



**MODFLOW DAN FEFLOW UNTUK PEMODELAN HIDROGEOLOGI
PADA AREA TAMBANG BATUBARA DI KALIMANTAN SELATAN**

*MODFLOW And FEFLOW For Hydrogeological Modeling In Coal Mining
Areas In South Kalimantan*

Jarwanto*¹, Arie Noor Rakhman²

^{1,2}Universitas AKPRIND Indonesia

*Email: jarwanbjb@gmail.com

Abstract

This study aims to compare the capabilities of MODFLOW and FEFLOW software in modeling groundwater flow in open-pit mining environments with complex geometries. The method includes literature review, technical feature analysis of both software, and evaluation of simulation performance based on hydrogeological parameters and geospatial conditions. The results show that MODFLOW offers advantages in accessibility due to its open-source nature and is efficient for mining areas with relatively simple geometries. However, its limitation in grid flexibility reduces its ability to accurately represent complex morphologies and geological structures. In contrast, FEFLOW provides higher flexibility through an unstructured mesh system and integrates saturated–unsaturated flow in a single model, making it more suitable for advanced hydrogeological modeling. FEFLOW's capability to represent irregular mining geometries, simulate chemical reactions, and provide 3D visualizations is highly relevant for mining conditions in Indonesia, although it is limited by higher computational demand and licensing costs. This study offers valuable insights into selecting groundwater modeling software based on geological complexity and mining analysis objectives.

Keywords: Groundwater modeling, MODFLOW, FEFLOW, Open-pit mine, Hydrogeological simulation

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kemampuan perangkat lunak MODFLOW dan FEFLOW dalam pemodelan aliran air tanah pada lingkungan tambang terbuka dengan geometri kompleks. Metode yang digunakan meliputi studi literatur, analisis fitur teknis perangkat lunak, dan evaluasi kemampuan simulasi berdasarkan parameter hidrogeologi dan kondisi geospasial. Hasil kajian menunjukkan bahwa MODFLOW unggul dari sisi aksesibilitas karena bersifat open-source dan efisien digunakan pada area tambang dengan geometri sederhana. Namun, keterbatasan dalam fleksibilitas grid menyebabkan kurang akuratnya representasi morfologi dan struktur geologi yang kompleks. Sebaliknya, FEFLOW menawarkan fleksibilitas tinggi melalui sistem mesh tak beraturan dan integrasi aliran jenuh-tak jenuh dalam satu model, yang menjadikannya lebih unggul untuk pemodelan skenario hidrogeologi lanjutan. Kemampuan FEFLOW dalam merepresentasikan geometri tambang irreguler, reaksi kimia, serta visualisasi 3D dinilai sangat relevan untuk kondisi tambang di Indonesia, meskipun dibatasi oleh kebutuhan komputasi tinggi dan biaya lisensi. Studi ini memberikan masukan penting dalam pemilihan perangkat lunak pemodelan air tanah berdasarkan kompleksitas geologi dan tujuan analisis tambang.

Kata kunci: Pemodelan air tanah, MODFLOW, FEFLOW, Tambang terbuka, Simulasi hidrogeologi

PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan batubara telah dilakukan secara masif di Provinsi Kalimantan Selatan, dengan sebaran wilayah yang mencakup Kabupaten Tabalong di bagian utara hingga Kabupaten Tanah Laut di bagian selatan. Komoditas batubara merupakan sumber daya utama dalam sektor pertambangan provinsi ini, sedangkan komoditas lain seperti batugamping dan bahan galian C hanya ditambang dalam skala terbatas (Pemerintah Provinsi Kalimantan Selatan, 2022). Seiring meningkatnya intensitas penambangan, berbagai permasalahan lingkungan mulai muncul, terutama yang berkaitan dengan sistem air tanah dan kondisi hidrogeologi di kawasan tambang terbuka (Bortnikova et al., 2013; Zhang et al., 2018).

Lubang-lubang bekas tambang yang tidak dikelola dan direklamasi secara memadai sering kali menjadi tempat genangan air bersifat asam yang terkontaminasi logam berat seperti besi (Fe), mangan (Mn), dan arsenik (As) (Wu et al., 2025). Fenomena tersebut berkontribusi pada terbentuknya air asam tambang (*acid mine drainage*) yang berpotensi mencemari sistem akuifer dan badan air permukaan di sekitarnya (Franks et al., 2011; Torres, 2020). Selain itu, ketidakstabilan lahan bekas tambang juga meningkatkan risiko longsor dan erosi, sehingga mengancam kualitas lingkungan dan keselamatan masyarakat di sekitar area tambang.

Untuk meminimalkan dampak negatif tersebut, diperlukan pendekatan berbasis ilmu pengetahuan yang komprehensif guna memahami sistem hidrogeologi secara menyeluruh (Fetter, 2001). Salah satu pendekatan utama yang digunakan adalah pemodelan numerik aliran air tanah dengan bantuan perangkat lunak (Wang & Anderson, 1995; Xie et al., 2020). Pemodelan aliran air tanah dan transportasi zat terlarut telah dilakukan menggunakan perangkat lunak, seperti MODFLOW dan FEFLOW. MODFLOW yang dikembangkan oleh *US Geological Survey* (USGS) menggunakan metode *finite-difference* (Harbaugh, 2005), sedangkan FEFLOW dari DHI-WASY mengadopsi metode *finite-element* yang lebih fleksibel terhadap variasi geometri dan kondisi batas (Diersch, 2014). Namun, tantangan utama dalam pemodelan hidrogeologi di wilayah Kalimantan Selatan adalah keterbatasan data awal, terutama karena fokus eksplorasi selama ini hanya tertuju pada batubara, bukan pada karakteristik hidrogeologi. Kondisi tersebut menyebabkan informasi dasar seperti kondisi air tanah sebelum penambangan, data litologi non-batubara, serta parameter hidrogeologi seperti porositas dan konduktivitas hidraulik menjadi sangat terbatas.

Tujuan dari pemodelan hidrogeologi ini adalah untuk memahami sistem aliran air bawah tanah atau akuifer yang berada di area tambang, serta memprediksi dampak potensial akibat terpotongnya sistem air tanah oleh aktivitas penambangan. Air tanah yang berada pada kedalaman tertentu memiliki peran penting dalam ketersediaan dan keberlanjutan sumber daya air, yang sangat krusial di tengah meningkatnya kebutuhan air (Fetter, 2001). Dengan demikian, hasil pemodelan ini diharapkan dapat mendukung upaya perencanaan dan pengelolaan sumber daya air tanah secara berkelanjutan serta membantu menjaga kelestarian sistem hidrogeologi di kawasan pertambangan.

METODE

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan *studi literatur* yang diperkuat dengan observasi lapangan secara terbatas pada beberapa lokasi tambang batubara di Kalimantan Selatan. Meskipun tidak seluruh lokasi dapat diakses karena keterbatasan teknis dan logistik, pengamatan langsung tetap dimanfaatkan untuk memperoleh konteks awal kondisi fisik di area tambang. Sebagian besar data dan informasi dikumpulkan dari sumber-sumber sekunder yang diperoleh melalui jurnal ilmiah, buku referensi, database akademik, dan publikasi daring yang relevan dengan topik pemodelan hidrogeologi tambang terbuka.

Model konseptual disusun terlebih dahulu sebagai representasi kualitatif sistem hidrogeologi (Fetter, 2001). Dalam model ini, informasi geologi, karakteristik akuifer, serta interaksi antara air tanah dan air permukaan dijelaskan secara sistematis (Torres, 2020). Model konseptual tersebut digunakan sebagai dasar dalam pembangunan model numerik. Pemodelan numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MODFLOW dan FEFLOW, yang memungkinkan sistem aliran air tanah direpresentasikan secara matematis (Diersch, 2014). Parameter penting yang digunakan dalam pemodelan meliputi konduktivitas hidraulik, porositas, kondisi batas, serta sumber air seperti curah hujan dan rembesan dari badan air di sekitar tambang (Xie et al., 2020).

Dalam kajian ini, potensi penerapan MODFLOW dan FEFLOW ditelaah untuk mendukung pengelolaan air tambang pada wilayah pertambangan batubara di Kalimantan Selatan. Melalui pemodelan tersebut, distribusi tekanan air tanah dapat dipetakan, zona kerentanan terhadap pencemaran dapat diidentifikasi, dan sistem penyaliran tambang dapat dirancang guna mencegah akumulasi air dan terbentuknya air asam (Rapantova et al., 2007). Informasi yang dihasilkan dari model ini juga dapat digunakan untuk mendukung perencanaan reklamasi tambang dan pengelolaan air secara terpadu. Dengan demikian, kegiatan pertambangan diharapkan dapat dilaksanakan secara lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan melalui pendekatan yang didasarkan pada data dan teknologi pemodelan.

Seleksi literatur dilakukan dengan mempertimbangkan kualitas dan relevansi, berdasarkan kriteria seperti metode yang digunakan, tahun publikasi, dan signifikansi temuan. Literatur yang telah dipilih kemudian dianalisis untuk memahami isi dan hasil yang dikemukakan oleh masing-masing penulis. Sintesis dilakukan untuk mengidentifikasi pola umum, kesamaan metodologi, serta hubungan antar variabel dalam konteks pemodelan hidrogeologi. Melalui pendekatan ini, pemahaman yang mendalam diharapkan dapat diperoleh guna mendukung pengembangan strategi pengelolaan air tanah yang berkelanjutan pada kawasan tambang batubara di Kalimantan Selatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan Hidrogeologi di Area Tambang

Pemodelan hidrogeologi telah digunakan untuk memperoleh pemahaman mengenai perilaku aliran air tanah di kawasan pertambangan. Dalam proses ini, data karakteristik akuifer dikumpulkan dan dianalisis, mencakup parameter seperti porositas, permeabilitas, serta kedalaman dan ketebalan lapisan pembawa air. Berdasarkan data tersebut, model konseptual disusun untuk menggambarkan kondisi hidrogeologi secara kualitatif (Fetter, 2001). Model ini kemudian

digunakan sebagai dasar dalam penyusunan model numerik yang disimulasikan dengan perangkat lunak MODFLOW dan FEFLOW. Melalui pemodelan tersebut, distribusi aliran air tanah di bawah permukaan dan di sekitar area tambang dapat diidentifikasi dan dianalisis secara lebih terstruktur.

Dampak kegiatan penambangan terhadap muka air tanah juga telah dievaluasi melalui pemodelan. Penurunan muka air tanah yang diakibatkan oleh aktivitas penggalian diprediksi dan divisualisasikan dalam model. Selain itu, perubahan arah aliran air tanah yang terjadi akibat terbentuknya rongga tambang (*void*) dan aktivitas penimbunan, baik penimbunan material disposal maupun reklamasi bekas tambang telah dianalisis sebagai bagian dari proses simulasi. Dengan cara ini, gangguan terhadap sistem hidrogeologi alami dapat dipetakan dan diantisipasi berdasarkan hasil model yang dibangun (Torres, 2020).

Secara keseluruhan, pemodelan hidrogeologi telah dimanfaatkan sebagai alat perencanaan teknis dan manajemen air tanah di wilayah tambang. Hasil simulasi digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan air, menjaga stabilitas tambang, serta mengurangi risiko lingkungan yang berkaitan dengan kualitas dan kuantitas air tanah (Rapantova et al., 2007). Dengan demikian, pemodelan ini tidak hanya dimaksudkan untuk keperluan teknis, tetapi juga digunakan sebagai dasar dalam pengembangan strategi pengelolaan sumber daya air tanah yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Pemodelan MODFLOW

Pemodelan aliran air tanah di wilayah pertambangan telah dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MODFLOW dan FEFLOW. Dalam hal ini, MODFLOW telah dikembangkan oleh USGS dan telah diaplikasikan sebagai alat pemodelan numerik berbasis grid untuk mensimulasikan distribusi aliran air tanah (Harbaugh, 2005). Dengan pendekatan ini, dinamika air tanah bawah permukaan di sekitar area tambang dapat dipahami, khususnya dalam konteks stabilitas tambang, sistem drainase, serta kualitas air yang mungkin terdampak oleh kegiatan penambangan.

Stratigrafi dan litologi batuan telah dimodelkan untuk menentukan batas antara lapisan yang bersifat permeabel dan impermeabel. Informasi mengenai kedalaman dan ketebalan setiap lapisan batuan telah dikumpulkan dan dipetakan menjadi penampang geologi bawah permukaan. Selanjutnya, data tersebut telah dimasukkan ke dalam sistem grid dua dimensi (2D) atau tiga dimensi (3D) dalam perangkat lunak, di mana setiap grid telah digunakan untuk mewakili volume batuan yang berfungsi sebagai media pergerakan air tanah. Permeabilitas lateral dan vertikal telah diperhitungkan untuk mengukur kemampuan lapisan dalam meloloskan air, sedangkan kapasitas akuifer telah dikalkulasikan guna mengetahui potensi penyimpanan air dalam formasi tersebut (Brunner et al., 2010).

Batas-batas sistem aliran telah ditentukan berdasarkan sumber masukan seperti infiltrasi air hujan, rembesan dari badan air permukaan, dan intersepsi terhadap aliran air tanah akibat galian tambang (Xie et al., 2020). Sementara itu, keluaran sistem telah direpresentasikan melalui mekanisme pemompaan air tanah yang dipasang di titik elevasi terendah area tambang. Dengan demikian, muka air tanah dapat diturunkan untuk menjaga keamanan dan kelangsungan proses penambangan. Meskipun perhitungan ini difokuskan pada aspek pemompaan, komponen lain seperti rancangan kolam pengendapan (*settling pond*) belum dijadikan fokus dalam pemodelan yang dilakukan. Melalui pendekatan ini,

evaluasi dan perencanaan pengelolaan air tambang telah dapat disusun secara lebih komprehensif dan berbasis data kuantitatif.

Perhitungan numerik dalam perangkat lunak MODFLOW didasarkan pada prinsip Hukum Darcy, yang merepresentasikan hubungan antara gradien hidraulik dan laju aliran air tanah dalam media berpori (Harbaugh, 2005; Masud & Hughes, 2002). Melalui pendekatan ini, batas-batas sistem akuifer dapat ditentukan, sehingga memungkinkan estimasi aliran masuk dan keluar dari sistem (Woessner & Poeter, 2020). Persamaan umum yang digunakan untuk menggambarkan aliran jenuh dalam media berpori homogen dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl}$$

di mana Q adalah debit aliran (m^3/s atau liter/hari), K merupakan konduktivitas hidraulik (m/s), A adalah luas penampang aliran (m^2), dan dh/dl adalah gradien hidraulik.

Sebagai perumpamaan nilai konduktivitas hidraulik (K) adalah 1×10^{-4} m/s , sedangkan head turun dari 10 meter ke 8 meter dalam jarak 100 meter, dengan luas penampang (A) adalah 10 m^2 . Dengan demikian dapat diselesaikan dengan menghitung dh dan dl lebih dulu yaitu :

$$\frac{dh}{dl} = \frac{8-10}{100} = 0,02$$

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl}$$

$$Q = - (1 \times 10^{-4}) \cdot 10 \cdot (0.02) \\ = 2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/s$$

Dalam studi kasus di lapangan, telah dilakukan pemodelan terhadap sebuah tambang batubara terbuka yang berlokasi di wilayah Kalimantan Selatan. Lokasi tambang tersebut dimodelkan dengan dimensi panjang dan lebar masing-masing 1.000 meter, yang digunakan sebagai batas domain pemodelan. Sistem grid diterapkan melalui pembagian 5×5 sel, dengan ukuran masing-masing sel sebesar 50×50 meter. Ketebalan akuifer diasumsikan sebesar 40 meter dan dimodelkan sebagai satu lapisan batuan, sedangkan kondisi muka air awal (*initial head*) ditetapkan sebesar 30 meter untuk merepresentasikan zona tak jenuh. Parameter konduktivitas hidraulik horizontal digunakan nilai umum, yaitu $K = 1 \times 10^{-4}$ m/s . Posisi tambang ditempatkan di bagian tengah domain, dan pengeringan tambang dalam skenario ini diasumsikan mencapai kedalaman 20 meter, sehingga kondisi head di titik tambang ditetapkan menjadi 20 meter. Sistem air tanah dianggap berada dalam kondisi tunak (*steady-state*) (Woessner & Poeter, 2020)

Melalui konfigurasi yang dibangun pada perangkat lunak MODFLOW, domain dimodelkan sebagai bidang dua dimensi dengan ukuran $1.000 \text{ m} \times 1.000 \text{ m}$ dan dibagi menjadi 20 baris dan 20 kolom grid. Sistem akuifer direpresentasikan dalam satu lapisan batuan. Nilai konduktivitas hidraulik horizontal untuk arah X dan Y (K_x, K_y) ditentukan sebesar 1×10^{-4} m/s . Sementara itu, recharge diasumsikan seragam pada seluruh grid dengan nilai sebesar $R = 1 \times 10^{-6}$ m/s . Batas kiri dan kanan domain diberikan kondisi batas *constant head* sebesar 50 meter, sedangkan batas atas dan bawah diasumsikan sebagai *no-flow boundary* karena sistem dianggap tertutup secara vertikal. Dengan konfigurasi tersebut, posisi tambang yang berada tepat di tengah domain menyebabkan pola aliran air tanah menjadi radial menuju pusat tambang,

menyerupai konfigurasi aliran menuju sumur pompa. Pola aliran yang terbentuk memberikan representasi visual dan kuantitatif mengenai respons sistem airtanah terhadap aktivitas dewatering pada area pertambangan, khususnya dalam sistem akuifer terbuka yang diasumsikan tertutup secara lateral. Dalam kondisi ini, estimasi laju aliran (Q) ke area tambang dapat dihitung menggunakan rumus analitik berikut:

$$Q = 2\pi KH \cdot \frac{h_o - h_m}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

dengan keterangan:

$$K = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$H = 40 \text{ m sebagai ketebalan akuifer}$$

$h_o = 30 \text{ m sebagai tinggi muka air tanah (head) yang jauh dari bukaan tambang}$

$h_m = 20 \text{ m sebagai tinggi muka air tanah (head) dalam tambang}$

$$R = 500 \text{ m (radius pengaruh dengan posisi tambang di tengah)}$$

$$r = 50 \text{ m (radius sumur atau bukaan tambang)}$$

Persamaan ini secara khusus menggambarkan penurunan muka air tanah (*drawdown*) yang disebabkan oleh aktivitas penurunan muka air di area tambang, serta kuantifikasi debit aliran yang ditarik menuju bukaan tambang.

$$Q = 2\pi KH \cdot \frac{h_o - h_m}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

$$Q = 2\pi \cdot (1 \times 10^{-4}) \cdot 40 \cdot \frac{30 - 20}{\ln(500/50)}$$

$$Q = 2\pi \cdot 0,004 \cdot \frac{10}{\ln(10)}$$

$$Q = 0,025 \cdot \frac{10}{2,302}$$

$$Q = 0,025 \cdot 4,34$$

$$Q = 0,108 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dalam studi ini, analisis terhadap dampak penambangan terhadap sistem airtanah telah dilakukan melalui penerapan MODFLOW. Penurunan muka airtanah yang terjadi akibat pemotongan jalur aliran oleh bukaan tambang telah dianalisis, termasuk potensi gangguannya terhadap kestabilan lereng. Kontur muka airtanah sebelum dan selama operasi penambangan telah divisualisasikan meskipun keterbatasan data awal di wilayah Kalimantan Selatan masih menjadi kendala. Volume air yang harus dipompa dari zona dewatering telah diperkirakan, dan lokasi kolam penampungan sementara telah direncanakan pada titik-titik dengan elevasi terendah.

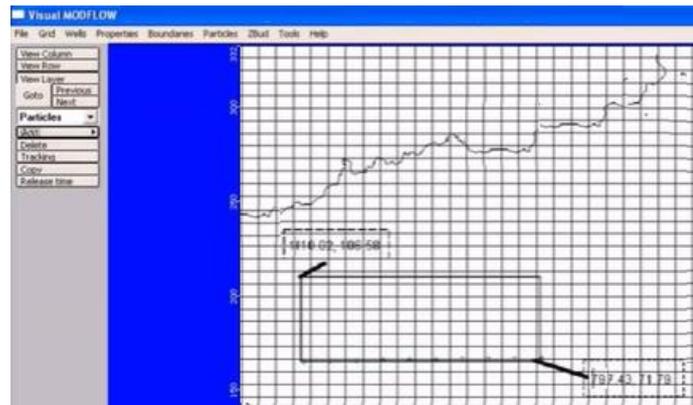
Jangkauan penurunan muka airtanah dari pusat tambang telah diidentifikasi dan dianalisis untuk keperluan perencanaan *sump* dan sistem *dewatering* yang efisien. Kedalaman muka airtanah pada radius tertentu telah ditentukan guna mendukung rencana penambangan lanjutan serta memitigasi

dampak negatif terhadap sumur penduduk di sekitar tambang. Selain itu, potensi pemanfaatan hasil pemodelan ini juga telah diidentifikasi untuk diterapkan pada wilayah lindung dan zona konservasi, sehingga dapat digunakan sebagai acuan oleh instansi pemerintah dalam perencanaan dan pengelolaan kawasan yang memerlukan perlindungan sumber daya air bawah permukaan.

Pemodelan sistem aliran air tanah telah dilakukan menggunakan perangkat lunak MODFLOW untuk mengevaluasi dampak hidrologi akibat aktivitas penambangan terbuka. Berdasarkan hasil simulasi, muka airtanah (potensiometri) pada setiap grid domain telah berhasil dipetakan, dengan nilai-nilai yang menunjukkan perubahan signifikan akibat intervensi antropogenik, khususnya pemompaan (*dewatering*). Selain itu, vektor arah aliran air bawah permukaan telah diturunkan secara numerik berdasarkan gradien hidraulik, dan kecepatan aliran telah dihitung pada tiap sel grid menggunakan parameter konduktivitas hidraulik yang ditetapkan ($K_x = K_y = 1 \times 10^{-4}$ m/s). Informasi spasial ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai dinamika airtanah selama proses ekskavasi berlangsung (Anderson et al., 2015).

Konfigurasi domain pemodelan telah dirancang dalam bentuk grid 2D dengan dimensi $1.000 \text{ m} \times 1.000 \text{ m}$, dibagi menjadi 20 baris dan 20 kolom. Akuifer diasumsikan homogen dan isotropik dengan ketebalan 40 m, serta kondisi awal muka airtanah (*initial head*) ditetapkan sebesar 30 m. Sistem pemompaan di dalam tambang dimodelkan sebagai zona sink dengan head tetap (20 m) yang mewakili elevasi dasar bukaan tambang. Kondisi batas pada sisi kiri dan kanan domain ditetapkan sebagai *constant head* (50 m), sedangkan batas atas dan bawah dianggap sebagai *no-flow boundary* untuk mensimulasikan sistem tertutup secara lateral. Hasil dari pemodelan memperlihatkan pola aliran radial menuju titik *dewatering*, menyerupai sistem sumur tunggal pada akuifer bebas.

Selanjutnya, penurunan muka airtanah (*drawdown*) telah dianalisis secara spasial untuk mengevaluasi radius pengaruh (*radius of influence*) dari sistem *dewatering* (Adnyano & Bagaskoro, 2020). Luas zona yang terdampak serta gradien hidraulik di sekitar tambang telah dihitung guna menentukan lokasi optimum penempatan sump atau kolam penampungan sementara. Volume air yang terakumulasi di dalam sump dihitung mencapai $0,108 \text{ m}^3/\text{s}$, atau ekuivalen dengan 9,33 juta liter per hari. Besaran ini merepresentasikan debit air yang harus dipompa secara kontinu agar kestabilan lereng dan operasional tambang dapat dipertahankan. Selain itu, hasil pemodelan ini juga dapat dijadikan acuan dalam perencanaan zona perlindungan terhadap kawasan lindung dan konservasi, serta sebagai alat prediksi terhadap dampak potensial terhadap sumur-sumur warga di area sekitar tambang. Contoh penggunaan *software MODFLOW* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Output model hidrogeologi berbasis MODFLOW pada area studi

Pemodelan FEFLOW

FEFLOW (*Finite Element Subsurface Flow System*) merupakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang dirancang untuk pemodelan aliran air tanah dan transport massa dalam media berpori (Diersch, 2014). Keunggulan utama FEFLOW terletak pada fleksibilitas geometri mesh serta kemampuannya dalam menangani sistem hidrogeologi kompleks secara akurat, baik dalam kondisi jenuh maupun tak jenuh, serta dalam skenario keadaan tunak (*steady-state*) maupun transien (*transient*). Selain digunakan untuk simulasi aliran airtanah, FEFLOW juga mampu memodelkan proses adveksi-dispersi kontaminan serta interaksi antara airtanah dan air permukaan, seperti sistem sungai–akuifer. Oleh karena itu, perangkat lunak ini banyak digunakan dalam bidang hidrogeologi, teknik lingkungan, dan geoteknik, khususnya untuk mengkaji dinamika airtanah di area pertambangan terbuka.

Dalam proses pemodelan, data geologi dan stratigrafi dari formasi batuan dimanfaatkan untuk menentukan posisi dan ketebalan akuifer. Diperlukan pula data hidrogeologi yang mencakup konduktivitas hidraulik, porositas batuan, dan elevasi muka airtanah, baik dari sumur-sumur penduduk maupun hasil survei geologi awal (Fetter, 2001). Selain itu, informasi teknis dari kegiatan pertambangan, seperti rencana bukaan tambang (*pit design*), lokasi dewatering, serta data kemajuan tambang jangka pendek dan jangka panjang, turut diintegrasikan ke dalam model konseptual (Alloisio et al., 2004). Penentuan batas sistem (*boundary conditions*) dilakukan berdasarkan konfigurasi stratigrafi dan litologi bawah permukaan, sedangkan data fisik batuan diperoleh melalui hasil coring dari kegiatan pemboran eksplorasi maupun pemboran hidrogeologi.

Hasil pemodelan numerik menggunakan FEFLOW menunjukkan bahwa mesh 2D/3D yang dibangun mampu merepresentasikan sistem akuifer secara spasial dengan baik. Proses dewatering dimodelkan melalui penempatan sumur-sumur pompa di dasar bukaan tambang, yang berfungsi sebagai titik kontrol hidraulik terendah (Alloisio et al., 2004). Visualisasi hasil model menunjukkan pola penurunan muka air tanah (*drawdown*) yang divalidasi dengan data lapangan dari sumur pantau masyarakat. Area terdampak dan radius pengaruh drawdown dapat diidentifikasi dengan jelas, termasuk estimasi kedalaman dan volume air yang terdepresiasi. Temuan ini memungkinkan dilakukan mitigasi dampak, khususnya untuk mencegah kekeringan lokal di sekitar area tambang aktif yang berpotensi memicu konflik sosial. Dengan demikian, pemodelan FEFLOW

memberikan basis ilmiah yang kuat dalam perencanaan sistem dewatering yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (Adnyano & Bagaskoro, 2020).

Pemodelan menggunakan FEFLOW telah berhasil merepresentasikan dinamika aliran air tanah dalam media berpori secara numerik berbasis metode elemen hingga (*finite element*). Model ini memungkinkan fleksibilitas geometri dan representasi kondisi hidrogeologi yang lebih realistis, terutama dalam menganalisis aliran jenuh maupun tak jenuh serta transport massa pada akuifer batuan sedimen (Anderson et al., 2015). Simulasi dilakukan dengan mengacu pada formulasi matematis aliran air tanah dalam kondisi tak jenuh, yaitu:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla h) + Q$$

di mana h adalah muka air tanah (*hydraulic head*), S_s adalah koefisien penyimpanan spesifik, K merupakan tensor konduktivitas hidraulik, dan Q adalah komponen sumber atau sumur (baik recharge maupun pumping).

Untuk memperjelas proses simulasi, digunakan skenario idealisasi berupa akuifer jenuh, homogen dan isotropik dalam sistem dua dimensi dengan luas 100×100 meter dan tebal 10 meter. Parameter hidrogeologi ditetapkan sebagai berikut: konduktivitas hidraulik (K) sebesar 10^{-4} m/d, koefisien penyimpanan (S_s) sebesar 1×10^{-5} , dan kondisi awal head sebesar 10 meter. Batas model ditentukan secara tetap, yakni head di sisi kiri ($x = 0$) sebesar 10 meter dan di sisi kanan ($x = 100$) sebesar 9 meter, dengan asumsi tidak terdapat sumur ($Q = 0$) dan sistem berada dalam kondisi *steady-state*. Dengan demikian, persamaan aliran menjadi:

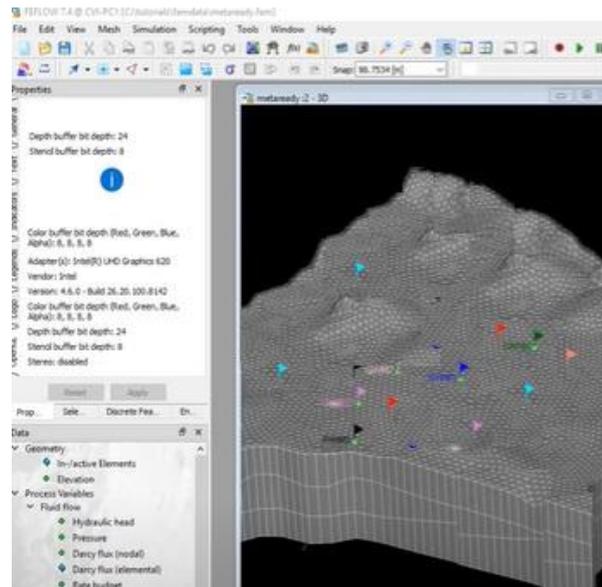
$$0 = \nabla \cdot (K \nabla h).$$

Dengan batasan linier dari saat $x=0$ adalah 10 meter dan saat $x=100$ adalah 9 meter maka, gradien hidrolis linier dapat dihitung sebesar $-0,01$ m/m. Berdasarkan hukum Darcy, kecepatan aliran air tanah diperoleh sebesar:

$$v = -K (dh/dx) = - (10^{-4}) \times (-0,01) = 1 \times 10^{-6} \text{ m/d.}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa arah aliran air tanah sejajar dengan sumbu X dari kiri ke kanan, sesuai dengan penurunan kontur muka air tanah dari 10 meter ke 9 meter, dan dapat divisualisasikan sebagai *streamline* yang sejajar terhadap arah aliran.

Implementasi FEFLOW tidak hanya menghasilkan kontur muka air tanah, tetapi juga dapat menganalisis luas area terdampak *drawdown*, kedalaman penurunan muka air tanah, hingga estimasi volume air yang terdepresiasi. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil model terhadap data observasi muka air tanah dari sumur-sumur di sekitar area tambang. Hasil tersebut berguna dalam perencanaan lokasi *sump* sementara dan *dewatering system*, serta untuk mitigasi dampak sosial berupa kekeringan lokal yang mungkin timbul (Adnyano & Bagaskoro, 2020). Selain itu, hasil pemodelan juga dapat dimanfaatkan dalam pengelolaan wilayah lindung dan konservasi yang berada dalam zona terdampak, sehingga dapat memberikan dasar ilmiah bagi pengambilan keputusan oleh pihak pemerintah dan pengelola sumber daya air. Salah satu contoh penggunaan pemodelan FEFLOW dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Visualisasi hasil pemodelan aliran airtanah menggunakan FEFLOW

Sintesis Penggunaan MODFLOW dan FEFLOW

Analisis komparatif terhadap perangkat lunak MODFLOW dan FEFLOW menunjukkan adanya perbedaan mendasar baik dari segi pendekatan numerik maupun kapabilitas pemodelan geometri (Middlemis & Peeters, 2018). MODFLOW mengandalkan sistem grid berbentuk persegi yang bersifat reguler, sedangkan FEFLOW memanfaatkan mesh tidak beraturan yang lebih fleksibel dalam menangani bentuk geometri kompleks. Ketergantungan MODFLOW pada grid persegi menyebabkan keterbatasan dalam merepresentasikan kontur dan morfologi yang tidak homogen, seperti pada bukaan tambang dengan konfigurasi irreguler. Sebaliknya, struktur mesh FEFLOW memungkinkan adaptasi yang lebih presisi terhadap variasi spasial dan bentuk-bentuk geometri yang tidak teratur (Diersch, 2014; Harbaugh, 2005).

Dalam hal kemampuan pemodelan aliran, MODFLOW versi terbaru telah mengalami perkembangan dengan dukungan terhadap simulasi aliran jenuh dan tak jenuh. Namun, integrasi antara kedua kondisi tersebut masih terpisah dalam proses penyusunannya. FEFLOW menawarkan pendekatan yang lebih integratif, di mana aliran jenuh dan tak jenuh dimodelkan secara simultan dalam satu sistem numerik, menjadikannya lebih unggul dalam mensimulasikan kondisi hidrogeologi kompleks. Keunggulan FEFLOW juga tercermin dalam kemampuannya memodelkan fitur-fitur spesifik tambang, seperti sump atau sumuran, dengan bentuk geometri dan batas vertikal yang lebih realistis, sementara hasil pemodelan MODFLOW untuk kasus serupa cenderung kaku dan kurang detail (Alloisio et al., 2004)

MODFLOW banyak digunakan secara luas karena bersifat open-source dan memiliki tingkat aksesibilitas yang tinggi. Kepraktisan ini menjadikannya ideal untuk tambang-tambang dengan kondisi geologi yang relatif sederhana dan homogen. Namun, keterbatasan dalam fleksibilitas grid menjadi kendala utama, terutama ketika pemodelan mencakup elevasi variatif, struktur patahan, atau bentuk bukaan tambang yang kompleks. Pada aplikasi tiga dimensi, penerapan

grid persegi MODFLOW menyulitkan dalam penggambaran morfologi serta menurunkan efisiensi dalam proses kalibrasi geologi (Trijayanti et al., 2022).

Kelemahan lain MODFLOW tampak dalam pemodelan struktur geologi linier, seperti patahan dan kekar, di mana orientasi dapat direpresentasikan tetapi ketebalan dan kemiringannya tidak tergambar dengan akurat. Walaupun penggunaan grid pada MODFLOW cukup membantu dalam perluasan areal bukaan tambang, kestabilan hasil simulasi masih perlu diuji lebih lanjut. Selain itu, simulasi drawdown dan kondisi pengeringan sumur sangat bergantung pada parameter batas sel, yang menyebabkan keterbatasan resolusi dalam pemetaan kondisi head air tanah secara vertikal (Tahershamsi et al., 2018).

Sebaliknya, FEFLOW sebagai perangkat lunak berlisensi komersial menyajikan fitur lanjutan, termasuk pemodelan aliran termal, interaksi kimia, dan simulasi air asam tambang, yang menjadikannya unggul dalam studi yang memerlukan representasi proses fisis dan kimia secara simultan. Fleksibilitas dalam menentukan struktur geologi, termasuk kemiringan lapisan dan patahan, menjadikan FEFLOW sangat aplikatif dalam pemodelan tambang dengan kondisi geologi tidak beraturan seperti di Kalimantan Selatan. Meskipun biaya lisensi dan waktu komputasi yang diperlukan tergolong tinggi, keluaran model FEFLOW sangat rinci dan sebanding dengan kompleksitas data input yang digunakan, mencakup litologi, *head*, serta parameter hidrogeologi multi-lapisan lainnya (Murray & Power, 2021).

KESIMPULAN

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa pemodelan aliran air tanah menggunakan perangkat lunak MODFLOW dan FEFLOW memiliki peran penting dalam memahami dinamika hidrogeologi di kawasan pertambangan. MODFLOW menawarkan pendekatan berbasis grid reguler yang praktis dan ideal untuk kondisi geologi sederhana, sementara FEFLOW dengan metode elemen hingga dan fleksibilitas mesh-nya lebih unggul dalam merepresentasikan geometri kompleks dan sistem hidrogeologi yang heterogen. Kedua perangkat lunak ini telah berhasil digunakan untuk mensimulasikan distribusi aliran, penurunan muka air tanah (*drawdown*), serta radius pengaruh dewatering, yang sangat krusial dalam menjaga kestabilan tambang dan mencegah dampak lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnyano, A. . I. A., & Bagaskoro, M. (2020). Kajian Teknis Dewatering System Tambang Pada Pertambangan Batubara. *PROMINE*, 8(1), 28–33. <https://doi.org/10.33019/PROMINE.V8I1.1794>
- Alloisio, S., Douglas, B. R., Mckittrick, R., & Prigneau, P. (2004). *Groundwater Modelling for Large-scale Mine Dewatering in Chile: MODFLOW or FEFLOW?* https://www.researchgate.net/publication/263612704_Groundwater_modelling_for_large-scale_mine_dewatering_in_Chile_MODFLOW_or_FEFLOW
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied Groundwater Modeling: Simulation Of Flow And Advective Transport* (2nd ed.). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780120581030/applied-groundwater-modeling>



- 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. In A. Scozzari & E. Dotsika (Eds.), *Threats to the Quality of Groundwater Resources* (pp. 27–37). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/698_2013_234
- Brunner, P., Simmons, C. T., Cook, P. G., & Therrien, R. (2010). Modeling Surface Water-groundwater Interaction with MODFLOW: Some Considerations. *Ground Water*, 48(2), 174–180. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00644.x>
- Diersch, H.-J. G. (2014). *FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5>
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (P. Lynch, S. Hale, & B. Sturla (eds.); 4th ed.). Prentice-Hall. https://welib.org/slow_download/7d12d7aa83dfe67c71d5ef5717110812/0/0
- Franks, D. M., Boger, D. V., Côte, C. M., & Mulligan, D. R. (2011). Sustainable Development Principles for the Disposal of Mining and Mineral Processing Wastes. *Resources Policy*, 36(2), 114–122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.12.001>
- Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process. In G. A. Norton & P. P. Leahy (Eds.), *Modeling techniques, Section A. Ground Water* (p. 253 p). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/PDF/TM6A16.pdf>
- Masud, A., & Hughes, T. J. R. (2002). A Stabilized Mixed Finite Element Method for Darcy Flow. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191(39), 4341–4370. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(02\)00371-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00371-7)
- Middlemis, H., & Peeters, L. (2018). *Uncertainty Analysis: Guidance for Groundwater Modelling within A Risk Management Framework*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34589.36323>
- Murray, T., & Power, W. (2021). *Information Guidelines Explanatory Note: Characterisation and Modelling of Geological Fault Zone*. https://www.researchgate.net/publication/361416244_Characterisation_and_modelling_of_geological_fault_zones_Explanatory_Note
- Pemerintah Provinsi Kalimantan Selatan. (2022). *Laporan Penyelenggaraan Pemerintah Daerah Provinsi Kalimantan Selatan Tahun Anggaran 2021*. Pemerintah Provinsi Kalimantan Selatan. <https://kalselprov.go.id/storage/LPPD2021KALSEL.pdf>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10230-007-0017-1>
- Tahershamsi, A., Feizi, A., & Molaei, S. (2018). Modeling Groundwater Surface by MODFLOW Math Code and Geostatistical Method. *Civil Engineering Journal*, 4(4), 812–827. <https://doi.org/10.28991/cej-0309135>
- 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*, 8, 132–158. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.85009>
- Trijayanti, H., Cahyadi, T. A., & Ernawati, R. (2022). Aplikasi Penggunaan Metode Finite Difference dalam Pemodelan Air Tanah pada Kasus Pertambangan: Literatur Review. *Jurnal Himasapta*, 7(1), 21 – 26. <https://doi.org/10.20527/jhs.v7i1>
- Wang, H. F., & Anderson, M. P. (1995). *Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods* (A. Cox (ed.)). W H Freeman & Co. [https://s1.welib-public.org/hs6/libgenrs_nonfiction/2216000/d9d6605ad11d9e29b7740d967cab99fc~/1754516608.CKn3mcHSxk2XguWq3p02Kg/Introduction to Groundwater Modeling - Finite Difference and -- Herbert F. Wang, Mary P. Anderson. -- \(WeLib.org \).pdf](https://s1.welib-public.org/hs6/libgenrs_nonfiction/2216000/d9d6605ad11d9e29b7740d967cab99fc~/1754516608.CKn3mcHSxk2XguWq3p02Kg/Introduction%20to%20Groundwater%20Modeling%20-%20Finite%20Difference%20and%20-%20Herbert%20F.%20Wang,%20Mary%20P.%20Anderson.--%20%28%20WeLib.org%29.pdf)
- Woessner, W. W., & Poeter, E. P. (2020). *Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow* (J. Cherry & E. Poeter (eds.)). The Groundwater Project, Guelph. <https://gw-project.org/books/hydrogeologic-properties-of-earth-materials-and-principles-of-groundwater-flow/>
- Wu, Z., Gao, X., Li, C., Huang, H., Bai, X., Zheng, L., Shi, W., Han, J., Tan, T., Chen, S., Ma, S., Li, S., Zhu, M., & Li, J. (2025). Mechanisms and Genesis of Acidic Goaf Water in Abandoned Coal Mines: Insights from Mine Water–Surrounding Rock Interaction. *Minerals*, 15(7), 753. <https://doi.org/10.3390/min15070753>
- 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*, 30(2), 1409–1420. <https://doi.org/10.15244/pjoes/125766>
- Zhang, X., Yang, H., & Cui, Z. (2018). Evaluation and Analysis of Soil Migration and Distribution Characteristics of Heavy Metals in Iron Tailings. *Journal of Cleaner Production*, 172, 475–480. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.277>