

# Overview Prediksi Aliran Airtanah pada Penambangan *Open Pit*

Kadek Nando Setiawan<sup>1</sup>, Tedy Agung Cahyadi<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> Mahasiswa Prodi Magister Teknik Pertambangan UPN

<sup>2)</sup> Staf Pengajar Prodi Magister Teknik Pertambangan UPN

Korespondensi : [kadeknandosetiawan00@gmail.com](mailto:kadeknandosetiawan00@gmail.com)

## ABSTRAK

Menghadapi air dalam penggalian penambangan terbuka (*open pit*) menyebabkan banyak masalah operasional, ekonomi, dan keselamatan. dengan bertambahnya kedalaman penambangan, kondisi hidrogeologis menjadi lebih kompleks, dan aliran air masuk ke tambang meningkat setiap tahun, bencana air tambang sering terjadi, yang mengakibatkan kerugian ekonomi hingga puluhan juta dollar. Oleh karena itu, perlu dilakukannya prediksi aliran air masuk ke tambang. Penelitian ini bertujuan mengetahui model aliran airtanah yang cocok diterapkan di pertambangan, dan melihat tren aliran airtanah yang masuk ke pit serta menentukan faktor yang mempengaruhi aliran air masuk ke tambang. Penulis melakukan komparasi beberapa literatur untuk mengetahui model terbaik, menganalisis tren aliran airtanah dan faktor yang mempengaruhi aliran air ke tambang. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa, model numerik memberikan hasil yang lebih baik daripada model analitik, tren aliran airtanah terjadi kenaikan dan penurunan serta fluktuasi, terhadap waktu dan kedalaman, serta banyak faktor yang mempengaruhi aliran airtanah ke pit tambang diantaranya faktor geologi, hidrogeologi, dan kegiatan penambangannya.

**Kata Kunci:** aliran airtanah, numerik, tambang terbuka

## ABSTRACT

*Dealing with water in open pit mining causes many operational, economic and safety problems. as mining depth increases, hydrogeological conditions become more complex, and water inflow to the mine increases every year, mine water disasters occur frequently, resulting in tens of millions of dollars in economic losses. Therefore, it is necessary to predict the flow of water into the mine. This study aims to determine the groundwater flow model that is suitable for mining, and to see the trend of groundwater flow into the pit and determine the factors that influence the flow of water into the mine. The author conducted comparisons of several literatures to determine the best model, analyze groundwater flow trends and factors that influence water flow to the mine. From these results, it is found that, numerical models provide better results than analytical models, groundwater flow trends increase and decrease and fluctuate, with respect to time and depth, as well as many factors that affect the flow of groundwater to the mine pit, including geology, hydrogeology, and mining activities.*

**Keywords:** groundwater flow, numerical, open pit mine

## 1. PENDAHULUAN

Bencana air tambang sering terjadi pada penambangan sistem terbuka (*open pit*). Menghadapi air dalam penggalian penambangan menyebabkan banyak masalah operasional, ekonomi, dan keselamatan [6]. Di beberapa kondisi penggalian pada penambangan *open pit*, cadangan mineral dan lapisan batubara ditutupi oleh akuifer yang tebal yang berhubungan hidrolis (*hydraulic connection*) langsung dengan badan air permukaan yang kemudian terpotong pada saat penggalian, sehingga terancam bencana air tambang yang mengakibatkan banjir di lokasi *front* penambangan bahkan longsornya lereng penambangan akibat meningkatnya tinggi muka air tanah yang berpengaruh terhadap beban gaya penggerak pada lereng [3].

Dalam beberapa dekade terakhir, dengan bertambahnya kedalaman penambangan, kondisi hidrogeologis menjadi lebih kompleks, dan aliran air masuk ke tambang meningkat setiap tahun, bencana air tambang sering terjadi, yang mengakibatkan kerugian ekonomi hingga puluhan juta dollar [14].

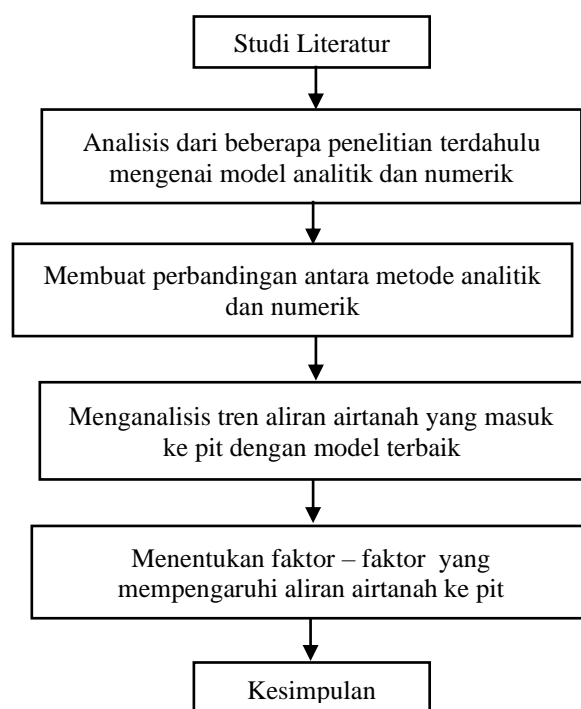
Oleh karena itu, untuk memastikan keselamatan dan pembangunan berkelanjutan industri pertambangan, baik dalam tahap pencarian hidrogeologi maupun dalam tahap produksi dan konstruksi, prediksi masuknya air ke tambang adalah pekerjaan yang paling signifikan namun kompleks. Prediksi akurat dari aliran air ke

tambang sangat penting untuk mencegah dan pengendalian masuknya air tambang, meminimalkan bahaya tambang, dan memaksimalkan keuntungan tambang.

Penelitian ini bertujuan mengetahui model aliran airtanah yang cocok diterapkan di pertambangan, dan melihat tren aliran airtanah yang masuk ke pit serta menentukan faktor yang mempengaruhi aliran air masuk ke tambang.

## 2. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian dimulai dengan studi literatur baik dalam jurnal nasional, maupun internasional, dengan membandingkan penelitian – penelitian tentang pemodelan airtanah untuk mencari model solusi aliran airtanah terbaik untuk prediksi aliran airtanah ke tambang. Selanjutnya dilakukan analisis untuk mengetahui tren dan faktor yang mempengaruhi dari aliran airtanah ke tambang. (Gambar 1).



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

## 3. HASIL

Model yang sering/banyak digunakan dalam memahami suatu kondisi aliran air tanah diantaranya model analitik dan model numerik.

### 3.1. Model analitik

Model analitik merupakan cara cepat untuk menganalisis karakteristik fisik dan perilaku konseptual sistem air tanah. Keuntungan dari model analitik adalah mudah diterapkan dan akurat pada masalah yang sederhana, namun model analitik membuat banyak asumsi seperti isotropi dan homogenitas akuifer oleh karena itu model analitik sulit diterapkan pada sistem air tanah kompleks.

Pada penelitian yang dilakukan Burcu Unsal pada tahun 2015, model analitik digunakan untuk menghitung laju aliran airtanah ke dalam pit tambang untuk setiap penurunan 50 m dari elevasi dasar pit selama fase operasional. Dengan asumsi bahwa air tanah akan di turunkan di bawah dasar galian pit, dimungkinkan untuk memperkirakan laju aliran air tanah masuk ke pit tambang secara bertahap. Perhitungan tingkat aliran air tanah masuk ke pit dengan model analitik menunjukkan hasil underestimate karena ketidakmampuan model analitik dalam mensimulasikan alir yang dilepaskan dari penyimpanan.

Saeed Bahrami pada tahun 2014 melakukan penelitian untuk mensimulasikan aliran airtanah ke tambang terbuka dengan menggunakan simulasi numerik dan beberapa model analitik (Jacob and Lohman 1952; McWhorter 1981; Singh et al. 1985). Hasil model dibandingkan dengan kesesuaian data ukur lapangan

menunjukkan kesalahan relatif model numerik, Singh et al. 1985, Jacob and Lohman, dan McWhorter 1981 berturut – turut sebesar 0,108, 1,8, 3,1, dan 5,3. Hasil tersebut menunjukkan model numerik memiliki kesesuaian erat dengan data ukur lapangan. Model juga digunakan untuk mensimulasi hidrolik head dari empat sumur pantau.

Model numerik memberikan hasil paling mendekati dengan data hidrolik head lapangan sedangkan model analitik Theis menghasilkan nilai terkecil (*underestimate*) dan model analitik Kruseman dan De Ridder (1979) sedikit melebihi (*overestimate*) dari kondisi lapangan.

### 3.2. Model Numerik

Diantara teknik model lainnya, model numerik memiliki keunggulan lebih yang mampu memecahkan masalah air tanah sederhana dan kompleks, mampu digunakan hampir pada semua jenis semua jenis airtanah dan tidak memaksakan batasan pada kondisi awal, tipe batas, serta karakteristik airtanah. Keuntungan terbesar dalam model numerik adalah model tersebut memanfaatkan kemajuan terbaru dalam teknologi komputer tanpa menulis kode komputer.

Duongson Ta pada tahun 2019 melakukan pemodelan airtanah pada tambang besi yang memiliki kondisi hidrogeologi yang kompleks. Hasil pemodelan 4,1 % lebih besar dari kondisi lapangan, menunjukkan bahwa kondisi hidrogeologi dan parameter yang dipilih sudah mendekati kondisi lapangan.

Penelitian yang dilakukan oleh Kai Zhang pada tahun 2017 dalam prediksi aliran airtanah ke pit tambang menggunakan tiga metode (analog, big well method, dan simulasi numerik), hasil simulasi menemukan bahwa simulasi numerik memprediksi aliran airtanah ke pit yang paling sedikit diantara metode lainnya, ternyata pada kondisi lapangan memiliki nilai yang lebih kecil dari yang dihitung oleh ketiga model, sehingga model numerik merupakan model simulasi yang paling akurat diantara ketiga model tersebut karena mempertimbangkan lebih banyak pengaruh dan memiliki deskripsi batas yang kuat. Selain itu juga simulasi numerik dapat memprediksi aliran airtanah masuk ke pit selama berbagai tahapan produksi untuk wilayah pertambangan.

Dalam penelitian yang dilakukan Xue Sen pada tahun 2018 dalam pemodelan airtanah di area pertambangan Zhuanlongwan menghasilkan kalibrasi yang akurat dalam kondisi *steady state*, dengan nilai *root mean squared* (RMS) sebesar 1,01 m, koefisien korelasi 0,89, dan *residual mean* 0,91. Nilai kalibrasi tersebut menunjukkan keberhasilan dalam pemodelan dengan model numerik. Dari hasil kalibrasi selanjutnya dilakukan analisis sensitivitas untuk mengetahui pengaruh parameter model dan faktor relevan lainnya pada sistem akuifer.

L. Surinaidu pada tahun 2013 menggunakan *software* Visual MODFLOW untuk mensimulasikan sistem airtanah 3 dimensi pada penambangan batugamping. Selama kalibrasi *recharge* ditingkatkan sekitar 10 % dan konduktivitas hidrolik ditingkatkan sekitar 15 % dan didapatkan nilai RMSE sebesar 1,5, sehingga dari nilai kalibrasi yang baik tersebut digunakan dalam melakukan prediksi pada berbagai skenario tahapan penambangan.

### 3.3. Perbandingan Model Analitik dan Model Numerik

Dari hasil studi literatur dan membandingkan hasil penelitian – penelitian sejenis terdahulu dilakukan komparasi antara model analitik dengan model numerik yang disajikan dalam tabel 1 tentang informasi dari keuntungan dan keterbatasan dari model analitik dan model numerik.

### 3.4. Analisis Tren Aliran Airtanah ke Pit Tambang Hasil Simulasi Numerik

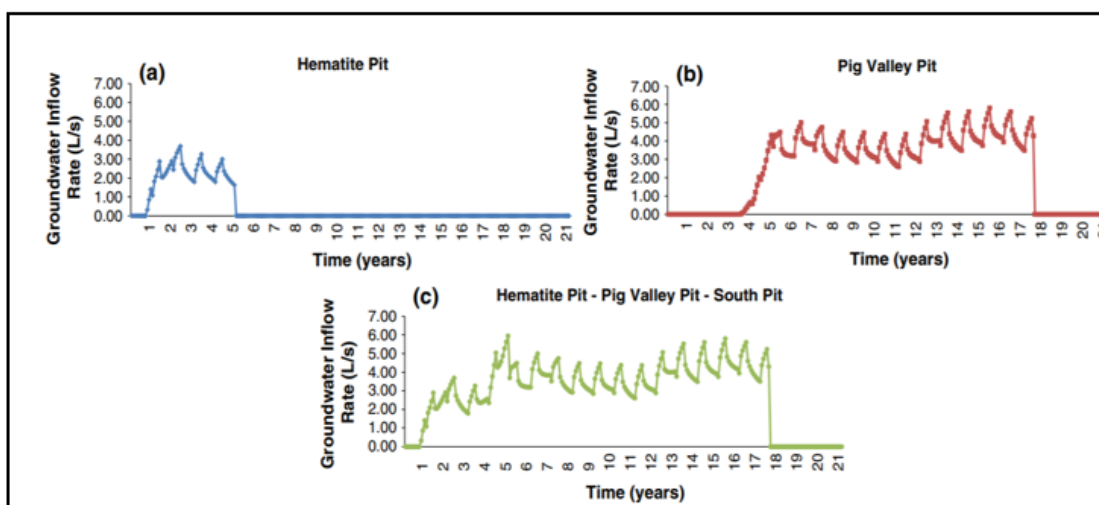
Dari uraian perbandingan model aliran airtanah diatas penulis hanya membahas hasil prediksi aliran airtanah model numerik karena memberikan akurasi model yang lebih baik daripada model analitik.

Penelitian Ayse Peksezer-Sayit, pada tahun 2014 melakukan pemodelan tingkat aliran airtanah masuk ke pit penambangan Nikel berdasarkan urutan operasi dari tiga pit selama umur tambang 21 tahun. Model dikalibrasi pada kondisi *steady state* untuk menentukan kondisi awal simulasi transien. Kesesuaian antara ketinggian air tanah yang diamati dengan yang dihitung didapat nilai RMSE dan NRMSE 23,51 m dan 2,75 %, yang menunjukkan model mampu mensimulasikan kondisi lapangan yang sebenarnya. Hasil simulasi pengeringan menunjukkan tren peningkatan fluks sesuai dengan kemajuan dalam penggalian pit. Peningkatan fluks terjadi karena pembangunan jenjang penambangan baru. Setelah mencapai ketinggian jenjang yang diinginkan dan tetap konstan sampai pembangunan jenjang berikutnya, menjadi faktor penyebab penurunan tingkat pengeringan. fluktuasi tersebut akan terus berlanjut seiring penggalian jejang berikutnya pada pit Hematite dan pit Pig Valley.

Di pit selatan tidak akan terjadi aliran airtanah karena muka airtanah selalu berada dibawah lantai pit penambangan. Gambar 2 menunjukkan tren aliran airtanah ke pit tambang Nikel

Tabel 1. Komparasi Kelebihan dan Kekurangan Model Analitik dan Model Numerik

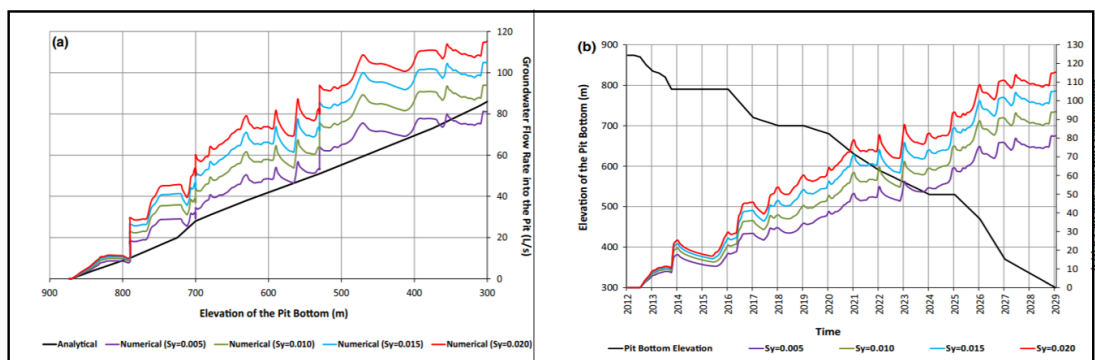
Tipe Model	
Model Analitik	Model Numerik
<p><b>Keuntungan</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ekonomis [9,11,23]</li> <li>• Sempel [9,23]</li> <li>• Cara cepat untuk menganalisis karakteristik fisik airtanah [11]</li> <li>• Lebih efisien dari model lainnya [9,23]</li> <li>• Dapat digunakan untuk melengkapi dan verifikasi model numerik [8]</li> <li>• Memberikan lebih banyak wawasan tentang perilaku konseptual atau sistem air tanah [11]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digunakan dengan kemajuan terbaru dan terkini dalam teknologi komputer [5,9]</li> <li>• Kebanyakan memecahkan masalah airtanah yang kompleks seperti masalah satu, dua atau tiga dimensi yang sederhana dan kompleks[5,9,19]</li> <li>• Mampu mensimulasikan hampir semua masalah airtanah baik sederhana maupun kompleks [5,8,9,19]</li> <li>• Dapat dengan mudah menangani variasi spasial atau temporal dari sistem airtanah [9]</li> <li>• Sangat cocok untuk mengeksplorasi skenario hipotesis [1,16]</li> <li>• Program komputer untuk sebagian besar masalah air tanah tersedia dengan mudah dan pengguna dapat menerapkan program komputer yang relevan tanpa menulis kode komputer apa pun [5,9,19]</li> </ul>
<p><b>Keterbatasan</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Solusi analitik yang tepat mungkin melebihi error yang diperbolehkan karena penyederhanaan asumsi lapangan yang kompleks [23]</li> <li>• Kondisi awal relatif simpel dan sederhana dalam kondisi batas. kondisi batas hidrogeologi harus diidealkan agar sesuai dengan model [20]</li> <li>• Pertimbangan ahli dan pengalaman dalam aplikasi lapangan diperlukan untuk penerapan model analitik [20]</li> <li>• Cocok untuk mengatasi masalah airtanah yang melibatkan bagian-bagian kecil dari sistem akuifer atau wilayah yang kecil [23]</li> <li>• Tidak dapat menangani variasi spasial / temporal dalam sistem air tanah [23]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatif mahal [28]</li> <li>• Memakan waktu untuk pengumpulan dan input data [5,9,19]</li> <li>• Membutuhkan banyak informasi untuk menggambarkan sistem [14]</li> <li>• Keakuratan hasil model numerik terutama bergantung pada ketersediaan informasi tentang sifat hidrolis dari lapisan tanah [18]</li> <li>• Ketidakpastian prediksi model sulit diukur [18]</li> </ul>



Gambar 2. Hasil simulasi aliran airtanah. [10]

Penelitian yang dilakukan Burcu Unsal pada tahun 2015 dalam memprediksi aliran airtanah masuk ke tambang emas Turkey dengan model numerik menggunakan Visual MODFLOW 2011.1. dari hasil kalibrasi

nilai RMSE dan koefisien korelasi masing – masing 13,9 m dan 0,942. Oleh karena itu model mampu memprediksi aliran airtanah ke pit tambang dalam berbagai tahapan. Empat set simulasi pengeringan dilakukan dengan menggunakan nilai *specific yield* yang berbeda (0,020, 0,015, 0,010, dan 0,005). Hasil simulasi menyatakan semakin meningkat nilai *specific yield* maka hasil prediksi aliran airtanah masuk ke pit juga akan bertambah. Jumlah airtanah yang mengalir ke pit menunjukkan tren peningkatan akibat penurunan dasar pit dan fluktuasi aliran diakibatkan dari perubahan musim sesuai dengan tingkat pengisian ulang serta tidak teraturnya perkembangan geometri pit tambang. Gambar 3 menunjukkan tren aliran airtanah ke pit tambang emas.



Gambar 3. a) Perbandingan laju aliran airtanah ke dalam pit dihitung dengan model analitik dan numerik. b) Laju aliran air tanah ke dalam pit dan ketinggian dasar pit terhadap waktu [18]

Pada tahun 2019 Duongson Ta, melakukan simulasi numerik model airtanah pada tambang besi *open pit*. Hasil simulasi berbagai skenario memprediksi aliran airtanah ke tambang akan meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman penambangan dan perluasan lokasi tambang. Model prakiraan dibangun untuk tujuh periode pengembangan penambangan hingga proyek akhir tambang. Terdapat dua sumber aliran airtanah masuk tambang: lapisan sedimen dan lapisan batuan kuat yang retak. Tren aliran airtanah dari kedua lapisan terhadap peningkatan kedalaman penggalian tambang adalah sama – sama meningkat, namun lapisan batuan keras yang retak memiliki aliran yang lebih besar daripada lapisan sedimen.

#### 4.5. Faktor Faktor yang mempengaruhi Aliran Airtanah ke Pit Tambang

Dari uraian diatas mengenai analisis tren aliran airtanah ke pit tambang dan studi literatur penelitian – penelitian yang sejenis, sehingga dapat ditentukan faktor – faktor yang mempengaruhi aliran airtanah ke pit tambang dari hasil analisis terhadap beberapa referensi. Tabel 2 menunjukkan faktor yang mempengaruhi aliran airtanah ke pit tambang.

Tabel 2. Faktor – Faktor yang mempengaruhi aliran airtanah ke pit

Referensi	Faktor - Faktor yang Mempengaruhi Aliran Airtanah ke Pit
7,16	Pengurangan distribusi areal pertambangan akibat backfilling
14,16,20,22	Struktur Geologi pada daerah penambangan
4,14,16	Pit yang beroperasi lebih dari satu dalam posisi berdekatan
14,16,17,18	Kemajuan kedalaman dan perluasan area penggalian pit
8,17,22	Variasi litologi lapisan akuifer
14,18	Musim yang mengatur pengisian ulang
14	Adanya hubungan dengan badan air permukaan seperti sungai dan danau
18	Tingkat nilai <i>specific yield</i>

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan studi literatur dari berbagai jurnal mengenai pemodelan aliran airtanah, maka dapat ditarik kesimpulan:

1. Model numerik memberikan hasil yang lebih baik daripada model analitik

2. Tren aliran airtanah terjadi kenaikan dan penurunan serta fluktuasi, terhadap waktu dan kedalaman
3. banyak faktor yang mempengaruhi aliran airtanah ke pit tambang diantaranya faktor geologi, hidrogeologi, dan kegiatan penambangannya.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Dalam penyusunan paper ini tidak terlepas dukungan dari berbagai pihak khususnya Kepada Prodi Teknik Pertambangan UPN “Veteran” Yogyakarta.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bahrami, S., Ardejani, F. D., Aslani, S., & Baafi, E. (2014). Numerical modelling of the groundwater inflow to an advancing open pit mine: Kolahdarvazeh pit, Central Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 186(12), 8573-8585.
- [2] Brunetti E, Jones JP, Petitta M, Rudolph DL (2013) Assessing the impact of large-scale dewatering on fault-controlled aquifer systems: a case study in the Acque Albue basin (Tivoli, central Italy). *Hydrogeol J* 21(2):401–423
- [3] Cahyadi, T. A., Widodo, L. E., Syihab, Z., & Notosiswoyo, S. (2017). Pengaruh Instalasi Drain Hole Terhadap Penurunan Muka Airtanah Pada Media Permeabilitas Yang Berbeda (studi Kasus Model Konseptual).
- [4] Dong D, Sun W, Xi S (2012) Optimization of mine drainage capacity using FEFLOW for the no. 14 coal seam of China's Linnancang Coal Mine. *Mine Water Environ* 31(4):353–360
- [5] E. Manoli, P. Katsiardi, G. Arampatzis, and D. Assima-copoulos, “Comprehensive Water Management Scenarios for Strategic Planning,” *Global NEST Journal*, Vol. 7, pp. 369–378, 2005.
- [6] Fernández-Álvarez, J. P., Álvarez-Álvarez, L., & Díaz-Noriega, R. (2016). Groundwater numerical simulation in an open pit mine in a limestone formation using MODFLOW. *Mine Water and the Environment*, 35(2), 145-155.
- [7] Haq, S., Prakasa, D., Putra, E., Hendrayana, H., & Igarashi, T. (2011). Hydrogeology of an Open-pit Coal Mine in Tamiang Layang Central Kalimantan Indonesia: a Preliminary Groundwater Flow Modeling. *Indonesian Association Geologists*, 1-20.
- [8] N. Emekli, N. Karahanoglu, H. Yazicigil, and V. Doy-uran. “Numerical simulation of saltwater intrusion in a groundwater Basin,” *Water Environment Research*, Vol. 68, pp. 855–866, 1996.
- [9] N. Krešić, “Hydrogeology and groundwater modeling,” CRC Press, Boca Raton, Florida, 2006.
- [10] Peksezer-Sayit, A., Cankara-Kadioglu, C., & Yazicigil, H. (2015). Assessment of dewatering requirements and their anticipated effects on groundwater resources: A case study from the Caldag Nickel Mine, Western Turkey. *Mine Water and the Environment*, 34(2), 122-135.
- [11] P. K. M. van der Heijde, “Quality assurance in computer simulations of groundwater contamination,” *Environmental Software*, Vol. 2, pp. 19–25, 1987.
- [12] Sagin, J., Yerikuly, Z., Zhaparkhanov, S., Panichkin, V., Miroshnichenko, O., & Mashtayeva, S. (2015). Groundwater inflow modeling for a Kazakhstan copper ore deposit.
- [13] Shalaho Dina Devy, S., Heru Hendrayana, H. H., & Doni Prakasa Eka Putra, D. (2014, October). PEMODELAN AIR TANAH DAERAH PENAMBANGAN BATUBARA PIT TERBUKA DI MUARA LAWAN, KABUPATEN KUTAI BARAT, KALIMANTAN TIMUR. In *PROSIDING SEMINAR NASIONAL KEBUMIHAN KE-7 Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, 30–31 Oktober 2014*. Jurusan Teknik Geologi.
- [14] Shi, L., Wang, Y., Qiu, M., & Wang, M. (2019). Assessment of water inrush risk based on the groundwater modeling system—a case study in the Jiaojia Gold Mine Area, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(24), 807.
- [15] Surinaidu, L., Rao, V. G., & Ramesh, G. (2013). Assessment of groundwater inflows into Kuteshwar Limestone Mines through flow modeling study, Madhya Pradesh, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(4), 1153-1161.
- [16] Surinaidu, L., Rao, V. G., Rao, N. S., & Srinu, S. (2014). Hydrogeological and groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal Mines at different mine development stages using MODFLOW, Andhra Pradesh, India. *Water Resources and Industry*, 7, 49-65.
- [17] Ta, D., Cao, S., Steyl, G., Yang, H., & Li, Y. (2019). Prediction of Groundwater Inflow into an Iron Mine: A Case Study of the Thach Khe Iron Mine, Vietnam. *Mine Water and the Environment*, 38(2), 310-324.
- [18] Unsal, B., & Yazicigil, H. (2016). Assessment of open pit dewatering requirements and pit lake formation for the Kışladağ gold mine, Uşak, Turkey. *Mine Water and the Environment*, 35(2), 180-198.
- [19] V. S. Singh and C. P. Gupta, “Groundwater in a coral is-land,” *Environmental Geology*, Vol. 37, pp. 72–77, 1999.
- [20] Wu, C., Wu, X., Zhu, G., & Qian, C. (2019). Predicting mine water inflow and groundwater levels for coal mining operations in the Pangpangta coalfield, China. *Environmental Earth Sciences*, 78(5), 130.
- [21] Xue, S., Liu, Y., Liu, S., Li, W., Wu, Y., & Pei, Y. (2018). Numerical simulation for groundwater distribution after mining in Zhuanlongwan mining area based on visual MODFLOW. *Environmental Earth Sciences*, 77(11), 400.
- [22] Yihdego, Y., & Paffard, A. (2017). Predicting open pit mine inflow and recovery depth in the Durvuljin soum, Zavkhan Province, Mongolia. *Mine Water and the Environment*, 36(1), 114-123.
- [23] Zhang, K., Cao, B., Lin, G., & Zhao, M. (2017). Using multiple methods to predict mine water inflow in the Pingdingshan no. 10 coal mine, China. *Mine Water and the Environment*, 36(1), 154-160.