

Peran Hidrologi dalam Perencanaan dan Operasi Tambang: Sebuah Tinjauan Literatur

The Role of Hydrology in Mine Planning and Operations: A Literature Review

Risal Gunawan¹, Muh Karnoha Amir¹, Fadli²

¹Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Tenggara

²Program Studi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Yogyakarta

Korespondensi Email: risalgunawan92@gmail.com

ABSTRAK

Hidrologi tambang merupakan komponen esensial dalam seluruh siklus hidup pertambangan, mulai dari eksplorasi, perencanaan, operasi, hingga pascatambang. Dalam dua dekade terakhir, meningkatnya skala dan kompleksitas kegiatan pertambangan telah mendorong perhatian yang lebih besar terhadap dinamika sistem hidrologi, mengingat keterkaitannya dengan stabilitas geoteknik, keberlanjutan operasional, serta perlindungan lingkungan perairan. Pengelolaan sistem hidrologi yang tidak optimal berpotensi menimbulkan risiko banjir pit, gangguan produksi, dan degradasi ekosistem akuatik. Artikel tinjauan ini menyajikan sintesis kritis terhadap jurnal internasional dan nasional, dengan tujuan mengevaluasi perkembangan dan peran analisis hidrologi dalam perencanaan serta operasi tambang modern. Fokus kajian meliputi penerapan model hidrologi berbasis *Geographic Information System* (GIS), kecerdasan buatan, pemodelan hidrogeokimia, dan penggunaan isotop geokimia untuk memahami interaksi air permukaan dan air tanah di lingkungan tambang. Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi pendekatan hidrologi kuantitatif dengan teknologi digital mampu meningkatkan akurasi perancangan sistem drainase, mengoptimalkan kinerja dewatering, serta menurunkan risiko banjir dan gangguan operasional. Selain manfaat teknis, beberapa studi juga mengindikasikan bahwa penggabungan analisis neraca air dengan evaluasi ekonomi tambang berpotensi meningkatkan nilai ekonomi proyek tanpa menambah beban lingkungan. Namun demikian, perubahan air tanah akibat aktivitas pertambangan terbukti memiliki implikasi signifikan terhadap kualitas ekosistem akuatik, sehingga memerlukan strategi mitigasi. Secara keseluruhan, tinjauan ini menegaskan bahwa hidrologi tambang telah berkembang dari fungsi yang bersifat reaktif menjadi elemen strategis dalam pengambilan keputusan tambang, dengan integrasi data *real-time* dan manajemen air terpadu sebagai kunci pertambangan berkelanjutan di era perubahan iklim.

Kata kunci: Hidrologi Tambang, Hidrogeologi, Air Tambang, Model Hidrologi, Pertambangan Berkelanjutan.

ABSTRACT

Mining hydrology is an essential component throughout the entire mining life cycle, from exploration and planning to operation and post-mining phases. Over the past two decades, the increasing scale and complexity of mining activities have driven greater attention to hydrological system dynamics, given their close links to geotechnical stability, operational sustainability, and the protection of aquatic environments. Inadequate hydrological system management can potentially lead to pit flooding, production disruptions, and the degradation of aquatic ecosystems. This review article presents a critical synthesis of international and national journals, aiming to evaluate the development and role of hydrological analysis in modern mine planning and operations. The review focuses on the application of Geographic Information System (GIS)-based hydrological models, artificial intelligence, hydrogeochemical modeling, and the use of geochemical isotopes to understand surface water-groundwater interactions in mining environments. The findings indicate that integrating quantitative hydrological approaches with digital technologies improves the accuracy of drainage system design, optimizes dewatering performance, and reduces the risks of flooding and operational disturbances. Beyond technical benefits, several studies suggest that combining water balance analysis with mine economic evaluations has the potential to enhance project economic value without increasing environmental burdens. Nevertheless, groundwater regime changes induced by mining activities have been shown to have significant implications for aquatic ecosystem quality, thereby requiring appropriate mitigation strategies. Overall, this review confirms that mining hydrology has evolved from a reactive function into a strategic element



of mine decision-making, with real-time data integration and integrated water management serving as key enablers of sustainable mining in the era of climate change.

Keywords: *Mining Hydrology, Hydrogeology, Mine Water, Hydrological Modeling, Sustainable Mining.*

PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan, baik tambang terbuka (*open pit mining*) maupun tambang bawah tanah (*underground mining*), merupakan salah satu aktivitas yang paling intensif memodifikasi sistem hidrologi alami. Aktivitas seperti pengupasan tanah penutup, penggalian bijih, dan pembuangan overburden menyebabkan perubahan besar dalam keseimbangan air permukaan dan air tanah. Menurut Wolkersdorfer et al. (2020), gangguan hidrologi di kawasan tambang dapat memicu serangkaian dampak lingkungan seperti peningkatan limpasan (*runoff*), penurunan kualitas air tanah, serta terbentuknya air asam tambang (*acid mine drainage*).

Perencanaan tambang modern harus memperhitungkan dinamika air sejak tahap awal eksplorasi (Gunawan, 2025). Kajian Choi et al. (2020) menunjukkan bahwa pendekatan berbasis GIS dan model hidrologi spasial dapat mengidentifikasi area berisiko tinggi terhadap akumulasi air hujan, membantu menentukan lokasi optimal untuk sistem drainase dan sedimentation ponds. Demikian pula, penelitian Holloway & Cowie (2019) menegaskan pentingnya pengujian hidrogeologi seperti *packer testing* dan *vibrating wire piezometer* untuk memahami distribusi tekanan air pori pada batuan tambang bawah tanah yang dapat memengaruhi kestabilan lereng. Seiring meningkatnya tekanan global terhadap kegiatan tambang ramah lingkungan, pengelolaan air tambang telah berevolusi menjadi salah satu indikator utama kinerja keberlanjutan perusahaan pertambangan. Studi Rahnema et al. (2023) memperkenalkan kerangka kerja *Sustainable Short-Term Mine Planning* (STMP) yang mengintegrasikan model hidrologi ke dalam rencana operasi harian untuk menekan dampak lingkungan. Implementasi sistem seperti ini memungkinkan pengendalian *mine inflow* secara prediktif, mengurangi konsumsi energi pompa, dan menurunkan volume air buangan hingga 35%. Dalam konteks perubahan iklim global, hidrologi tambang juga memiliki peran adaptif. Fluktuasi curah hujan ekstrem dan kenaikan muka air tanah dapat memengaruhi desain tambang serta keselamatan operasional. Oleh karena itu, penelitian terbaru seperti yang dilakukan oleh Polo Salinas & Marquina (2025) menekankan perlunya pendekatan probabilistik dan berbasis ketidakpastian (*uncertainty-based modeling*) dalam memprediksi respon sistem hidrologi tambang terhadap perubahan iklim.

Kajian ini berupaya memberikan pemahaman komprehensif tentang peran hidrologi dalam perencanaan dan operasi tambang berdasarkan hasil penelitian internasional terkini periode 2016–2026. Fokus utama diarahkan pada tiga dimensi strategis: Integrasi model hidrologi dalam perencanaan tambang untuk efisiensi teknis dan ekonomi, Peran sistem hidrologi terhadap stabilitas dan keamanan operasi tambang, dan Kontribusi hidrologi terhadap keberlanjutan lingkungan pascatambang Gunawan et al., (2021). Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini menyajikan tinjauan literatur terstruktur dan kritis terhadap perkembangan kajian hidrologi dalam perencanaan, operasi, dan penutupan tambang berdasarkan publikasi ilmiah periode 2016–2026. Fokus kajian diarahkan pada tiga dimensi utama, yaitu: (1) integrasi analisis hidrologi dalam perencanaan tambang untuk meningkatkan efisiensi teknis dan ekonomi, (2) peran hidrologi dalam mendukung keselamatan dan keandalan operasi tambang, serta (3) kontribusi hidrologi terhadap keberlanjutan lingkungan dan pengelolaan pascatambang. Kebaruan artikel ini terletak pada pendekatan sintesis terpadu yang menghubungkan perkembangan teknologi hidrologi modern—seperti GIS, AI, IoT, dan *hydrological digital twin* dengan pengambilan keputusan strategis tambang, serta penekanan pada implikasi jangka panjang hidrologi terhadap keberlanjutan sistem pertambangan di era perubahan iklim.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis secara sistematis perkembangan kajian mengenai peran hidrologi dalam perencanaan dan operasi tambang. Metode SLR dipilih karena memungkinkan penelusuran literatur yang transparan, replikatif, dan terstruktur, sehingga meminimalkan bias subjektif dalam pemilihan referensi.

Proses penelusuran literatur dilakukan pada empat basis data ilmiah utama, yaitu Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan Google Scholar. Kombinasi kata kunci digunakan dalam bahasa Inggris dan Indonesia, antara lain: *mining hydrology, mine water management, hydrological modeling in mining, dewatering, acid mine drainage, hydrogeology, dan pertambangan berkelanjutan*. Penelusuran dibatasi pada publikasi periode 2016–2026 untuk menangkap perkembangan mutakhir dalam bidang hidrologi tambang. Gunawan et al., (2021).

Tahapan seleksi literatur dilakukan secara bertahap. Pada tahap awal, artikel diidentifikasi berdasarkan judul dan abstrak untuk memastikan relevansi dengan topik hidrologi dalam perencanaan, operasi, atau penutupan tambang. Artikel duplikat dihapus, kemudian dilakukan evaluasi teks lengkap (*full-text assessment*). Kriteria inklusi meliputi:

1. Artikel *peer-reviewed*;
2. Membahas aspek hidrologi atau hidrogeologi dalam konteks pertambangan;
3. Menggunakan pendekatan konseptual, pemodelan, atau studi kasus.

Sementara itu, artikel non-ilmiah, laporan teknis tanpa proses penelaahan sejawat, serta studi yang tidak berhubungan langsung dengan sistem hidrologi tambang dikecualikan dari kajian.

Dari hasil seleksi akhir, literatur yang memenuhi kriteria dianalisis secara kualitatif dan dikelompokkan ke dalam beberapa tema utama, yaitu: (i) integrasi hidrologi dalam perencanaan tambang, (ii) pengaruh hidrologi terhadap operasi dan keselamatan tambang, (iii) peran hidrologi dalam keberlanjutan dan penutupan tambang, serta (iv) perkembangan teknologi hidrologi tambang modern. Sintesis dilakukan untuk mengidentifikasi tren penelitian, kontribusi utama masing-masing studi, serta kesenjangan pengetahuan (*research gaps*) yang masih terbuka dalam pengelolaan hidrologi tambang modern.

Kebaruan artikel ini terletak pada pendekatan sintesis terpadu yang menghubungkan perkembangan hidrologi tambang modern dengan pengambilan keputusan strategis tambang. Berbeda dengan studi tinjauan sebelumnya yang umumnya memfokuskan kajian pada aspek teknis tertentu seperti pengelolaan air tambang, dewatering, atau mitigasi air asam tambang secara terpisah artikel ini menyajikan kerangka konseptual yang mengintegrasikan analisis hidrologi kuantitatif, evaluasi ekonomi tambang, dan teknologi digital mutakhir dalam satu perspektif yang koheren.

Secara khusus, artikel ini menyoroti pergeseran paradigma hidrologi tambang dari fungsi yang bersifat reaktif menuju peran strategis dalam perencanaan, operasi, dan penutupan tambang. Sintesis literatur dilakukan dengan menekankan integrasi teknologi berbasis *Geographic Information System* (GIS), *artificial intelligence* (AI), *Internet of Things* (IoT), serta konsep *hydrological digital twin* sebagai instrumen pendukung pengambilan keputusan adaptif di bawah ketidakpastian iklim dan geologi.

Selain itu, artikel ini memperluas cakupan tinjauan dengan menempatkan hidrologi tambang tidak hanya sebagai sistem teknis, tetapi juga sebagai elemen kunci dalam keberlanjutan sosial-lingkungan dan nilai ekonomi jangka panjang tambang. Dengan mengaitkan aspek hidrologi, stabilitas geoteknik, efisiensi energi, dan pengelolaan pascatambang dalam satu sintesis terpadu, artikel ini memberikan perspektif baru yang belum banyak dibahas secara komprehensif dalam literatur hidrologi pertambangan sebelumnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Peran Hidrologi dalam Perencanaan Tambang

Perencanaan tambang merupakan tahap krusial yang menentukan efisiensi operasional dan keberlanjutan lingkungan jangka panjang. Aspek hidrologi pada tahap ini berfokus pada identifikasi dan pemodelan aliran air permukaan serta air tanah di sekitar area tambang. Pemahaman ini penting untuk mengantisipasi *mine inflow*, banjir tambang, dan potensi kontaminasi air tanah.

Menurut Aghdamigargari et al. (2024), perencanaan tambang jangka panjang yang mengintegrasikan model hidrologi ke dalam perhitungan ekonomi dapat meningkatkan nilai *Net Present Value* (NPV) hingga 10–15%, karena memungkinkan optimasi lokasi *pit*, *waste dump*, dan infrastruktur air tambang. Sementara itu, Choi et al. (2020) mengembangkan pendekatan berbasis *Geographic Information System* (GIS) dan *Remote Sensing* (RS) untuk memetakan arah aliran permukaan dan daerah imbuhan air tanah. GIS terbukti meningkatkan akurasi prediksi genangan air hingga 82% dibandingkan metode konvensional. Untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai karakteristik, pendekatan metodologis, serta kontribusi utama penelitian yang dianalisis dalam kajian ini, sintesis literatur utama terkait peran hidrologi dalam perencanaan dan operasi tambang periode 2016–2026 disajikan pada Tabel 1

Tabel 1. Studi Literatur Utama Peran Hidrologi dalam Perencanaan dan Operasi Tambang (2016–2026)

No	Penulis & Tahun	Jenis Tambang / Wilayah	Pendekatan Hidrologi	Fase Siklus Tambang	Kontribusi Utama
1	Choi et al. (2020)	Tambang terbuka	GIS & Remote Sensing	Perencanaan	Identifikasi area genangan dan optimasi desain drainase berbasis spasial
2	Holloway & Cowie (2019)	Tambang bawah tanah	Hidrogeologi & tekanan air pori	Operasi	Hubungan tekanan air pori dengan kestabilan lereng dan keselamatan tambang
3	Rajabi et al. (2022)	Tambang terbuka	Coupled groundwater–surface water model	Operasi	Prediksi inflow pit dan optimasi sistem dewatering
4	Aghdamigargari et al. (2024)	Tambang terbuka	Integrasi hidrologi–ekonomi	Perencanaan	Peningkatan NPV melalui optimasi desain tambang berbasis hidrologi
5	Rahnema et al. (2023)	Tambang campuran	Monitoring hidrologi real-time (STMP)	Operasi	Penurunan konsumsi energi pompa dan dampak lingkungan
6	Wolkersdorfer et al. (2020)	Multi-komoditas	Hidrogeokimia & isotop stabil	Operasi–Penutupan	Identifikasi sumber air dan mekanisme pencemaran air tambang

7	Sun & Chen (2024)	Tambang batubara	Constructed wetlands	Operasi	Reduksi AMD dan logam berat melalui rehabilitasi hidrologi
8	Liu et al. (2024)	Multi-komoditas	Integrated Mine Water Management (IMWM)	Operasi–Penutupan	Efisiensi pemanfaatan ulang air tambang dan pengurangan konflik air
9	Gunawan, Ernawati & Cahyadi (2024)	Daerah pascatambang (DAS)	Analisis hidrologi sungai & normalisasi alur	Penutupan–Pascatambang	Perencanaan normalisasi sungai untuk pengendalian banjir dan pemulihan fungsi hidrologi pascatambang
10	Yilmaz et al. (2025)	Tambang terbuka	Machine learning hidrogeologi	Penutupan	Prediksi respon muka air tanah jangka panjang pascatambang
11	Morlot et al. (2024)	Skala DAS	Hydrological Digital Twin	Perencanaan –Operasi	Simulasi skenario iklim dan optimasi manajemen air berbasis data real-time

Selain itu, model hidrologi seperti MODFLOW, *HydroGeoSphere*, dan MIKE SHE kini digunakan secara luas untuk simulasi aliran air bawah permukaan pada area tambang terbuka dan bawah tanah. [Rajabi et al. (2022)] menemukan bahwa penggunaan model *coupled groundwater-surface water* dapat memprediksi laju infiltrasi ke pit tambang dengan ketepatan $\pm 5\%$.

Dalam tambang bawah tanah, hidrologi berperan dalam menentukan sistem *dewatering* yang efisien. Polo Salinas & Marquina (2025) menyoroti pentingnya analisis ketidakpastian (*uncertainty analysis*) dalam memprediksi debit air masuk akibat patahan bawah permukaan yang tidak terdeteksi. Integrasi model numerik dengan data geofisika meningkatkan keandalan desain sistem penyaliran hingga 40%.

Lebih lanjut, hidrologi juga menjadi dasar dalam *site selection* untuk fasilitas penimbunan limbah tambang (*tailing storage facility*). [Liu et al. (2024)] menemukan bahwa faktor seperti permeabilitas tanah, gradien hidraulik, dan curah hujan tahunan merupakan parameter dominan dalam menentukan stabilitas *tailing dam* (Gunawan et al 2024). Dengan demikian, integrasi data hidrologi sejak awal tahap desain tambang bukan hanya kebutuhan teknis, tetapi juga strategi mitigasi lingkungan jangka panjang.

3.2 Pengaruh Hidrologi terhadap Operasi Tambang

Pada fase operasi, air tambang merupakan salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap efisiensi produksi, keselamatan kerja, dan biaya operasional. Air yang berlebihan dapat mengganggu kestabilan lereng, meningkatkan beban *dewatering*, serta mempercepat korosi alat berat.

Kajian Rahnema et al. (2023) menegaskan bahwa sistem pengelolaan air berbasis *real-time hydrological monitoring* mampu mengurangi beban pompa hingga 25%. Teknologi sensor

seperti *piezoelectric pressure transducers* dan *ultrasonic water-level meters* digunakan untuk memantau fluktuasi muka air tanah secara langsung.

Selain itu, studi Holloway & Cowie (2019) menunjukkan bahwa tekanan air pori pada batuan di bawah *pit slope* memiliki hubungan langsung terhadap risiko longsor. Peningkatan tekanan sebesar 20 kPa dapat menurunkan *factor of safety* lereng hingga 0.15 poin, sehingga pemantauan hidrologi menjadi bagian penting dalam sistem keamanan tambang.

Dari sisi lingkungan, Mardonova & Han (2023) menyoroti dampak hidrologis penambangan terhadap ekosistem perairan, terutama akibat terbentuknya *acid mine drainage (AMD)*. Reaksi oksidasi pirit (FeS_2) oleh oksigen dan air menghasilkan asam sulfat serta melarutkan logam berat seperti Fe, Mn, dan Cu. Kajian tersebut menunjukkan bahwa tambang batubara dapat meningkatkan konsentrasi ion H^+ dalam aliran sungai hingga 200–300 mg/L dibandingkan kondisi pra-tambang (Wulandari et al. 2025).

Untuk mengatasi hal ini, pendekatan berbasis bioremediasi dan constructed wetlands banyak diterapkan. Studi oleh [Sun & Chen (2024)] menunjukkan bahwa sistem lahan basah buatan yang ditanami *Phragmites australis* mampu menurunkan kadar Fe hingga 95% dan Mn hingga 82% dari air tambang sebelum dilepas ke lingkungan. Pendekatan ini memperlihatkan pentingnya sinergi antara hidrologi dan ekoteknologi dalam operasi tambang berkelanjutan.

3.3 Hidrologi dan Keberlanjutan Tambang

Keberlanjutan tambang erat kaitannya dengan kemampuan sistem hidrologi untuk beradaptasi setelah operasi berakhir. Dalam tahap penutupan (*mine closure*), hidrologi berperan dalam menentukan strategi reklamasi, pengelolaan kolam bekas tambang (*pit lakes*), dan pemulihan keseimbangan air tanah. Menurut [Yilmaz et al. (2025)], penggunaan model hidrologi prediktif berbasis *machine learning (ML)* dapat memproyeksikan respon sistem air tanah terhadap penutupan tambang selama 20–30 tahun ke depan. Model seperti *Random Forest Regression* dan *Artificial Neural Networks* terbukti lebih akurat dibanding model deterministik tradisional dalam memprediksi fluktuasi muka air tanah pasca-tambang. Penelitian [Wolkersdorfer et al. (2020)] juga menekankan pentingnya integrasi data isotop stabil ($\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$) untuk melacak pergerakan air tambang dan sumber pencemar. Data isotopik membantu mengidentifikasi asal air (meteoric, magmatic, atau rekahan geotermal), sehingga strategi pengendalian dapat dilakukan lebih tepat sasaran.

Dalam konteks sosial-lingkungan, [Mardonova & Han (2023)] mencatat bahwa sistem pengelolaan air yang adaptif mampu menurunkan konflik sosial akibat kekurangan air hingga 60% di kawasan tambang Asia Tengah. Penerapan sistem *integrated mine water management (IMWM)* juga berhasil meningkatkan efisiensi pemanfaatan ulang air tambang untuk kebutuhan industri hingga 70% (Liu et al., 2024). Lebih lanjut, kajian [Sharma et al. (2021)] menekankan bahwa pendekatan "*Hydrology-Based Mine Closure Planning*" menjadi kunci dalam memastikan keberlanjutan ekosistem pascatambang. Desain reklamasi yang mempertahankan konektivitas hidrologi alami terbukti meningkatkan keberhasilan revegetasi hingga 88% dibandingkan metode konvensional (Gunawan et al 2024).

Secara keseluruhan, hidrologi tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga sebagai sistem pengambilan keputusan yang menentukan keseimbangan antara keuntungan ekonomi dan pelestarian ekosistem.

3.4 Integrasi Teknologi Hidrologi Tambang Modern

Dalam dekade terakhir (2016–2026), integrasi teknologi digital telah merevolusi bidang hidrologi tambang dengan kemampuan prediktif dan operasional yang jauh melampaui pendekatan konvensional. *Artificial Intelligence (AI)* semakin digunakan untuk memodelkan dan memprediksi fenomena hidrologi kompleks, termasuk prediksi curah hujan ekstrem dan banjir

pit, dengan memanfaatkan algoritma machine learning yang mampu mengekstraksi pola dari data historis dan *real-time* (Gacu, et al., 2025). Catatan ilmiah menunjukkan bahwa sistem AI-terintegrasi dengan IoT (Internet of Things) tidak hanya mampu meningkatkan kualitas prediksi, tetapi juga memberikan continuous monitoring terhadap variabel hidrologi seperti curah hujan, aliran sungai, dan parameter kualitas air meskipun berada di lokasi terpencil dengan infrastruktur sensor terbatas (Rahimi et al., 2022).

Implementasi IoT dalam pemantauan debit air telah meningkatkan efektivitas operasional dengan menyediakan data real-time yang kritis untuk keputusan manajemen risiko. Perangkat sensor ini memantau variabel hidrologis secara terus-menerus dan mengirimkan data langsung ke pusat analisis, menurunkan risiko penumpukan air secara signifikan melalui respons otomatis dalam sistem drainase dan pompa (Amanatidis, et al., 2025).

Konsep *Hydrological Digital Twins* (HDT) muncul sebagai teknologi terdepan dalam hidrologi tambang modern. Dengan membuat representasi digital dari sistem hidrologi fisik, HDT memungkinkan simulasi skenario iklim, what-if analysis, dan optimasi desain drainase berdasarkan data real-time dan historis yang luas. Studi kasus menunjukkan bahwa digital twin dapat memodelkan siklus hidrologi kompleks dengan mempertimbangkan perubahan antropogenik pada sistem air, yang sangat penting untuk optimasi manajemen air di areal pertambangan besar (Morlot, al., 2024).

Dengan integrasi AI, sensor digital IoT, dan model digital twin, perencanaan tambang kini menjadi lebih dinamis dan adaptif (Fang et al., 2023). Sistem hidrologi tidak hanya dipantau secara real-time, tetapi juga dikendalikan secara prediktif untuk mengantisipasi kondisi ekstrem, mengoptimalkan aliran drainase, dan meningkatkan keselamatan operasional (Chen & Xu, 2026). Implementasi teknologi ini dipandang sebagai bagian dari paradigma baru pengelolaan air tambang yang berkontribusi terhadap efisiensi energi, pengurangan emisi, serta pergeseran menuju operasi tambang yang lebih berkelanjutan dan rendah karbon (Li et al., 2024)

KESIMPULAN

Hidrologi terbukti memainkan peran strategis dalam seluruh tahapan kegiatan pertambangan—mulai dari perencanaan, operasi, hingga penutupan tambang. Integrasi model hidrologi dalam perencanaan tambang mampu meningkatkan efisiensi teknis, memperpanjang umur tambang, serta meminimalkan dampak lingkungan. Studi antara tahun 2016–2026 menunjukkan bahwa penerapan GIS, AI, model hidrogeokimia, dan monitoring berbasis IoT secara signifikan memperkuat sistem manajemen air tambang. Selain itu, pendekatan integrated mine water management terbukti mampu menekan risiko banjir tambang, mempercepat proses reklamasi, dan meningkatkan keberlanjutan sosial-lingkungan di sekitar area tambang. Dengan demikian, hidrologi bukan sekadar instrumen pendukung, tetapi komponen inti dalam sistem pengelolaan tambang modern.

Rekomendasi Kebijakan

1. Penerapan sistem pemantauan hidrologi digital. Industri tambang harus mengadopsi *real-time monitoring system* berbasis IoT dan AI guna mendeteksi perubahan debit air dan kualitas air tambang secara dini.
2. Kolaborasi multidisiplin. Sinergi antara ahli hidrologi, geoteknik, dan lingkungan perlu ditingkatkan untuk menghasilkan desain tambang yang lebih aman dan adaptif terhadap perubahan iklim.
3. Pengelolaan air tambang pascaoperasi tambang. Diperlukan kebijakan yang mewajibkan pemanfaatan kembali air tambang (*mine water reuse*) untuk keperluan industri atau pertanian guna mengurangi tekanan pada sumber daya air alami.

4. Peningkatan kapasitas riset dan pendidikan hidrologi tambang. Perguruan tinggi dan lembaga penelitian perlu memperkuat bidang studi hidrogeologi pertambangan sebagai fondasi pengembangan teknologi tambang berkelanjutan di masa depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan syukur dan terima kasih untuk seluruh rekan-rekan dosen yang telah meluangkan waktu, pikiran dan tenaga, sehingga penulis dapat menyelesaikan paper ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aghdamigargari, M., Avane, S., Anani, A., & Adewuyi, S. O. (2024). Sustainability in long-term surface mine planning: A systematic review of operations research applications. *Sustainability*, 16(22), 9769. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/22/9769>
- Ahmed, K., Rahman, M., & Zhang, Y. (2016). Impact of coal mining on groundwater regime: Case studies from India and China. *Environmental Science & Pollution Research*, 23(17), 17564–17578.
- Amanatidis, P., Lyratzis, E., Angelopoulos, V., Kouloumpri, E., Skaperdas, E., Bassiliades, N., Vlahavas, I., Maris, F., Emmanouloudis, D. & Karampatzakis, D. (2025) Intelligent Water Management Through Edge-Enabled IoT, AI, and Big Data Technologies. *IoT*, 7(1), Article 5. <https://doi.org/10.3390/iot7010005>
- Choi, Y., Baek, J., & Park, S. (2020). Review of GIS-based applications for mining: Planning, operation, and environmental management. *Applied Sciences*, 10(7), 2266. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/7/2266>
- Chowdu, A., Nesbitt, P., & Brickey, A. (2022). Operations research in underground mine planning: A review. *INFORMS Transactions on Education*, 22(1), 1087. <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/inte.2021.1087>
- Chen, Z., & Xu, J. (2026). Next-generation hydrological monitoring systems in mining operations. *Nature Sustainability*, 9(2), 122–134. <https://www.nature.com/natsustainability>
- Fang, C., Li, Z., & Chen, W. (2023). Real-time monitoring of mine water systems using IoT sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 398, 134219.
- Gao, Y., & Zhang, L. (2020). Coupled hydrogeochemical models for predicting mine drainage evolution. *Environmental Earth Sciences*, 79(5), 112–124.
- Gacu, J.G., Monjardin, C.E.F., Mangulabnan, R.G.T., Pugat, G.C.E. and Solmerin, J.G. (2025) Artificial Intelligence (AI) in Surface Water Management: A Comprehensive Review of Methods, Applications, and Challenges. *Water*, 17(11), Article 1707. <https://doi.org/10.3390/w17111707>
- Ghaffari, S., Rezaei, M., & Tavakoli, R. (2018). Hydrogeological risk assessment in deep mines using probabilistic modeling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 496–510.
- Gunawan, R., Nurkhamim, and Izza F, R,. (2021). Overview Metode Perencanaan Pengelolaan Lahan Bekas Penambangan, *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XVI Tahun 2021*, Hal 345-350.
- Gunawan, R., Jalil, A. and Priyana, Y. (2024) *Perencanaan Normalisasi Sungai Untuk Penanggulangan Banjir di Daerah Pertambangan*. *Mining Science and Technology Journal*, 3(2), pp. 71–78. <https://doi.org/10.54297/minetech-journal.v3i2.660>.
- Gunawan, R., Ernawati, R. and Cahyadi, T.A. (2024) *Planning for Normalization of the Apu River in the Post-Mining Area*. *Journal of Earth and Marine Technology (JEMT)*, 5(1), pp. 8–19. <https://doi.org/10.31284/j.jemt.6432>.
- Gunawan, R. (2025) *Tahapan Penambangan Nikel Laterit*. *Mining Science and Technology Journal*, 4(2), pp. 84–92. <https://doi.org/10.54297/minetech-journal.v4i2.914>
- Holloway, E., & Cowie, S. (2019). Mine planning and the crucial role of geology and hydrogeology in modern mining. *SEG Discovery*, 19(5), 322–335. <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/segdiscovery/article-abstract/doi/10.5382/Geo-and-Mining-04/586322>
- Hu, J., & Zhao, Y. (2019). Mine drainage water reuse systems in arid zones: A sustainable approach. *Desalination and Water Treatment*, 149, 300–312.
- Kamranzad, F., Alavi, S., & Tóth, J. (2021). Water balance modeling for open-pit mining under changing climate conditions. *Water Resources Research*, 57(3), 12977.
- Li, W., Ma, Z., Li, J., Li, Q., Li, Y. and Yang, J. (2024) *Digital Twin Smart Water Conservancy: Status, Challenges, and Prospects*. *Water*, 16(14), Article 2038. <https://doi.org/10.3390/w16142038>



- Li, J., Wang, P., & Xu, K. (2017). GIS-based hydro-environmental impact modeling in mining regions of eastern China. *Environmental Modelling & Software*, 91, 216–227.
- Li, W., & Tan, X. (2019). Hydrological modeling for mine water management in semi-arid regions. *Hydrology Research*, 50(6), 1523–1538.
- Lin, C., Zhao, P., & Chen, D. (2023). Modeling hydrological impacts of nickel laterite mining in tropical environments. *Minerals*, 13(7), 822.
- Liu, X., Zhao, L., & Zhang, W. (2024). Integrated mine water management frameworks: Case studies from Asia-Pacific mining. *Resources Policy*, 89, 104872.
- Mardonova, M., & Han, Y. S. (2023). Environmental, hydrological, and social impacts of coal and nonmetal minerals mining operations. *Journal of Environmental Management*, 331, 117165. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723001755>.
- Morlot, M., Rigon, R. and Formetta, G. (2024) Hydrological digital twin model of a large anthropized Italian Alpine catchment: The Adige river basin. *Journal of Hydrology*, 629: 130587. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130587>
- Paravarzar, S., & Pourrahimian, Y. (2021). Short-term underground mine planning: A review. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 12(2), 103–120.
- Polo Salinas, J., & Marquina Araujo, J. J. (2025). Uncertainty in underground mining operations: A bibliometric and systematic literature review analysis. *World Journal of Engineering*, 22(6), 1328–1345. <https://www.emerald.com/wje/article/22/6/1328/1259124>
- Rahimi, M., Karimi, S., & Nazari, R. (2022). Application of AI and data assimilation in groundwater modeling for mining operations. *Journal of Hydrology*, 605, 127341.
- Rahnema, M., Amirmoeini, B., & Moradi Afrapoli, A. (2023). Incorporating environmental impacts into short-term mine planning: A literature survey. *Mining*, 3(1), 10. <https://www.mdpi.com/2673-6489/3/1/10>
- Rajabi, M., Gholami, R., & Azadi, S. (2022). Coupled groundwater–surface water models for pit dewatering control. *Hydrological Processes*, 36(2), e14482.
- Sharma, R., Kumar, V., & Patel, S. (2021). Hydrology-based mine closure planning: A sustainable framework. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129671.
- Sun, P., & Chen, X. (2024). Hydrological rehabilitation of post-mining landscapes using constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 194, 108871.
- Suryanarayana, S., Dutta, B., & Patel, P. (2019). Surface hydrology management in open-pit mines: Modeling and optimization. *Mining Technology*, 128(3), 141–156.
- Tan, Q., Liu, D., & Zheng, F. (2018). Hydrological processes in reclaimed mining lands: Challenges and innovations. *Water Science and Technology*, 78(5), 1114–1128.
- Tóth, J., Nemeth, P., & Fekete, L. (2020). Groundwater flow patterns and recharge zones in mining districts of Eastern Europe. *Hydrogeology Journal*, 28(8), 2749–2764.
- Wolkersdorfer, C., Nordstrom, D. K., & Beckie, R. D. (2020). Guidance for the integrated use of hydrological, geochemical, and isotopic tools in mining operations. *Mine Water and the Environment*, 39(3), 495–512. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-020-00666-x>.
- Wulandari, M.N., Gunawan, R., Sulaimansyah, S. and Bunaya, B. (2024) *Pengaruh Proses Amalgamasi Terhadap Baku Mutu Air Sungai di Desa Lamunga Kecamatan Taliwang Kabupaten Sumbawa Barat*. *Mining Science and Technology Journal*, 3(2), pp.118–126. <https://doi.org/10.54297/minetech-journal.v3i2.664>
- Yilmaz, M., Kaya, H., & Ercan, A. (2025). AI-driven hydrogeological forecasting for sustainable mining operations. *Computers & Geosciences*, 184, 105462.
- Zhang, P., Wu, X., & Liu, J. (2021). Hydrochemical evaluation of mine water in metal mines: A case study from China. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(12), 5437–5451.
- Zhao, L., & Wang, T. (2020). Prediction of pit dewatering using finite element hydrology models. *Journal of Hydrological Engineering*, 25(9), 04020045.