menggunakan Metode Rasional yang sesuai untuk daerah tangkapan hujan kurang dari 5.000 hektar [10]. Hasil estimasi ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam merancang sistem penyaliran tambang yang lebih optimal dan berkelanjutan.

II. METODE PENELITIAN

Bagan alir penelitian menggambarkan tahapan penelitian yang dimulai dari studi literatur untuk memperkuat landasan teori. Selanjutnya dilakukan orientasi lapangan dan akuisisi data parameter yang diperlukan dalam menghitung total limpahan air yang masuk ke dalam tambang. Setelah itu, data dilakukan perhitungan menggunakan Hukum Darcy dan Metode Rasional untuk mendapatkan jumlah total potensi limpahan air yang masuk ke dalam tambang. Tahapan akhir berupa penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang diperoleh. Untuk mempermudah pemahaman, bagan alir penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

A. Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk memperkuat landasan teori dan konsep yang relevan dalam menganalisis limpahan air ke dalam tambang terbuka. Literatur yang dikaji meliputi teori mengenai aliran air tanah, limpasan permukaan, dan metode perhitungan yang digunakan dalam studi ini yaitu Hukum Darcy dan Metode Rasional.

B. Orientasi Lapangan dan Akuisisi Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari orientasi langsung di lapangan sedangkan, data sekunder berasal dari perusahaan tambang dan studi literatur yang relevan. Data yang dikumpulkan meliputi sayatan geologi tampak samping, konduktivitas hidrolik, peta topografi, data historis curah hujan maksimum, dan foto citra udara tampak atas.

C. Metode Rasional

Metode Rasional dianggap sesuai untuk digunakan pada daerah tangkapan hujan dengan luas kurang dari 5.000 hektar [10]. Metode ini secara umum diterapkan pada daerah aliran berskala kecil, di mana distribusi curah hujan diasumsikan merata baik secara spasial maupun temporal. Untuk wilayah dengan cakupan yang luas, metode ini perlu disesuaikan dengan membagi area menjadi beberapa sub-wilayah, dan koefisien limpasan yang dihitung berdasarkan karakteristik dari masing-masing daerah tangkapan hujan. Metode Rasional dikenal karena kesederhanaannya dan sering diterapkan dalam perencanaan sistem penyaliran di wilayah tambang. Beberapa parameter penting yang diperhitungkan

dalam metode ini meliputi intensitas hujan, luasan daerah tangkapan hujan, dan koefisien limpasan. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, Metode Rasional dapat digunakan untuk memperkirakan debit puncak akibat hujan deras, selama masih dalam batasan wilayah yang sesuai untuk penerapannya [11]. Formula mengenai perhitungan metode rasional adalah sebagai berikut ini [12] :

$$Q_{maks} = 0,278 \times C \times I \times A$$

Dengan Q_{maks} adalah besaran debit puncak limpasan air permukaan (m^3/s), 0,278 adalah konstanta yang digunakan untuk mengonversi satuan agar hasil debit dalam satuan m^3/s , C adalah koefisien limpasan yang diperoleh berdasarkan karakteristik resapan lahan, I adalah nilai dari intensitas hujan berdasarkan durasi lama hujan di lokasi penelitian (mm/jam), dan A merupakan luasan daerah tangkapan hujan (km^2).

D. Hukum Darcy

Estimasi maksimum terhadap potensi debit air tanah dapat dilakukan menggunakan Hukum Darcy. Hukum ini awalnya dikembangkan dari percobaan aliran air melalui media berpori yaitu pipa yang diisi pasir, di mana laju aliran air terbukti sebanding dengan penurunan *head* hidraulik terhadap panjang pipa. Rasio antara penurunan *head* dan panjang lintasan aliran ini dikenal sebagai gradien hidraulik. Dari hasil percobaan tersebut, dapat disimpulkan bahwa *head* hidraulik merupakan penjumlahan antara *head* tekanan dan *head* elevasi. Seiring perkembangannya, Hukum Darcy digunakan untuk menurunkan persamaan matematis yang dapat diaplikasikan dalam memperkirakan debit aliran air tanah. Persamaan ini secara luas diterapkan dalam studi hidrogeologi untuk menganalisis karakteristik aliran bawah permukaan [13] :

$$Q_{maks} = K \times I \times A$$

Dengan Q_{maks} adalah besaran debit puncak rembesan air tanah (m^3/s), K adalah konduktivitas hidraulik tanah atau batuan (m/s), I adalah gradien hidraulik yang diperoleh berdasarkan selisih nilai *head* dengan panjang lintasan aliran, dan A merupakan luasan bukaan akuifer yang tersingkap (m^2).

III. HASIL DAN DISKUSI

Studi mengenai estimasi total limpahan air yang masuk ke dalam tambang dianggap penting dalam rangka pengoptimalan rancangan sistem penyaliran tambang. Hal tersebut dimaksudkan agar kerugian signifikan terhadap operasional tambang akibat limpahan air dapat ditanggulangi.

A. Perhitungan Potensi Limpasan Air Permukaan

- Intensitas Hujan

Intensitas hujan dihitung berdasarkan persamaan yang diperoleh dari Buku Hidrologi Terapan karya Bambang Triatmodjo 2008 [11]. Perhitungan menggunakan Persamaan Mononobe mengenai penurunan intensitas hujan yang dikutip dari tulisan Suyono dan Takeda 1993 [11]. Persamaan tersebut adalah sebagai berikut :

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

Dengan I_t adalah nilai intensitas hujan (mm/jam), t adalah lamanya durasi curah hujan (jam) R_{24} adalah Curah hujan rencana maksimal dalam waktu satu hari penuh (mm).

Berdasarkan data yang diperoleh selama 1 tahun di lokasi penelitian menunjukkan bahwa nilai lama rata – rata durasi hujan adalah selama 192 menit. Pada penelitian ini curah hujan rencana maksimal dihitung dengan metode distribusi probabilitas Gumbell karena merupakan distribusi yang paling sesuai dengan angka periode ulang hujan sebesar 1,63 tahun. Hasilnya adalah sebagai berikut :

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

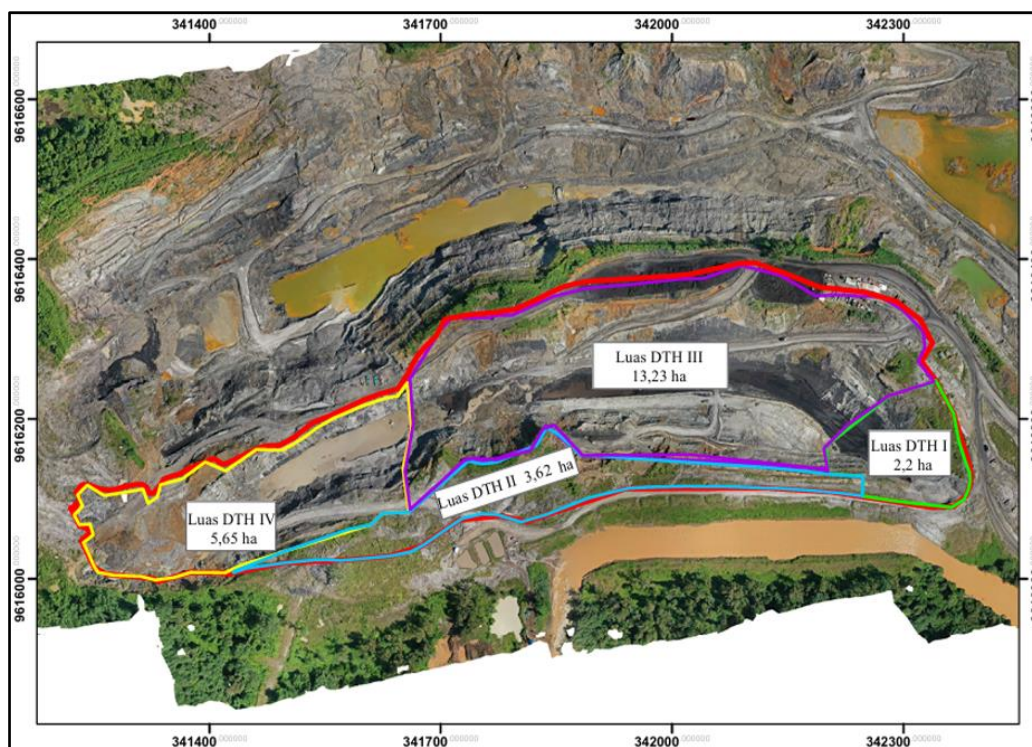
$$I_t = \left(\frac{(\bar{X} + (Kr (Faktor Frekuensi Gumbell) \times St. Dev))}{24} \rightarrow \text{dengan PUH } 1,63 \right) \times \left(\frac{24}{192/60} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$I_t = 15,371 \text{ mm/jam}$$

- Daerah Tangkapan Hujan

Dalam konteks pertambangan, daerah tangkapan hujan merupakan area di sekitar tambang yang berpotensi menerima dan mengalirkan curah hujan yang terjadi. Pada studi ini, daerah tangkapan hujan ditentukan melalui proses digitasi topografi menggunakan perangkat lunak AutoCAD 2024

Student License ©. Proses digitasi dilakukan dengan menghubungkan kontur-kontur tertinggi di sekitar area tambang untuk menentukan batas daerah tangkapan hujan di lokasi penelitian. Hasil mengenai luasan daerah tangkapan hujan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Luasan Daerah Tangkapan Hujan

- Koefisien Limpasan

Penentuan nilai koefisien limpasan dilakukan dengan menilai beberapa parameter antara lain kemiringan lahan, kapasitas infiltrasi tanah (*soil infiltration*), tutupan lahan (*vegetal cover*), dan kapasitas penyimpanan permukaan (*surface storage*) yang mengacu pada referensi yang tercantum dalam Hydraulic Design Manual [14]. Penentuan koefisien limpasan dibagi berdasarkan dari daerah tangkapan hujan yang ada di lokasi penelitian. Hasil mengenai pembobotan nilai koefisien limpasan dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Hasil Pembobotan Koefisien Limpasan

<i>Weighted Parameter</i>	DTH I Bobot	DTH II Bobot	DTH III Bobot	DTH IV Bobot
<i>Relief (Cr)</i>	0,36	0,36	0,36	0,36
<i>Soil Infiltration (Ci)</i>	0,16	0,12	0,16	0,16
<i>Vegetal Cover (Cv)</i>	0,1	0,8	0,16	0,16
<i>Surface Storage (Cs)</i>	0,12	0,06	0,12	0,12
<i>Runoff Coefficient Value</i>	0,74	0,62	0,8	0,8

- Potensi Debit Air Limpasan Permukaan Maksimal

Perhitungan debit air limpasan maksimal dihitung menggunakan persamaan Metode Rasional yang diperoleh dari Buku Sistem Penyaliran Tambang karya Gautama 1999 [12]. Hasil mengenai potensi debit air limpasan permukaan maksimal dapat dilihat pada Tabel 2. di bawah ini.

Tabel 2. Hasil Debit Limpasan Permukaan Maksimal

Parameter	DTH I	DTH II	DTH III	DTH IV
<i>A - Daerah Tangkapan Hujan (km²)</i>	0,022	0,0362	0,1323	0,0565
<i>C - Koefisien Limpasan</i>	0,74	0,62	0,8	0,8
<i>I - Intensitas Hujan (mm/jam)</i>	15,37	15,37	15,37	15,37
<i>Q_{maks} (m³/detik) = 0,278 x C x I x A</i>	0,07	0,1	0,45	0,19

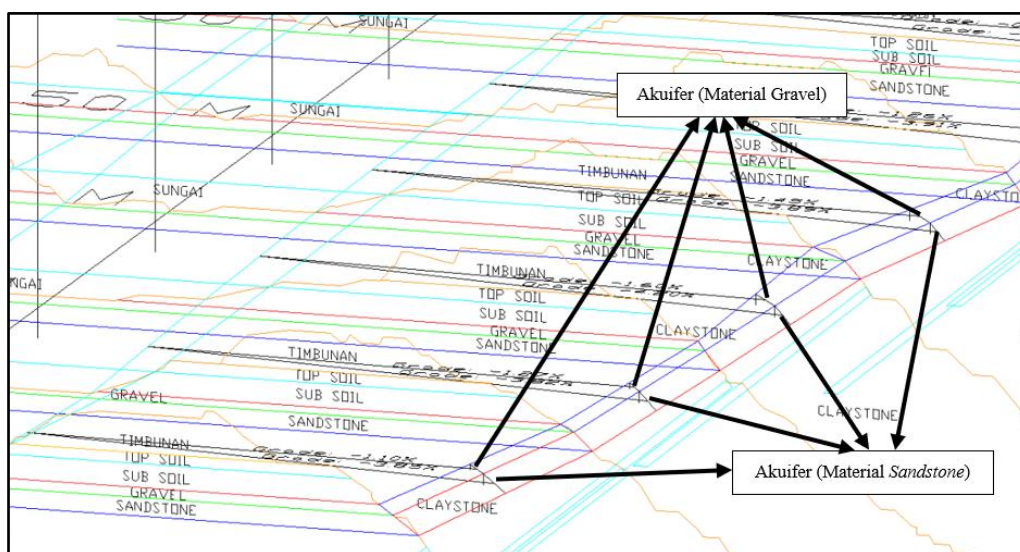
B. Perhitungan Potensi Debit Rembesan Air Tanah

- Konduktivitas Hidraulik

Pengujian konduktivitas hidraulik tidak dilakukan dalam studi ini karena tidak adanya alat pengujian di lapangan. Konduktivitas hidraulik didekati berdasarkan studi literatur [15], yang merangkum ribuan hasil uji empiris dari berbagai pengujian di laboratorium maupun lapangan. Nilai konduktivitas yang digunakan merupakan nilai konduktivitas hidraulik yang paling besar untuk memaksimalkan estimasi debit rembesan yang dihitung. Nilai tersebut dipilih agar estimasi berada pada kondisi maksimal, sehingga risiko *under* estimasi dapat diminimalkan. Dengan pendekatan ini, besarnya potensi rembesan yang masuk ke dalam sistem tambang dapat diperkirakan secara lebih realistis meskipun tanpa data uji langsung di lapangan. Di wilayah penelitian, terdapat dua material penyusun akuifer yaitu material *Gravel* dan *Sandstone*. Hasil konduktivitas hidraulik tertinggi untuk material tersebut adalah sebesar 3×10^{-2} m/s untuk material *Gravel* dan 6×10^{-6} m/s untuk material *Sandstone*.

- Gradien Hidraulik dan Luasan Penampang Singkapan Akuifer

Parameter luas penampang akuifer terbuka dan gradien hidraulik dihitung berdasarkan model tiga dimensi (3D) yang telah dibangun dengan melakukan integrasi sayatan geologi tampak samping. Parameter tersebut dihitung menggunakan digitasi perangkat lunak AutoCAD 2024 Student License ©. Luasan akuifer yang digunakan dalam perhitungan adalah luasan yang tegak lurus terhadap arah aliran rembesan untuk menghindari estimasi debit berlebih. Gradien hidraulik dihitung berdasarkan perbedaan elevasi antara lokasi masuknya air dari sungai dan titik keluarnya rembesan pada bukaan akuifer yang terbuka. Visualisasi mengenai model sistem akuifer dalam bentuk 3D dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pemodelan Sistem Akuifer Lokasi Penelitian

- Potensi Debit Rembesan Air Tanah Maksimal

Perhitungan potensi debit air rembesan tanah maksimal dihitung dengan menerapkan Hukum Darcy. Persamaan Hukum Darcy diperoleh dari Buku Applied Hydrogeology (4th ed.) karya Fetter 2001 [13]. Hasil mengenai potensi debit rembesan air tanah maksimal dapat dilihat pada Tabel 3. di bawah ini.

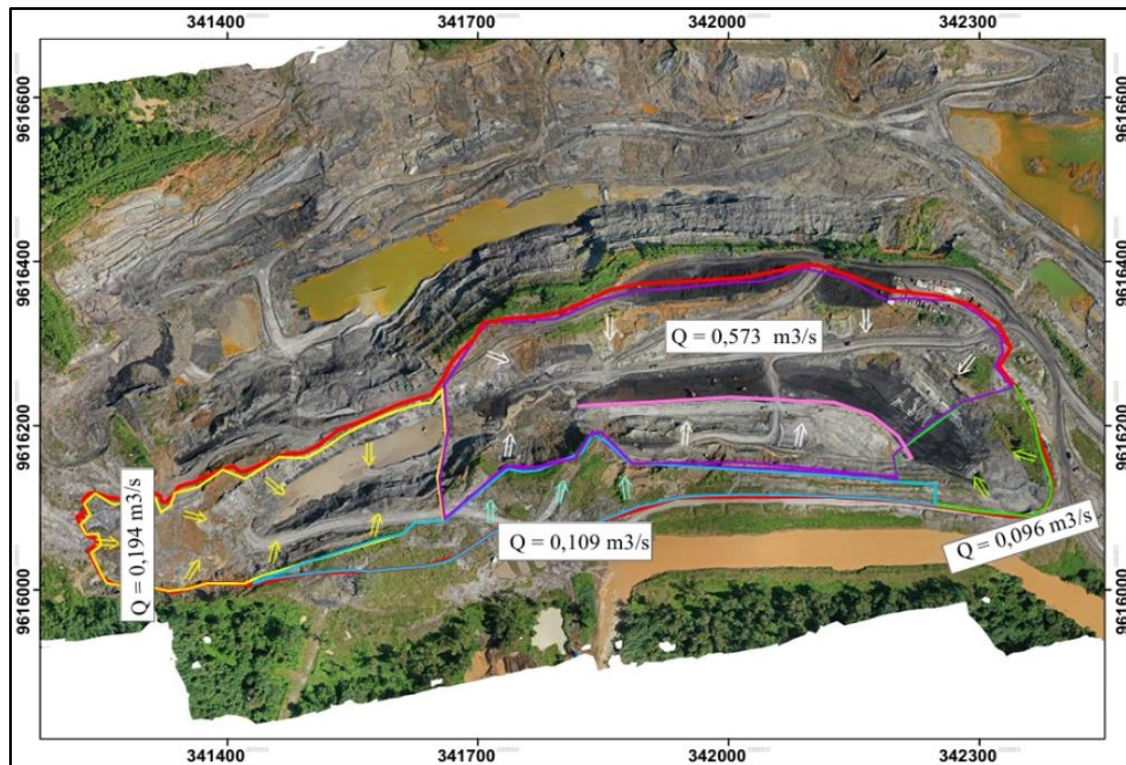
Tabel 2. Hasil Debit Rembesan Air Tanah Maksimal

Lapisan	Sayatan	A - Luas Tegak Lurus (m ²)	I - Grade	Q _{maks} = $K \times I \times A$ (m ³ /s)	Keterangan
Gravel $K = 3 \times 10^{-2}$	A-B	55,86	1,10%	0,018435149	Sidewall Timur
	B-C	54,01	1,27%	0,020577153	Sidewall Timur
	C-D	70,11	1,60%	0,03365097	Highwall
	D-E	49,95	1,45%	0,021726113	Highwall
	E-F	71,25	1,26%	0,026931278	Highwall
	F-G	74,96	0,49%	0,011019712	Highwall
	G-H	93,59	0,40%	0,011231143	Highwall
	H-i	85,59	0,44%	0,011297332	Highwall
	I-J	54,18	0,28%	0,004551482	Highwall
	A-B	118,8	3,85%	$2,74435 \times 10^{-5}$	Sidewall Timur
Sandstone $K = 6 \times 10^{-6}$	B-C	118,9	3,82%	$2,72527 \times 10^{-5}$	Sidewall Timur
	C-D	113,65	4,20%	$2,86402 \times 10^{-5}$	Highwall
	D-E	109,76	3,89%	$2,56168 \times 10^{-5}$	Highwall
	E-F	141,88	3,91%	$3,32848 \times 10^{-5}$	Highwall
	F-G	162,02	3,43%	$3,33434 \times 10^{-5}$	Highwall
	G-H	141,53	3,15%	$2,67495 \times 10^{-5}$	Highwall
	H-I	125,83	2,61%	$1,97054 \times 10^{-5}$	Highwall
	I-J	109,86	1,74%	$1,14699 \times 10^{-5}$	Highwall
	Total Sidewall Timur (m ³ /s)			0,039066999	
	Total Highwall (m ³ /s)			0,12058684	
	Total Keseluruhan (m ³ /s)			0,159653839	

C. Total Debit Mine Inflow

Estimasi debit air yang masuk ke dalam area tambang (*mine inflow*) diperoleh dari hasil akumulasi antara limpasan permukaan dari air hujan dan rembesan air tanah. Namun dalam penelitian ini, kontribusi rembesan air tanah tidak berpengaruh pada seluruh sub-Daerah Tangkapan Hujan (sub-DTH). Sub-DTH I dan sub-DTH III memiliki kontak langsung dengan singkapan akuifer, sementara itu sub-DTH II dan sub-DTH IV tidak memiliki kontak langsung dengan akuifer yang tersingkap. Kondisi ini menyebabkan perhitungan debit air pada sub-DTH II dan sub-DTH IV hanya mempertimbangkan komponen limpasan dari curah hujan, sedangkan pada sub-DTH I dan sub-DTH III dihitung berdasarkan kombinasi antara limpasan hujan dan rembesan air tanah. Secara berturut-turut, nilai debit air pada masing-masing sub-DTH adalah DTH I sebesar 0,109 m³/s, DTH II: 0,096 m³/s, DTH III: 0,573 m³/s, dan DTH IV: 0,194 m³/s.

Di lantai penambangan pada lokasi penelitian, estimasi total debit air dihitung berdasarkan akumulasi dari rembesan air tanah secara keseluruhan, debit air dari saluran terbuka pada DTH I dan DTH II, dan debit limpasan langsung dari DTH III. Berdasarkan perhitungan tersebut, debit total yang berpotensi mengalir dan masuk ke lantai penambangan mencapai 0,778 m³/detik. Adapun estimasi total debit air yang berpotensi masuk ke seluruh area tambang adalah sebesar 0,97 m³/detik. Dengan adanya pembagian wilayah sub-DTH ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi dalam perancangan sistem penyaliran tambang. Untuk mempermudah pemahaman, peta pembagian debit air dan arah alirannya disajikan pada Gambar 4. di bawah ini.



Gambar 4. Potensi Debit *Mine Inflow* Total Lokasi Penelitian

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa estimasi debit limpahan air (*mine inflow*) ke dalam tambang terbuka dapat dihitung secara efektif dengan pendekatan kuantitatif menggunakan Metode Rasional untuk limpasan permukaan dan Hukum Darcy untuk rembesan air tanah. Berdasarkan hasil perhitungan, total debit limpasan permukaan dari empat sub-daerah tangkapan hujan mencapai $0,81 \text{ m}^3/\text{detik}$, sedangkan debit maksimum rembesan air tanah diperkirakan sebesar $0,16 \text{ m}^3/\text{detik}$. Kombinasi dari kedua komponen tersebut menghasilkan estimasi debit air yang masuk ke lantai penambangan sebesar $0,778 \text{ m}^3/\text{detik}$, dan total debit air yang berpotensi masuk ke seluruh area tambang mencapai $0,97 \text{ m}^3/\text{detik}$. Hasil ini menunjukkan bahwa kontribusi air permukaan dan rembesan air tanah terhadap sistem tambang cukup signifikan, sehingga diperlukan perencanaan sistem penyaliran yang mempertimbangkan kondisi topografi, karakteristik hidrogeologi, dan distribusi daerah tangkapan hujan secara menyeluruh. Pendekatan ini dapat menjadi dasar yang kuat dalam pengembangan sistem penyaliran tambang yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan guna meminimalkan risiko gangguan terhadap operasional tambang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Adidaya Alam Borneo, PT Global Borneo Resources, dan seluruh karyawan atas ketersediaan data primer dan data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Bogardi, L. Duckstein, A. Schmieder, and F. Szidarovszky, "Stochastic forecasting of mine water inrushes," *Adv. Water Resour.*, vol. 3, no. 1, pp. 3–8, 1980.
- [2] P. Bukowski, "Water Hazard Assessment in Active Shafts in Upper Silesian Coal Basin Mines," *Mine Water Environ.*, vol. 30, pp. 302–311, 2011.
- [3] S. Dumbleton, N. S. Robins, J. A. Walker, and P. D. Merrin, "Mine Water Rebound in South Nottinghamshire: Risk Evaluation using 3-D Visualization and Predictive Modelling," *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, vol. 34, no. 3, pp. 307–319, 2001.

Pendekatan Kuantitatif dalam Penentuan Debit Air Mine Inflow pada Tambang Terbuka
(Desta Nugraha Ardinanta, Tedy Agung Cahyadi, Peter Eka Rosadi, Wawong Dwi Ratminah, Gunawan Nusanto, dan Erwin Septianto)

- [4] Q. Wu, X. M. Guo, J. J. Shen, S. Xu, S. Q. Liu, and Y. F. Zeng, "Risk Assessment of Water Inrush from Aquifers Underlying the Gushuyuan Coal Mine, China," *Mine Water Environ.*, vol. 36, no. 1, pp. 96–103, 2017.
- [5] R. N. Singh and A. S. Atkins, "Application of Idealised Analytical Techniques for Prediction of Mine Water Inflow," 1985.
- [6] M. M. Zago, M. Fries, and J. E. F. Ramires, "Groundwater Infiltration in a Gold Mine: A Geoelectrical Investigation Model as an Aid to Dewatering Process Determination," *J. Appl. Geophys.*, vol. 172, p. 103909, 2020.
- [7] H. Taherkhani and R. Doostmohammadi, "Transportation costs: A Tool for Evaluating the Effect of Rock Mass Mechanical Parameters on Blasting Results in Open Pit Mining," *J. Min. Sci.*, vol. 51, pp. 730–742, 2015.
- [8] H. El Idrysy and R. Connelly, "Water—the Other Resource a Mine Needs to Estimate," *Procedia Eng.*, vol. 46, pp. 206–212, 2012.
- [9] W. P. Clark and D. L. Peck, United States Department of the Interior, [no date].
- [10] I. M. Kamiana, Teknik Perhitungan Debit Rencana Bangunan Air. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2011.
- [11] B. Triatmodjo, Hidrologi Terapan. Yogyakarta: Beta Offset, 2008.
- [12] R. S. Gautama, Sistem Penyaliran Tambang. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 1999.
- [13] C. W. Fetter, Applied Hydrogeology, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- [14] Texas Department of Transportation, Standard Specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets, and Bridges, 2016. [Online]. Available: <https://www.txdot.gov/business/resources/txdot-specifications.html>
- [15] P. A. Domenico and F. W. Schwartz, Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.



©2025. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).