

Pengaplikasian Permodelan Air Tanah Pada Lingkungan Pertambangan: *Literatur Review*

Satria Fitrio¹, Tedy Agung C², Barlian Dwinagara³

¹⁻³ Magister Teknik Pertambangan, UPN "Veteran" Yogyakarta

Korespondensi: SatriaFitrio90@gmail.com

ABSTRAK

Simulasi dalam pengeringan tambang terbuka, banjir, dan penilaian terhadap dampak lingkungan dilakukan dengan menggunakan model aliran air tanah. Dalam hidrogeologi pertambangan kegunaan model numerik sangatlah terbatas karena ketidakpastian yang terkait dengan asumsi dari parameter hidrogeologi dan kondisi batas. Di antaranya kurangnya data dalam mengidentifikasi kondisi hidrogeologi, perubahan siklus curah hujan dan penguapan, perubahan akibat pengelolaan lahan akibat aktivitas penambangan, perubahan jadwal kerja penambangan, dan void flooding pasca penambangan. Model numerik merupakan alat yang digunakan dalam mendiagnosis, mengelola, dan memprediksi perilaku air di tanah, yang mana menjadi semakin penting dalam beberapa tahun terakhir. Meskipun pemodelan matematika memiliki kelebihan, pemodelan matematika tidak dapat dijadikan sumber dari segala jawaban atas semua pertanyaan yang berkaitan dengan air tanah. Permodelan merupakan alat dinamis yang harus selalu dikembangkan untuk proses perbaikan berkelanjutan, untuk menjadi sebuah representasi fenomena alam. Maka dari itu pada literatur review ini menyajikan pendekatan metodologis untuk mengetahui model numerik, mengatasi kapabilitas dan keterbatasannya, dalam kasus aplikasi yang berbeda dalam industri pertambangan, seperti drainase lubang terbuka dan pencucian timbunan (*heap leach*). Karena itu, tujuan dari penelitian ini melalui literatur review yang dilakukan adalah untuk mengetahui bagaimana gambaran pengaplikasian permodelan air tanah pada lingkungan pertambangan tambang terbuka berdasarkan contoh studi kasus pada literatur ini.

Kata kunci: Model numerik, permodelan, pengeringan tambang, tambang terbuka, pencucian tumbunan (*heap leach*)

ABSTRACT

Simulations in open pit drainage/dewatering, flooding, and environmental impact assessments were carried out using groundwater flow models. In mining hydrogeology, the utility of numerical models is very limited because of the uncertainty associated with the assumptions of hydrogeological parameters and boundary conditions. Among them is a lack of data in identifying hydrogeological conditions, changes in rainfall and evaporation cycles, changes due to land management due to mining activities, changes in mining work schedules, and post-mining void flooding. Numerical modeling is a tool used in diagnosing, managing, and predicting water behavior in soil, which has become increasingly important in recent years. Although mathematical modeling has its advantages, mathematical modeling cannot be the source of all answers to all questions related to groundwater. Modelling is a dynamic tool that must always be developed for the continuous improvement process, to become a representation of natural phenomena. Thus, this review presents a methodological approach to find out the numerical model, overcoming its capabilities and limitations, in the case of different applications in the mining industry, such as open-pit drainage/dewatering and heap leach. Therefore, the purpose of this study through a literature review conducted is to determine how the application of groundwater modeling in an open-pit mining environment is based on the case study examples in this literature.

Keywords: Numerical model, modelling, mine drying, open pit, heap leach

1. PENDAHULUAN

Dalam permodelan alir air tanah alat yang paling sering digunakan untuk memprediksi air yang masuk kedalam operasi tambang yaitu model numerik hidrogeologi [12]. Untuk memprediksi model aliran air tanah penerapan yang dilakukan dalam permodelan numerik meliputi prediksi pengeringan tambang, studi kerentanan akuifer, drainase air asam tambang, dan juga drainase untuk pencucian timbunan [13].

Pemodelan air dapat memecahkan sejumlah masalah terkait air tanah yang dihasilkan dari operasi penambangan dan pasca tambang [1]. Akan tetapi aplikasi permodelan di tambang bawah tanah dan tambang terbuka memiliki ciri-ciri khusus yang harus diperhatikan dan membutuhkan pengetahuan yang mendalam tentang penambangan berkelanjutan. Studi pemodelan air tanah pada wilayah pertambangan dilatarbelakangi oleh perbedaan dari kegiatan penambangan apakah tambang tersebut aktif atau pada saat pascatambang [2].

Kondisi hidrologi pada lokasi tambang yang tergenang air dapat secara langsung dipengaruhi oleh perubahan pada kedua pola aliran airtanah pada batuan massif di area lubang bukaan tambang dan drainase alami yang terbentuk akibat perubahan geomorfologi (penurunan permukaan tanah di daerah yang rusak) [5]. Aplikasi Model numerik hidrogeologi pada model aliran air tanah digunakan untuk memprediksi penyaliran tambang, studi kerentanan lingkungan pada akuifer, air permukaan yang berhubungan dengan air asam tambang dan juga ketepatan dalam permodelan dipengaruhi kondisi hidrogeologi [11]. Wilayah operasi penambangan juga memerlukan strategi dalam meningkatkan penyaliran tambang yang efektif termasuk pembentukan aliran pembuangan dan kolam pengendapan, khususnya pengendalian kualitas dan kuantitas air yang berasal dari lokasi penambangan [3]. Aplikasi pemodelan sangat berguna dalam mengevaluasi dampak dari eksploitasi tambang dan kegiatan pascatambang pada air permukaan dan sistem air tanah berdasarkan parameter kuantitatif dan kualitatif [4].

Pada umumnya model aliran air tanah berbentuk tiga dimensi (3-D) dan simulasi yang dilakukan harus menggunakan model numerik 3-D agar bisa memodelkan aliran air tanah yang masuk kedalam tambang terbuka maupun tambang bawah tanah [14]. karena itu, sangat penting dalam membangun model konseptual hidrogeologi tiga dimensi. Di sisi lain, dalam proses irigasi dari pecucian timbunan dapat dipahami sebagai aliran vertikal dua dimensi (2-D) dan dapat disimulasikan secara sederhana dengan model numerik 2-D [15]. Proses drainase dari pecucian timbunan (*heap leach*) termasuk kedalam konsep media tak jenuh [16]. Dalam hal ini, parameter-parameter dikumpulkan untuk mensimulasikan model air tanah dengan model numerik 2-D.

Literatur review ini menunjukkan penjelasan singkat tentang metodologi pemodelan, parameter utama dari berbagai proyek, dan dua contoh sederhana aplikasi untuk tambang terbuka dan pecucian timbunan (*heap leach*). Karena itu, tujuan dari penelitian ini melalui literatur review yang dilakukan adalah untuk mengetahui bagaimana gambaran pengaplikasian permodelan air tanah pada lingkungan pertambangan tambang terbuka berdasarkan contoh studi kasus pada literatur ini.

2. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian dilakukan dengan metode literatur review. Literatur review merupakan proses pengumpulan informasi yang relevan dengan topik atau masalah yang menjadi objek penelitian. Informasi tersebut diperoleh dari beberapa jurnal, buku, ataupun tulisan yang berkaitan dengan penelitian dari studi pustaka yang direview sehingga menjadi kan tulisan yang berjudul pengaplikasian permodelan air tanah pada lingkungan pertambangan sebagai program pascasarjana.

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1 Batasan dan Masalah Aplikasi Pemodelan Air Tanah di Tambang

Aliran air tanah dalam permodelan matematik pada bongkahan untuk aplikasi permodelan menjadi rumit yang diakibatkan dari proses eksploitasi tambang [6]. Lubang void hasil dari bukaan tambang, aliran air tanah menjadi terganggu dan dalam kegiatan penimbunan, sehingga mengakibatkan perkiraan sifat hidraulik pada lajur aliran air tanah menjadi sulit untuk dilakukan dalam pekerjaan tambang.

Metode pendekatan yang digunakan pada pemodelan sangat tergantung pada skala aplikasi pemodelan. Dalam beberapa kasus telah dikembangkan beberapa model khusus yang digunakan untuk mensimulasi banjir besar yang terjadi pada tambang terbuka dan tambang bawah tanah dan keterkaitannya dari muka air tanah [10]. Fase perencanaan tambang merupakan salah satu dari banyaknya komponen yang ikut mempengaruhi dalam prediksi aliran air yang masuk ke tambang dari hasil kegiatan pengalihan permukaan tambang. bekas penambangan, urutan penambangan, kedalaman lubang, dan nilai fisik dari potongan yang telah diukur terjadi akibat siklus kegiatan pengalihan memberikan dampak terhadap air tanah [17].

Secara umum permodelan pada hidrogeologi pertambangan di banyak kasus menggunakan model munerik, terutama di pertambangan terbuka, batasan yang dimiliki dan ketidakpastian yang terkait dengan asumsi tegangan dan parameter dalam model. Faktor tersebut meliputi kekurangan dan variabilitas kondisi batas, parameter hidrogeologis dan spasial, imbuhan airtanah, jadwal penambangan, dan lain-lain [11]. Selain itu, untuk menghasilkan model yang baik harus didasarkan pada data masukan yang baik. Hal ini sangat penting untuk mendeskripsikan variabilitas dari spasial parameter hidraulik massa batuan dan fungsi dari kondisi batas [18]. Parameter hidraulik yang heterogenitas dan anisotropi merupakan masalah umum yang terdapat pada aplikasi pemodelan air tanah, dapat diselesaikan pada proses kalibrasi dan validasi model [19]. Dalam membuat model data yang dibutuhkan tidaklah selalu ada, secara umum data sangat terbatas dan sangat berbeda dari metodologi yang dikenal luas dalam permodelan.

Kegiatan eksplorasi geologi dilakukan pada area bekas pertambangan dimulai pada periode dimana belum adanya metode eksplorasi hidrogeologi yang lebih baik, sehingga mengakibatkan sedikitnya data yang bisa digunakan, dan bervariasinya data yang ada pada area dengan kepadatan tinggi telah dieksploitasi, yang mengakibatkan telah terganggu kondisi alaminya. Dan data yang digunakan berdasarkan penilaian dari beberapa ahli tidak begitu bisa diandalkan [20], contohnya debit pengurusan tidak terkendali.

3.2 Permodelan Pengeringan Tambang: Fakta dan Parameternya

Pada proses penyaliran tambang, potensi dampak lingkungan pada air tanah dan badan air permukaan, ataupun kondisi pasca-penambangan (pembentukan pit lake atau banjir tambang bawah tanah) dapat diprediksi dan dievaluasi dengan menggunakan model numerik 3-D. dan juga untuk analisis sensitivitas dan perencanaan kerja lapangan dapat menggunakan metode model numerik dalam permodelan [22].

Model numerik 3-D harus berdasarkan pada model konseptual, yang mana juga harus didasarkan pada karakterisasi dari data airtanah [23]. Data hidrogeologi yang dibutuhkan untuk karakterisasi model harus dikumpulkan di area yang berdekatan dengan badan bijih dan kedalaman setidaknya 50 m di bawah dasar akhir yang diusulkan dari tambang terbuka atau tambang bawah tanah [22]. Kedalaman ini harus dikonfirmasi berdasarkan hidrogeologi tertentu dari setiap proyek.

Dalam permodelan parameter penting untuk karakterisasi model adalah nilai konduktivitas yaitu termasuk nilai konduktivitas hidrolik horizontal (K_h) yang didapatkan dari unit hidrogeologi yang berbeda, sedangkan konduktivitas hidrolik vertikal (K_v) untuk unit tertentu, ketinggian air dalam perencanaan dan pada kedalaman yang berbeda (untuk memperkirakan gradien air tanah lateral dan vertikal), hubungan hidraulik antara sistem air tanah dan badan air permukaan, dan juga kimia air berdasarkan kedalamannya [11].

Kegiatan penggalian tambang dapat menimbulkan dampak yang serius pada sistem air tanah hingga kedalaman 10 km dari batas badan bijih atau lebih, yang mana juga tergantung dari parameter hidraulik pada sistem air tanah [24]. Lokasi yang dibutuhkan pada sistem drainase tambang dan perubahan permukaan air tanah, harus dilakukan dalam keadaan atau pada kondisi transien [25]. Pada kasus dimana lapisan semi permeabel antara akuifer, tiap lapisan dalam model harus berada dikeadaan terpisah [26]. pada MODFLOW, dalam simulasi sistem pengurusan tambang, waktu, spesifikasi variasi dan Head package dapat digunakan, sehingga memungkinkan pengguna dalam menentukan batas Head yang dapat berubah saat berada di antara periode stress [27].

Tabel 1. Perbandingan pendekatan yang dilakukan berdasarkan MODFLOW dan FEFLOW untuk mewakili kondisi model aliran air tanah dalam penyaliran bukaan tambang [21]

Kondisi	Pendekatan Modflow	Kekurangan (-) / Kelebihan (+) Pendekatan Modflow	Pendekatan Feflow	Kelebihan (+) / Kekurangan (-) Pendekatan FeFlow
Struktur geologi linier (faults, fractures)	Zona penyimpanan dan konduktivitas yang berbeda	(+) mudah dikerjakan, dan dimodifikasi (-) Sulit untuk menentukan tebal struktur tanpa menggunakan Mesh berkualitas tinggi (-) untuk memperkirakan Kemiringan struktur yang baik membutuhkan beberapa lapisan	<ul style="list-style-type: none"> • Zona penyimpanan dan konduktivitas yang berbeda • Fitur elemen diskrit 	Sama seperti pendekatan mudflow (+) akurat dalam menentukan struktur lapisan (-) untuk memperkirakan Kemiringan struktur yang baik membutuhkan beberapa lapisan
Pelebaran Pit	<ul style="list-style-type: none"> • Sangat bagus dalam finite difference blok • Waktu-head bervariasi, tergantung batas sel pada tiap lapisan yang berbeda 	(-) tidak stabil, dikarenakan grid tidak terautr (-) Persiapannya sulit (+) waktu simulasi perluasan pit bervariasi sehingga biak secara komputasi	<ul style="list-style-type: none"> • Sangat cocok dalam finite elemen blok • Posisi sel transfer berada diatas permukaan bergerak 	(+) akurat dan kuat dalam simulasi komputasi (+) Pengaturan sederhana (-) Variasi waktu simulasi perluasan pit sangat membutuhkan komputasi

Kondisi ditinggikan	<ul style="list-style-type: none"> Tidak memungkinkan 	-	<ul style="list-style-type: none"> persamaan aliran tak jenuh Konfigurasi irisan freatik 	(+) mendetail atau teliti (-) membutuhkan komputasi dan parameternya banyak (+) Sederhana dan kuat secara komputasi (-) tidak baik untuk aliran tak jenuh
Pengurasan sumur dengan bergantung dari hasil drawdown	<ul style="list-style-type: none"> Head tergantung dari batas sel pada setiap lapisan 	(+) Pengerjaan simple (-) garis drawdown tidak akurat karena terbatasnya grid yang digunakan (-) Tidak mungkin untuk mensimulasikan drawdown sumur	<ul style="list-style-type: none"> Laju dipaksakan, head tetap (konstan) pada nodes dalam lapisan yang berbeda 	(+) Pengerjaan simple (+) drawdown akurat dikarenakan menggunakan lokal grid. (-) tidak memungkinkan mensimulasikan drawdown sumur

3.3 Permodelan Aliran Tak Jenuh

Untuk model aliran tak jenuh, perlu diketahui sifat hidraulik tak jenuh dari material yang dilibatkan dalam pemodelan, seperti Kurva Karakteristik air tanah (SWCC) dan konduktivitas hidraulik tak jenuh (K_r (Ψ)). SWCC dapat diperkirakan melalui pengujian laboratorium, dengan menggunakan database atau dengan kurva distribusi ukuran butir material. Ada berbagai metode untuk menyesuaikan kurva swcc, di antaranya yang paling dikenal adalah yang dikembangkan oleh Brooks & Corey [28], Van Genuchten [29] dan Fredlund et al. [30]. Di antara ke tiga penulis ini hasil karya Fredlund yang paling baik dan dikenal. Fredlund juga menghasilkan metodologi yang telah dikembangkan untuk memperkirakan swcc berdasarkan distribusi ukuran butiran material dan database pengujian laboratorium untuk berbagai jenis tanah [30].

Konduktivitas hidrolik tak jenuh dapat diperkirakan dengan menggunakan beberapa persamaan tetapi yang dikembangkan oleh Van Genuchten adalah persamaan yang paling banyak digunakan. Persamaan ini menghubungkan tekanan pori negatif atau material dengan permeabilitas tak jenuh, berdasarkan konduktivitas hidrolik jenuh. Parameter yang terakhir harus diperkirakan dengan pengujian permeabilitas (in situ atau di laboratorium). Selain itu, karena permeabilitas tanah merupakan fungsi dari densitasnya, maka perlu diketahui rentang densitas yang akan digunakan dalam pemodelan dan dilakukan pengujian pada sampel yang dipadatkan sesuai dengan nilai densitas tersebut [29].

3.4 Permodelan Numerik

Contoh Kasus 1: Drainase Tambang Terbuka

Pada aliran pasif yang masuk dan hasil drawdown pasif untuk tingkat studi pra-kelayakan yang diperkirakan untuk dua lubang galian yaitu menggunakan model numerik 3-D. Lubang yang dianjurkan untuk digali yaitu pada kedalaman 20 m hingga 25 m di bawah permukaan air utama, sesuai dari urutan konduktivitas hidrolik sedimentasi terendah dengan air tanah di lokasi yang dangkal. Isi ulang (*recharge*) pada area berkurang karena penguapan berlangsung dengan cepat sehingga air yang masuk ke pit bersumber langsung dari tempat penyimpanan utama air tanah [11].

Penggalian lubang disimulasikan sebagai penggalian pertama kali pada langkah pertama simulasi. Kondisi seperti ini akan memberikan tekanan yang sangat tinggi pada sistem dan dalam memprediksi besarnya volume aliran air yang masuk ke pit pada awal simulasi. Namun, aliran masuk akan berkurang dan stabil setelah beberapa hari waktu berjalan. Dari banyaknya cakupan model dan tingkat pra-kelayakan, Latihan simulasi yang dilakukan memiliki data lapangan yang sangat terbatas dan difokuskan untuk mendapatkan ilmu pengetahuan awal tentang situasi dan kondisi pada air tanah, yang kemudian lubang ini akan di analisis menggunakan permodelan numerik 3-D. Ini merupakan salah satu pendekatan yang dapat diterima berdasarkan dari hasil perakiraan tingkat kelayakannya

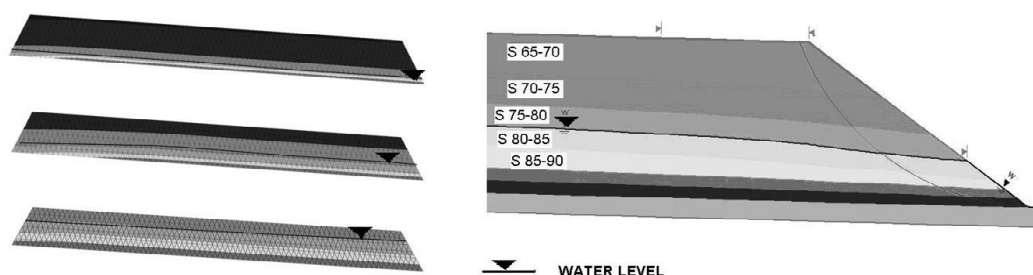
Dari hasil studi beberapa literatur yang dilakukan dalam proses dewatering tambang terbuka, pengalihan lubang dari hasil kegiatan tambang menjadi masalah yang cukup rumit, waktu dan biaya yang

dibutuhkan tidak lah kecil untuk mengurangi jumlah aliran air yang masuk ke dalam pit, dan juga simulasi permodelan yang dilakukan dalam dewatering tambang terbuka kebanyakan menggunakan permodelan numerik 3-D

Kasus 2: Pencucian Timbunan (*Heap Leach*)

Perilaku pencucian timbunan dari hasil irigasi (baik di atas maupun di lereng) dievaluasi untuk memaksimalkan perolehan tembaga. Dari data historis dipelajari dalam menentukan materi variabel. Sampel diambil pada waktu pencucian dan setelah pencucian untuk dipilih berdasarkan karakternya melalui pengujian hidraulik dan memperkirakan distribusi ukuran butir berdasarkan Kurva Karakteristik Air Tanah (SWCC) [30]. Distribusi kejenuhan pada tumpukan dari hasil irigasi diperkirakan dengan menggunakan model numerik FEFLOW 2-D [31]. Melalui model ini, efek dari lereng irigasi dapat diidentifikasi melalui perilaku aliran air pada kaki pencucian timbunan. Dan juga terakhir dapat digunakan untuk memperkirakan faktor keamanan dari kemiringan lereng.

Jenis model numerik ini juga memungkinkan untuk membuat analisis sensitivitas dari hasil bahan yang berbeda dan untuk mengevaluasi bahan mana yang dapat menghasilkan garis freatik tinggi pada pencucian tumpukan. (Gambar 1). Berdasarkan analisis yang didapat freatik yang tinggi yang dapat memberikan dampak negatif pada pencucian. Dan juga, dalam hal ini, aliran pencucian yang diamati meninggalkan hasil endapan yang tertumpuk pada aliran sistem drainase. Analisis sensitivitas yang terlibat dalam pengurangan parameter Van Genuchten “a”, yang bisa membuat tanah dapat menjaga lebih banyak kelembaban. Pengkalibrasian model numerik Feflow 2D ini dapat dilakukan untuk mengukur aliran pada sistem drainase, garis freatik, dan pengukuran kadar air pada tumpukan dengan piezometer dan kedalaman (Diviner, GEM2) [32]



Gambar 1. Model dari Pencucian Timbunan (*heap leach*), (a) Perbedaan tinggi air pada tumpukan (b) analisis kestabilan lereng. [11]

4 KESIMPULAN

Dari proses *literatur review* ini didapatkan hasil bahwa dalam pengaplikasian permodelan aliran air tanah pada tambang terbuka sangatlah terbatas, dikarenakan data dilapangan sangat lah terbatas dan cakupan untuk permodelan dalam tambang hidrogeologi sangat terbatas, dapat dilihat dari beberapa literatur kebanyakan kasus yang terkait dengan permodelan sangat lah sedikit dalam pertambangan, dan permodelan yang paling sering digunakan pada tambang adalah permodelan numerik 3-D. Permodelan aliran air tanah numerik harus didasarkan pada model konseptual yang dimatangkan dan divalidasi oleh data empiris.

UCAPAN TERIMAKASIH

Dalam penyusunan paper ini tidak terlepas dukungan dari berbagai pihak khususnya Kepada Prodi Magister Teknik Pertambangan UPN “Veteran” Yogyakarta. Serta penulis menyampaikan terimakasih kepada LPPM UPN “Veteran” Yogyakarta yang telah mendanai sepenuhnya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yang, T.H., Liu, J., Zhu, W.C., Elsworth, D., Tham, L.G. and Tang, C.A., 2007. A coupled flow-stress-damage model for groundwater outbursts from an underlying aquifer into mining excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(1), pp.87-97.
- [2] Franks, D.M., Boger, D.V., Côte, C.M. and Mulligan, D.R., 2011. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources policy*, 36(2), pp.114-122.
- [3] Skousen, J.G., Sexstone, A. and Ziemkiewicz, P.F., 2000. Acid mine drainage control and treatment. *Reclamation of drastically disturbed lands*, 41, pp.131-168.

- [4] Salmi, E.F., Nazem, M. and Karakus, M., 2017. The effect of rock mass gradual deterioration on the mechanism of post-mining subsidence over shallow abandoned coal mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 91, pp.59-71.
- [5] Bulgăreanu, V.A., 1996. Protection and management of anthroposaline lakes in Romania. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 2(3-4), pp.211-229.
- [6] Dychkovskiy, R.O., Lozynskiy, V.H., Saik, P.B., Petlovanyi, M.V., Malanchuk, Y.Z. and Malanchuk, Z.R., 2018. Modeling of the disjunctive geological fault influence on the exploitation wells stability during underground coal gasification. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18, pp.1183-1197.
- [7] Murdoch, L.C. and Slack, W.W., 2002. Forms of hydraulic fractures in shallow fine-grained formations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(6), pp.479-487.
- [8] Sahimi, M., 2011. *Flow and transport in porous media and fractured rock: from classical methods to modern approaches*. John Wiley & Sons.
- [9] Adams R., Younger P.L. (2001). A strategy for modelling groundwater rebound in abandoned deep mine systems. *Ground Water* 39(2), 249-261.
- [10] Rapantova, N., Grmela, A., Vojtek, D., Halir, J. and Michalek, B., 2007. Ground water flow modelling applications in mining hydrogeology. *Mine water and the environment*, 26(4), pp.264-270.
- [11] Martinez, C., 2010, June. Groundwater Flow Modelling Applications in Mining: Scopes and Limitations. In *Proceedings of the 2nd International Congress on Water Management in the Mining Industry, Santiago, Chile* (pp. 9-11).
- [12] Zhou, Y. and Li, W., 2011. A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience frontiers*, 2(2), pp.205-214.
- [13] Ramasamy, M., Power, C. and Mkandawire, M., 2018. Numerical prediction of the long-term evolution of acid mine drainage at a waste rock pile site remediated with an HDPE-lined cover system. *Journal of contaminant hydrology*, 216, pp.10-26.
- [14] Storey, R.G., Howard, K.W. and Williams, D.D., 2003. Factors controlling riffle-scale hyporheic exchange flows and their seasonal changes in a gaining stream: A three-dimensional groundwater flow model. *Water Resources Research*, 39(2).
- [15] Connell, L.D., Jayatilaka, C., Gilfedder, M., Mein, R.G. and Vandervaere, J.P., 2001. Modeling flow and transport in irrigation catchments: 1. Development and testing of subcatchment model. *Water Resources Research*, 37(4), pp.949-963.
- [16] Kampf, S.K., Salazar, M. and Tyler, S.W., 2002. Preliminary investigations of effluent drainage from mining heap leach facilities. *Vadose Zone Journal*, 1(1), pp.186-196.
- [17] Zhao, L., Ren, T. and Wang, N., 2017. Groundwater impact of open cut coal mine and an assessment methodology: A case study in NSW. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(5), pp.861-866.
- [18] Samaniego, L., Kumar, R. and Attinger, S., 2010. Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46(5).
- [19] Carrera, J., 1993. An overview of uncertainties in modelling groundwater solute transport. *Journal of contaminant hydrology*, 13(1-4), pp.23-48.
- [20] MacDonald, A.M., Davies, J. and Ó Dochartaigh, B.É., 2001. Simple methods for assessing groundwater resources in low permeability areas of Africa.
- [21] Alloisio, S.A.R.A.H., Douglas, B., McKittrick, R. and Prigneau, P., 2004. Groundwater modelling for large-scale mine dewatering in Chile: MODFLOW or FEFLOW.
- [22] Martinez, C. and Ugorets, V., 2010. Use of numerical groundwater modelling for mine dewatering assessment. *WIM Santiago, Chile*, pp.318-326.
- [23] Kupfersberger, H. and Deutsch, C.V., 1999. Methodology for integrating analog geologic data in 3-D variogram modeling. *AAPG bulletin*, 83(8), pp.1262-1278.
- [24] Neuzil, C.E., 1986. Groundwater flow in low-permeability environments. *Water Resources Research*, 22(8), pp.1163-1195.
- [25] Coppola Jr, E., Szidarovszky, F., Poulton, M. and Charles, E., 2003. Artificial neural network approach for predicting transient water levels in a multilayered groundwater system under variable state, pumping, and climate conditions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(6), pp.348-360.
- [26] Li, H. and Jiao, J.J., 2001. Analytical studies of groundwater-head fluctuation in a coastal confined aquifer overlain by a semi-permeable layer with storage. *Advances in Water Resources*, 24(5), pp.565-573.
- [27] Hoffmann, J., Leake, S.A., Galloway, D.L. and Wilson, A.M., 2003. *MODFLOW-2000 ground-water model--User guide to the subsidence and aquifer-system compaction (SUB) package* (No. USGS-03-233). Geological Survey Washington DC.

-
- [28] Brooks, R. H. & Corey. A. T. (1964) *Hydraulic Properties of Porous Media*. Hydrol. Pap. 3. Colorado State Univ., Fort Collins
- [29] Van Genuchten, M. T. (1980) *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*. Soil Sci. Am. J. 44: 892-898
- [30] Fredlund, D. G., Xing, A. & Huang, S. (1994) *Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soil using the Soil-water Characteristic Curve*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No. 3, pp. 533-546
- [31] wasy Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd. (2006) *feFLOW* Software (version 5.2)
- [32] Diersch, H.J.G., 2013. *FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer Science & Business Media.