

Aplikasi penggunaan Metode Finite Difference dalam pemodelan air tanah pada kasus pertambangan : literatur review

Application of the Finite Difference Method in groundwater modeling in mining cases: literature review

Hana Trijayanti*, Tedy Agung Cahyadi, Rika Ernawati
Magister Teknik Pertambangan Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta
Jalan Padjajaran (SWK) No. 104 Sleman 55283 Indonesia
e-mail: *trihananas@gmail.com

ABSTRAK

Pada area kegiatan penambangan terdapat berbagai macam kasus yang berkaitan dengan hidrogeologi. Permasalahan tersebut dapat diselesaikan dengan metode perhitungan numerik, yaitu *finite difference*. Finite difference digunakan kedalam Visual Modflow dengan membangun suatu model hidrogeologi. Dalam pemodelan Visual Modflow, tahapan yang dilakukan yaitu persiapan model konseptual, menetapkan batas area pemodelan, kalibrasi dan validasi. Pemodelan dapat diaplikasikan untuk menyelesaikan kasus air tanah pada pertambangan yaitu pemodelan air tanah setelah dilakukan penambangan, pemasangan drain hole pada dinding *pit*, pemodelan air tanah untuk kegiatan dewatering, intrusi air laut akibat adanya penambangan dan pemodelan sebaran kontaminan akibat kolam *tailing* penambangan. Pemodelan tersebut dapat menjadi acuan dalam monitoring, pengendalian, dan pemanfaatan terkait dengan pengelolaan dan perlindungan air tanah.

Kata-kata kunci: air tanah, hidrogeologi, model, modflow, penambangan

ABSTRACT

In the mining activity area there are various cases related to hydrogeology. These problems can be solved by numerical calculation method, namely finite difference. Finite difference is used into Visual Modflow by building a hydrogeological model. In Visual Modflow modeling, the steps taken are the preparation of the conceptual model, setting the boundaries of the modeling area, calibration and validation. Modeling can be applied to solve groundwater cases in mining, namely groundwater modeling after mining, installation of drain holes on pit walls, groundwater modeling for dewatering activities, seawater intrusion due to mining and contaminant distribution modeling due to mining tailings ponds. The modeling can be used as a reference in monitoring, controlling, and utilization related to groundwater management and protection.

Keywords: groundwater, hydrogeology, model, modflow, mining

PENDAHULUAN

Permasalahan pada air tanah seringkali dihadapkan dengan hal yang kompleks. Letaknya yang berada di bawah permukaan banyak dipengaruhi oleh berbagai faktor secara fisika maupun kimia yang dapat mengubah karakteristik dari air tanah. Dalam pengembangannya sifat dan karakteristik dari air tanah dapat diketahui dengan menggunakan berbagai macam model perhitungan, salah satunya yaitu dengan model numerik. Model numerik dapat dihitung berdasarkan Metode Perbedaan Hingga (*Finite Difference*), dengan menetapkan nilai parameter hidrogeologi menjadi titik (node) dalam suatu domain. *Finite Difference* merupakan penjabaran dari persamaan Laplace dengan didasari konsep blok tiga dimensi (Anderson dkk, 2015).

Finite Difference membutuhkan penyederhaan data lapangan yang tinggi, maka diperlukan suatu simulasi model yang dibuat kedalam bentuk yang efisien dengan perangkat lunak khusus, yaitu VisualModflow. Pemodelan dapat menjadi gambaran mengenai kondisi yang sebenarnya terjadi di lapangan dan dapat memberikan

pemahaman tentang karakteristik air tanah. Visual Modflow untuk pertamakali diperkenalkan oleh Waterloo Hydrogeologic pada bulan Agustus 1994, dengan mengembangkan konsep model air tanah yang ditemukan oleh Darcy (Hariharan, 2017). Komponen yang diamati pada konsep air tanah yaitu adanya perbedaan *head hidrolis* yang digunakan untuk mencari arah dan kecepatan aliran berdasarkan Hukum Darcy (Masud, 2002). Berdasarkan Hukum Darcy, konduktivitas hidrolis batuan merupakan sifat penting dalam pergerakan air tanah.

Pengembangan pemodelan air tanah telah banyak digunakan pada kasus yang terjadi pada pertambangan. Aplikasi pemodelan sangat berguna untuk mengevaluasi dampak kegiatan eksploitasi hingga penutupan tambang terhadap air permukaan dari sudut pandang kuantitatif dan kualitatif (Rapantova, 2007). Area tambang yang nampak tergenang dapat dilakukan investigasi mendalam melalui simulasi pemodelan berbentuk perubahan pola aliran air tanah untuk mengetahui asal mula dan pergerakan aliran air, hingga pembuatan simulasi pergerakan kontaminan yang berasal dari air asam tambang.

METODOLOGI

Tahapan penelitian 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 dilakukan pengkajian.

HASIL DAN DISKUSI

Pemodelan Visual Modflow didasarkan pada metode perhitungan beda hingga (Finite Difference). Dalam metode *Finite Difference* disimulasikan dengan indeks *i, j, k* yang mewakili kolom, baris, lapisan, dan simbol node (titik) didalam ruang 3D (Gambar 1.). Jarak node di sepanjang baris ditentukan oleh Δx , spasi sepanjang kolom ditentukan oleh Δy , dan spasi antar lapisan ditentukan oleh Δz .

Pada gambar (a), ditampilkan dalam bentuk 2D, node terletak di pusat dalam sel atau blok *Finite Difference*, yang merupakan simbol yang mewakili *head* di blok tersebut. *i* merupakan kolom dan *j* merupakan baris. Garis hitam yang melingkar mewakili domain masalah. Sel atau blok yang berada diluar garis batas domain merupakan sel yang tidak aktif. Pada gambar (b), ditampilkan dalam bentuk 2D, membentuk kelompok lima node dengan pusat node berada ditengah (*i,j*). Pada gambar (c), ditampilkan dalam bentuk 3D, dimana Δz mewakili jarak vertikal antar node, dan *k* adalah indeks vertikal. Sehingga dapat terlihat pusat node dalam 3D yaitu berada di tengah ($h_{i,j,k}$), akan dipengaruhi oleh faktor dari 7 node di sekelilingnya.

Bentuk persamaan *Finite Difference* dituliskan dengan Persamaan 1. dari persamaan diferensial yang mewakili aliran air tanah 3D untuk kondisi heterogen dan anisotrop : (Anderson dkk, 2015).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kx \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Ky \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Kz \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W = Ss \frac{\partial h}{\partial t}$$

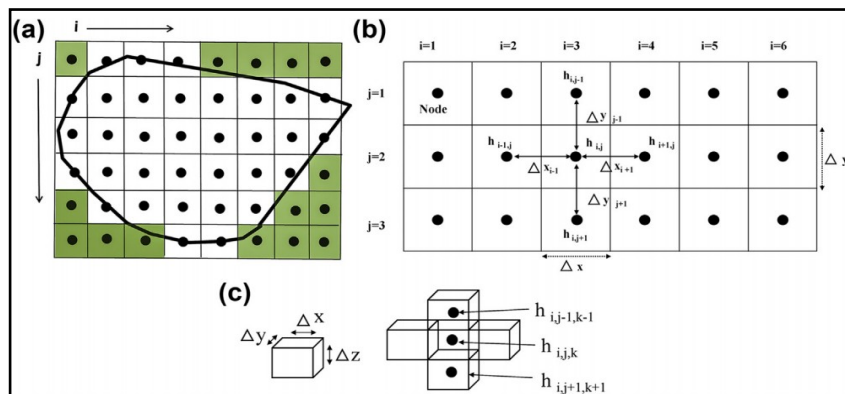
Dimana:

- Kx, Ky, Kz = Konduktivitas hidrolik pada arah
- x,y,z (LT^{-1}) h = Tinggi muka air tanah (L)
- W = Flux dengan menghitung faktor penambah, contoh : pemompaan atau penambahandari sumber lain (L^3T^{-1})
- Ss = *Specific storage* (LT^{-1})
- x, y, z = Arah koordinat
- t = Waktu (T)

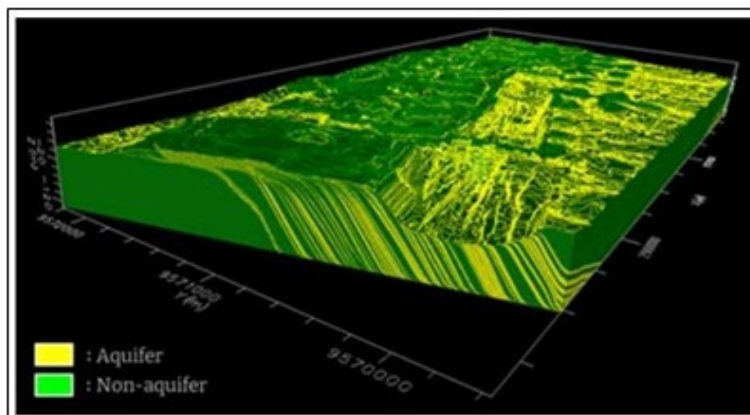
Tahapan pemodelan Visual Modflow memerlukan persiapan awal, yang terdiri dari pembuatan model konseptual, penentuan kondisi batas model, kalibrasi dan validasi model.

A. Model Konseptual

Model konseptual hidrogeologi adalah representasi dari sistem air tanah yang digabungkan dengan interpretasi kondisi geologi, hidrologi, serta keseimbangan air (*water balance*). Model tersebut dapat memberikan info karakteristik bawah permukaan dan membantu mengurangi ketidakpastian yang mengatur aliran air tanah dan transport kontaminan di daerah penelitian (Torres, 2020). Contoh dari hasil pembuatan konseptual model dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar-1. Grid dan Notasi Beda Hingga (*Finite Difference*) (Anderson dkk, 2015)



Gambar-2. Konseptual Model (Fadhilah, 2020)

Dalam konseptual model dapat terlihat berupa bangun tiga dimensi yang membentuk suatu komponen ‘wadah’ atau pelapisan litologi yang ada pada daerah tersebut, sehingga hal ini dapat menjadi salah satu acuan dalam mengasumsi kondisi hidrogeologi di daerah tersebut.

B. Kondisi Batas Model

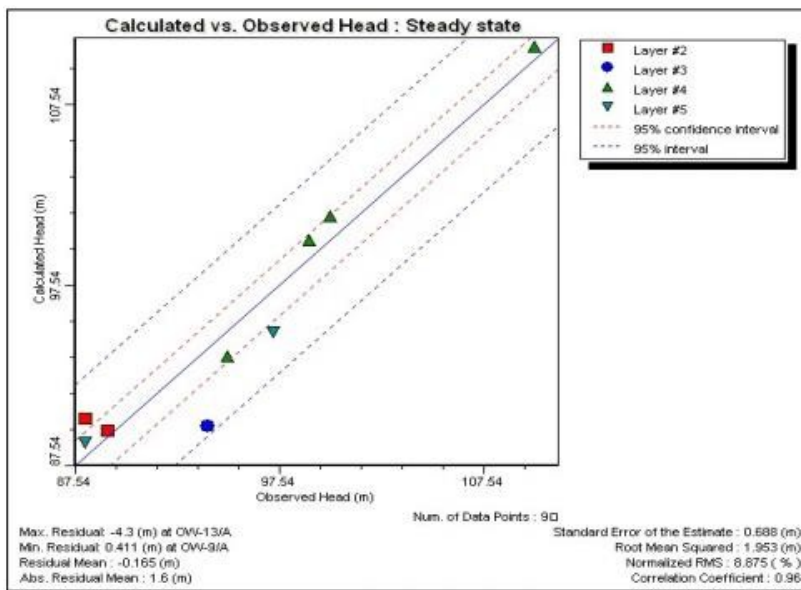
Kondisi batas simulasi numerik digunakan untuk menggambarkan kondisi fisik batas rembesan, yaitu kondisi muka air tanah yang dianggap konstan dari daerah rembesan. Infiltrasi curah hujan adalah sumber yang utama di wilayah penelitian (Xie dkk, 2020). Kondisi batas didapat berdasarkan kondisi alam yang mendukung pada wilayah penelitian, seperti daerah pegunungan, batas lapisan stratigrafi, kontur, danau dan sungai, sebab lebih mudah untuk diidentifikasi dan dikonsepskan.

C. Kalibrasi dan Validasi Model

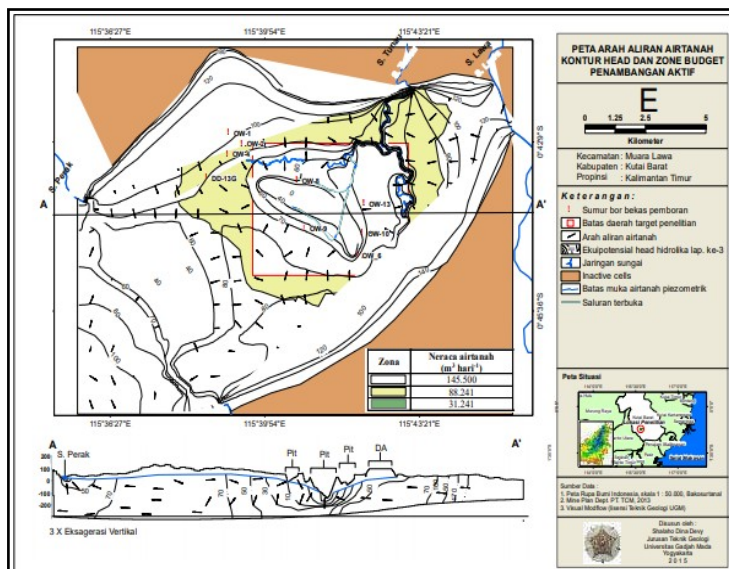
Hasil perhitungan numerik dalam software memiliki perbedaan jika dibandingkan dengan kondisi yang sebenarnya di lapangan, sehingga akan ditemukan beberapa kesalahan pada saat proses pembuatan model. Maka,

dilakukan kalibrasi model agar sesuai dengan kondisi di lapangan. Selama proses kalibrasi dalam pemodelan ini, nilai konduktivitas hidrolis atau *groundwater recharge* akan disesuaikan dalam model sesuai dengan tinggi air tanah simulasi dan air tanah terukur. Kalibrasi ini akan membandingkan *hydraulics head* hasil perhitungan simulasi *Modflow* dengan Metode *Root Mean Square Error (RMSE)* yang telah tersedia di *software*. Model yang dikalibrasi harus memberikan hasil yaitu nilai RMSE yang minimal dan memiliki kecocokan antara *head* yang terukur di lapangan dengan yang dimodelkan (Tahershami, 2018). Nilai RMSE dapat dilihat pada grafik scatter, seperti Gambar 3. Jika telah terkalibrasi, maka model telah tervalidasi dan siap untuk tahapan selanjutnya yaitu prediksi pola aliran air tanah.

Setelah model konseptual telah terkalibrasi dan tervalidasi, maka selanjutnya model dapat diaplikasikan untuk berbagai tujuan pengembangan *research*, seperti identifikasi pola aliran air tanah, pembuatan *drain hole*, hingga simulasi penyebaran kontaminan. Berikut merupakan contoh hasil penelitian dengan menggunakan Metode Finite Different pada area pertambangan.



Gambar-3. Diagram Scatter Setelah Terkalibrasi (Devy, 2018)



Gambar-4. Pola Aliran Airtanah dan Zona Neraca Airtanah Penambangan Aktif (Devy, 2018)

a. Pemodelan Air Tanah Setelah Terjadinya Penambangan Batubara Openpit

Tata guna lahan akan berpengaruh terhadap ketersediaan air tanah secara kuantitas maupun kualitas. Perubahan pola aliran air tanah pada daerah penelitian dipengaruhi oleh faktor struktur geologi dan kegiatan penambangan *open pit*. Setelah dilakukan kegiatan penambangan batubara *open pit*, terjadi perubahan morfologi dan geologi sehingga mempengaruhi aliran air tanah. Setelah dilakukan pemodelan menggunakan Visual Modflow didapatkan bahwa terjadi variasi terhadap nilai *head hidrolik*, dimana terjadi perubahan pola aliran air tanah menuju *pit* penambangan, muka air tanah menurun, dan kenaikan neraca air tanah yang disebabkan perubahan tata guna lahan (Devy, 2018) (Gambar 4).

b. Pemasangan Drain Hole pada Dinding Pit

Dinding pit penambangan selalu dihadapkan dengan kasus kelongsoran, terlebih pada kondisi dinding yang jenuh air dan terjadi rembesan. Air yang berada pada dinding tersebut dapat diminimalisir dengan pemasangan drain hole. *Drain hole* merupakan salah satu upaya dalam menurunkan muka airtanah dengan memanfaatkan gaya gravitasi. Dalam pemasangan *drain hole* pada dinding pit terdapat beberapa perkiraan yang dilakukan dengan suatu perancangan, agar fungsi dari *drain hole* dapat maksimal dan pemasangan yang seefisien mungkin. Perencanaan desain drain hole dapat menggunakan perhitungan finite difference dengan model Visual Modflow. Dilakukan simulasi model terhadap nilai konduktivitas hidrolik, *recharge*, *discharge*, diameter pipa, dan panjang pipa. Maka, didapatkan hasil penurunan muka air tanah yang dihasilkan karena pemasangan *drain hole* dan dapat menentukan jumlah dan jarak dari setiap *drain hole* yang akan dipasang pada dinding pit tambang (Alvando, 2017). Jika jarak antar drain hole semakin rapat, maka akan terjadi peningkatan penurunan muka air tanah. Namun disisi lain, semakin rapat jarak antar drain hole akan menurunkan kekuatan lereng sebab daya dukung lereng tersebut akan semakin hialang akibat pemasangan drain hole tersebut (Fadhila, 2020).

c. Pemodelan Air Tanah untuk Kegiatan Dewatering Tambang

Kegiatan penambangan memerlukan kondisi area kerja yang tidak memiliki banyak genangan air. Untuk tetap berada pada kondisi area tambang yang kering, maka diperlukan suatu upaya untuk mengeluarkan air yang telah terlanjur masuk kedalam *pit* tambang, dengan cara *mine dewatering*. Mine dewatering tidak terlepas dari fungsi pemompaan, sehingga diperlukan suatu perhitungan yaitu debit pompa dan dilakukan perhitungan lamanya waktu yang dibutuhkan untuk memompa (Adnyano, 2020).

Kegiatan dewatering memiliki dampak yang signifikan terhadap keseluruhan biaya produksi tambang. Maka, rencana kegiatan dewatering yang efektif dapat mengurangi biaya produksi dengan jumlah yang cukup besar. Pemodelan aliran air tanah numerik dapat digunakan untuk membantu dalam membuat rencana desain dewatering dengan mensimulasikan muka air tanah dan aliran rembesan. Hal ini bertujuan untuk mengidentifikasi lokasi dan jadwal pemompaan untuk dewatering sumur dan untuk menilai kinerja metode dewatering sebelumnya.

Rencana dewatering dapat dirancang menggunakan Visual Modflow dengan memperhatikan kondisi drainase dan fluktuasi muka air tanah pada sumur. Dengan

memperhatikan fluktuasi muka air tanah, kemudian dapat dilakukan suatu prediksi untuk waktu dan jumlah pompa pada saat proses dewatering. Muka air tanah yang tinggi dapat memberi asumsi bahwa jumlah air yang akan masuk kedalam *pit* akan meningkat, begitupun sebaliknya. Maka, dibutuhkan rencana dengan dasar perhitungan dari Visual Modflow untuk dapat memperkirakan kebutuhan pompa yang akan digunakan (Alloisio, 2014).

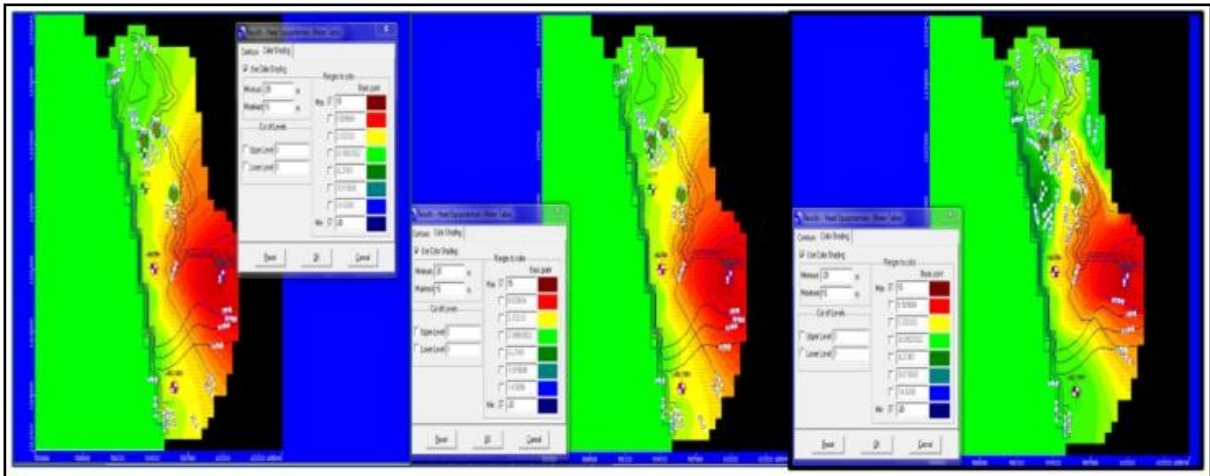
d. Intrusi Air Laut Akibat Penambangan

Ketersediaan air tanah di daerah pesisir memiliki kuantitas dan kualitas yang cenderung minim. Aktivitas produksi sumur air tanah hingga adanya kegiatan penambangan di daerah pesisir dapat berpengaruh terhadap gerakan air laut yang semakin mendesak menuju daratan, yang disebut dengan intrusi air laut. Aktivitas penambangan terkhusus pada proses penggalian *pit* yang semakin dalam dan semakin dekat permukaan laut dan didukung dengan pemanfaatan sumur warga yang tinggi pada daerah pesisir, dapat berpotensi membuka jalur air laut akan masuk ke dalam sumur produksi yang digunakan warga sekitar untuk keperluan sehari (Gambar 5). Untuk mengatasi kebutuhan air tanah, dapat dilakukan suatu simulasi intrusi air laut dengan menggunakan Visual Modflow. Simulasi dibuat dengan beberapa pertimbangan yaitu keselarasan antara nilai *recharge*, *push back* penambangan, dan jumlah pemanfaatan air sumur pada sumur warga didukung dengan uji kualitas air. Simulasi dapat dirancang untuk membuat suatu prediksi jangka panjang dari jarak pergerakan intrusi air laut yang berada di air tanah (Sajeena, 2020).

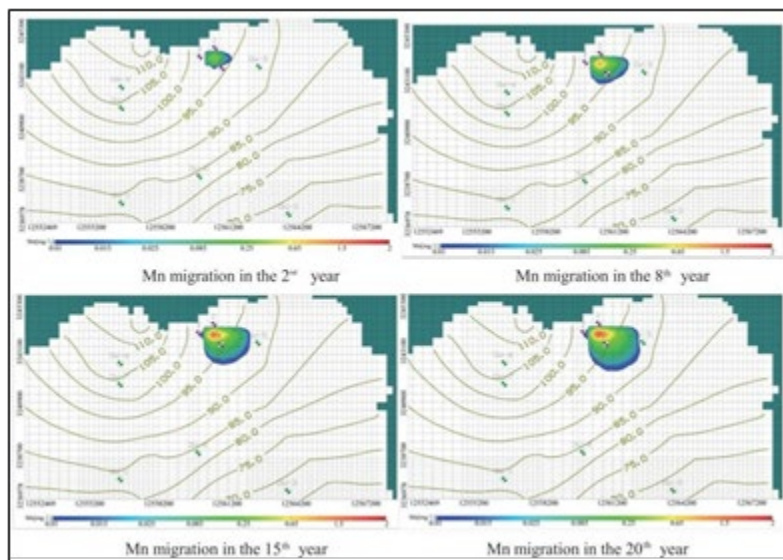
e. Pemodelan Sebaran Kontaminan Akibat Kolam Tailing

Seiring berjalannya waktu, kualitas air tanah akan semakin menurun oleh adanya suatu zat akibat dari kegiatan penambangan. Setiap komoditas tambang akan menghasilkan sisa (*tailing*) dengan karakteristik yang bervariasi dan tergolong limbah. *Tailing* yang mengandung logam berat dikumpulkan dalam suatu kolam. Unsur logam berat pada kolam *tailing* dapat bereaksi secara fisika dan kimia, seperti difusi, dispersi, desorpsi dan disosiasi membentuk suatu kontaminan (Zhang dkk, 2018). Kontaminan ini dapat bermigrasi keluar dari kolam penampung *tailing* menuju sungai maupun meresap ke air tanah dan dapat terbawa hingga puluhan kilometer (Bortnikova dkk, 2013). Hal ini tidak ramah lingkungan apabila kontaminan dapat menembus dan terakumulasi ke dalam air tanah yang digunakan oleh masyarakat.

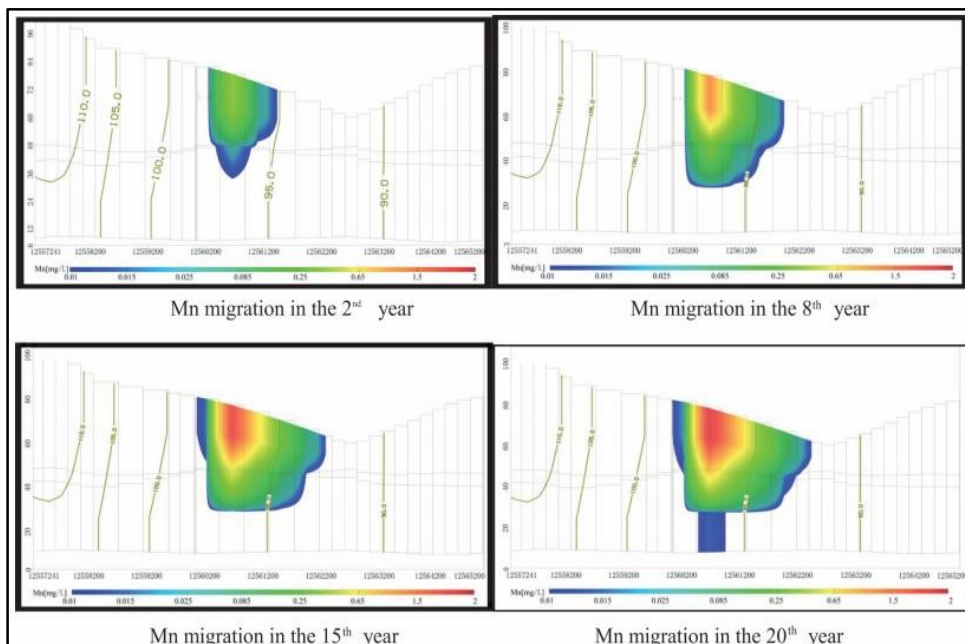
Identifikasi mengenai karakteristik dan mekanisme pergerakan dari kontaminan yang ada pada air tanah akibat dari kolam *tailing* tersebut dapat diterapkan dengan metode numerik Beda Hingga membentuk suatu model yang dibantu dengan perangkat lunak Visual Modflow (Xie dkk, 2020). Model dapat dirancang untuk simulasi sebaran kontaminan pada jangka waktu kedepan sesuai dengan rencana penelitian. Simulasi dibuat dengan beberapa pertimbangan dan asumsi terhadap model konseptual yang terdiri dari pengaruh karakteristik hidrostratigrafi, *recharge*, dan waktu produksi tambang didukung dengan data uji kualitas pada air kolam *tailing*, air sungai, dan sedimen sungai terdekat. Hasil dari simulasi dapat menunjukkan pola pergerakan sebaran kontaminan yang dapat diketahui melalui waktu dan jarak yang dibutuhkan pada sebaran kontaminan tersebut (Xie dkk, 2020) (Gambar 6 dan Gambar 7).



Gambar-5. Peta kontur muka air yang diprediksi setelah meningkatkan laju pemompaan (Sajeena, 2020)



Gambar-6. Prediksi Sebaran Mangan pada Air Tanah Dalam 20 Tahun (Tampak Horizontal) (Xie dkk,2020)



Gambar-7. Prediksi Sebaran Mangan pada Air Tanah Dalam 20 Tahun (Tampak Vertikal) (Xie dkk,2020)

KESIMPULAN

Finite Difference merupakan metode dasar yang digunakan pada perangkat lunak Visual Modflow. Visual Modflow dapat merancang sebuah model hidrologi, dimana terdapat beberapa tahapan dalam membangun model tersebut. Model konseptual adalah hal yang paling mendasar dalam rancangan model yang dilakukan dengan Visual Modflow. Dalam konseptual model terdiri atas lapisan litologi yang dapat dikelompokkan menjadi komponen lapisan unit hidrostratigrafi yang memiliki karakteristik yang berupa konduktivitas hidrolik batuan, porositas, dan struktur geologi yang mempengaruhi posisi lapisan batuan. Dibutuhkan pula batasan dalam pemodelan yang dapat berupa dataran tinggi atau sungai yang disebut dengan *constant head*. Selanjutnya, dilakukan kalibrasi yang bertujuan untuk menyesuaikan kondisi model dengan keadaan yang sebenarnya di lapangan. Hasil kalibrasi dapat dilihat pada persentase RMSE pada grafik scatter yang memiliki nilai rendah. Jika nilai RMSE rendah, maka model tersebut telah terkalibrasi dan dinyatakan valid untuk dilakukan berbagai simulasi model selanjutnya.

Modflow dapat diaplikasikan untuk merancang simulasi dan prediksi pada kasus hidrogeologi yang terdapat di tambang, sehingga langkah tersebut dapat dijadikan acuan sebagai upaya terbaik dalam monitor, pengendalian, serta pemanfaatan terkait pengelolaan dan perlindungan airtanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta yang telah mendanai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied Groundwater Modeling: Simulation Of Flow And Advective Transport*. Academic Press. London.
- [2] Devy, S. D. (2018). Pemodelan airtanah dan Neraca Airtanah Dampak Penambangan Batubara Open Pit pada Lipatan Sinklin di Daerah Muara Lawa, Kabupaten Kutai Barat, Provinsi Kalimantan Timur. *SPECTA Journal of Technology*, 2(2), 69-83.
- [3] Alvando, P. V., Darul, A., & Irawan, D. E. (2017). Pemodelan Dampak Pemasangan Inclined Drain Hole Pada Wall Pit Pt Xxx Terhadap Penurunan Muka Airtanah.
- [4] Fadhilah, R., Widodo, L. E., & Iskandar, I. (2020). Pengaruh Jarak Antar Drain Hole Terhadap Penurunan Muka Air Tanah pada Lereng Tambang Terbuka Batubara. *Journal of Science and Applicative Technology*, 4(2), 116-120.
- [5] Alloisio, S. A. R. A. H., Douglas, B., McKittrick, R., & Prigneau, P. (2004). Groundwater modelling for large-scale mine dewatering in Chile: MODFLOW or FEFLOW.
- [6] Adnyano, A. I. A., & Bagaskoro, M. (2020). Kajian Teknis Dewatering System Tambang Pada Pertambangan Batubara. PROMINE.
- [7] Sajeena, S., & Swathy, P. S. (2020). Studies on saline water intrusion in the coastal stretch of Kadalundi river basin, Malappuram district, Kerala using visual MODFLOW—A case study.
- [8] Hariharan, V., & Shankar, M. U. (2017). A review of visual MODFLOW applications in groundwater modelling. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 263, No. 3, p. 032025). IOP Publishing. India.
- [9] Rapantova, N., Grmela, A., Vojtek, D., Halir, J., & Michalek, B. (2007). Ground water flow modelling applications in mining hydrogeology. *Mine water and the environment*, 26(4), 264-270. Italy.
- [10] Alloisio, S. A. R. A. H., Douglas, B., McKittrick, R., & Prigneau, P. (2004). Groundwater modelling for large-scale mine dewatering in Chile: MODFLOW or FEFLOW. Water Management Consultants .Chile.
- [11] Zhang, X., Yang, H., & Cui, Z. (2018). Evaluation And Analysis Of Soil Migration And Distribution Characteristics Of Heavy Metals In Iron Tailings. *Journal Cleaner Production Vol. 172*. USA.
- [12] Bortnikova, S., Yurkevich, N., Bessonova, E., Karin, Y., & Saeva, O. (2013) : The Combination Of Geoelectrical Measurements And Hydro-Geochemical Studies For The Evaluation Of Groundwater Pollution In Mining Tailings Areas. *Threats To The Quality Of Groundwater Resources*. Springer, Berlin.
- [13] Xie, W., Ren, B., Hursthouse, A. S., Wang, Z., & Luo, X. (2020). Simulation Of Manganese Transport In Groundwater Using Visual Modflow: A Case Study From Xiangtan Manganese Ore Area In Central China. *Polish Journal Of Environmental Studies Vol. 30*. Polandia.
- [14] Torres, H. (2020). Assessing Groundwater Contamination Risk And Detection Of Unknown Sources Using A Multi-Component Reactive Transport Model. *Journal Of Geoscience And Environment Protection Vol.8*. Australia.
- [15] Masud, A., & Hughes, T. J. (2002). A stabilized mixed finite element method for Darcyflow. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 191(39-40), 4341-4370. USA.
- [16] Tahershamsi, A., Feizi, A., & Molaei, S. (2018). Modeling groundwater surface by MODFLOW math code and geostatistical method. *Civil Engineering Journal*, 4(4), 812. Iran.