

Analisis Geomorfologi dan Zona Potensial Akumulasi Air Sebagai Dasar Pemodelan Sistem *Mine Dewatering* pada Tambang Batugamping di Desa Topogaro, Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah

Chrisman Lanabu¹, T. Listyani Retno Astuti², Winarti³, Ev. Budiadi⁴

^{1,2,3,4}Institute Teknologi Nasional Yogyakarta

risman.lanabu@gmail.com¹

ABSTRACT

Limestone mining activities in Topogaro Village require effective water management because carbonate geomorphology tends to produce complex flow pathways and increase surface and subsurface water accumulation. This study aims to identify water accumulation risk zones by integrating slope analysis, watershed delineation, Topographic Position Index, and ASTER spectral interpretation to support the design of mine dewatering systems. The methodology includes DEM sink filling, topographic parameter calculation, flow accumulation analysis, TPI classification, and carbonate mineral extraction using band ratios and principal component analysis. The results indicate that sub-watersheds W3 and W4 exhibit the highest flow accumulation and serve as the main contributors of runoff towards the central lowlands. The TPI categories valley and flat reinforce the identification of inundation-prone zones especially when aligned with dolomite-rich lithology and alteration zones characterized by high permeability. The discussion demonstrates that integrating geomorphological and spectral parameters effectively maps hydrological risks in tropical carbonate mining environments. The study concludes that low-slope areas with concentrated flow pathways are the primary priority for locating mine dewatering systems and designing runoff mitigation strategies. These findings provide an essential foundation for developing more accurate and adaptive dewatering designs in limestone mining operations.

Keywords : *ASTER, Carbonate, Dewatering, Geomorphology, Watershed.*

ABSTRAK

Kegiatan pertambangan batugamping di Desa Topogaro memerlukan pengelolaan air yang efektif karena kondisi geomorfologi karbonat cenderung menciptakan jalur aliran kompleks dan meningkatkan potensi akumulasi air. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi zona risiko akumulasi air melalui integrasi analisis slope, delineasi watershed, Topographic Position Index, serta interpretasi spektral citra ASTER guna mendukung perancangan sistem dewatering tambang. Metodologi penelitian meliputi pemrosesan DEM melalui sink filling, perhitungan parameter topografi, analisis flow accumulation, klasifikasi TPI, dan ekstraksi mineral karbonat menggunakan band ratio dan PCA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sub-watershed W3 dan W4 memiliki akumulasi aliran tertinggi dan menjadi sumber utama limpasan yang mengarah ke lembah tengah. Kategori TPI valley dan flat memperkuat identifikasi zona genangan terutama ketika berimpit dengan litologi dolomit dan zona alterasi yang memiliki permeabilitas tinggi. Pembahasan menunjukkan bahwa integrasi parameter geomorfologi dan spektral dapat secara efektif memetakan risiko hidrologi tambang terutama pada lingkungan karbonat tropis. Kesimpulan penelitian menegaskan bahwa area berlereng rendah dengan aliran terkonsentrasi merupakan prioritas utama untuk penempatan sistem mine dewatering dan strategi mitigasi limpasan permukaan. Temuan ini memberikan dasar penting bagi pengembangan desain dewatering yang lebih akurat dan adaptif.

Kata kunci : ASTER, Dewatering, Geomorfologi, Karbonat, Watershed.

PENDAHULUAN

Perkembangan kegiatan pertambangan di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan naiknya kebutuhan bahan baku industri dan konstruksi (Tarolli et al., 2018). Aktivitas ini tidak hanya menuntut ketersediaan sumber daya mineral tetapi juga menuntut adanya pengelolaan lingkungan yang lebih sistematis dan berkelanjutan (Joann & Allan, 2021). Salah satu aspek penting yang sering menjadi tantangan di berbagai lokasi tambang adalah pengendalian air yang masuk ke area penambangan (Yuan et al., 2025). Air permukaan dan air tanah dapat memengaruhi stabilitas lereng, kelancaran operasional, serta keamanan pekerja di lapangan. Kondisi tersebut membuat pemahaman terhadap dinamika air di kawasan tambang menjadi kebutuhan yang tidak dapat diabaikan.

Pada daerah pertambangan batugamping, permasalahan air cenderung lebih kompleks karena sifat batuan karbonat yang umumnya bersifat rekahan dan memiliki porositas sekunder yang tinggi (Luino et al., 2024). Karakteristik geomorfologi wilayah dengan litologi karbonat sering membentuk pola aliran air yang tidak homogen, sehingga air dapat masuk melalui rekahan, pelarutan, dan rongga bawah permukaan (Eamus et al., 2016). Kondisi ini dapat menyebabkan munculnya genangan air pada area kerja tambang, bahkan pada musim kemarau (Zhe et al., 2023). Fenomena tersebut menuntut adanya identifikasi menyeluruh terhadap pola topografi dan potensi akumulasi air permukaan. Oleh karena itu, penelitian mengenai hubungan geomorfologi dan perilaku air sangat penting pada kawasan tambang batugamping.

Desa Topogaro di Kecamatan Bungku Barat, Kabupaten Morowali, merupakan salah satu wilayah yang mengalami perkembangan signifikan dalam kegiatan pertambangan (Rybnikova et al., 2017). Pertumbuhan sektor ini memberikan dampak ekonomi yang nyata, namun juga membawa tantangan teknis yang perlu dikelola dengan baik (Wu et al., 2024). Wilayah tersebut memiliki variasi bentuk lahan, kemiringan lereng, dan pola aliran air yang dibentuk oleh proses geomorfologi setempat (Machowski et al., 2016). Dinamika tersebut dapat berpengaruh terhadap proses dewatering dan kondisi operasional tambang yang berada di kawasan tersebut. Untuk itu, pemetaan geomorfologi secara akurat menjadi langkah awal dalam memahami karakter wilayah secara menyeluruh.

Pemanfaatan teknologi geospasial telah menjadi pendekatan yang semakin diandalkan dalam analisis kondisi lingkungan tambang (Okeke et al., 2019). Data citra satelit, model elevasi, serta teknik analisis topografi memberikan peluang untuk menggambarkan kondisi permukaan bumi dengan presisi yang lebih baik dibandingkan metode konvensional (Mokhtar, 2023). Teknologi ini memungkinkan identifikasi area rawan akumulasi air, jalur aliran permukaan, serta area cekungan secara lebih cepat dan efisien (Wang et al., 2024c). Dengan demikian, penggunaan data geospasial dapat meningkatkan kualitas perencanaan operasional tambang. Hal

ini juga mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan air tambang secara lebih terukur.

Analisis lereng atau slope analysis merupakan aspek penting dalam memahami potensi pergerakan air dan kestabilan suatu kawasan tambang (Zhang et al., 2025). Kemiringan yang curam dapat mempercepat aliran permukaan, sedangkan lereng landai berpotensi menjadi area genangan (Flatley, 2022). Pemahaman terhadap pola kemiringan ini dapat membantu dalam memprediksi arah aliran air ketika musim hujan (Wang et al., 2024a). Selain itu, informasi kemiringan dapat menjadi dasar dalam menentukan lokasi saluran drainase atau sumuran dewatering. Dengan analisis tersebut, manajemen area tambang dapat dilakukan secara lebih efektif.

Watershed analysis juga menjadi elemen penting dalam analisis geomorfologi wilayah tambang (Riyadi & Cahyadi, 2025). Daerah tangkapan air menentukan bagaimana air mengalir, berkumpul, atau terdistribusi pada suatu sistem geomorfik (Barsi & Slingerland, 2025). Dengan mengetahui batas-batas watershed, aliran air dapat dipetakan secara lebih menyeluruh dan runtut (Wang et al., 2024b). Analisis ini dapat membantu memahami potensi limpasan permukaan dan area rawan banjir kecil skala lokal. Pengetahuan tersebut sangat bermanfaat untuk penataan sistem drainase tambang.

Selain slope dan watershed, Topographic Position Index (TPI) menjadi indikator yang efektif untuk mengidentifikasi bentuk lahan secara lebih detail (Tarolli et al., 2018). TPI mampu membedakan apakah suatu area berada pada punggung, lereng tengah, lembah, atau cekungan (Machowski et al., 2016). Identifikasi bentuk lahan ini sangat relevan untuk mengetahui area yang lebih rentan menampung air permukaan (Galperin et al., 2017). Dalam konteks tambang batugamping, area cekungan atau lembah kecil dapat menjadi lokasi genangan yang mengganggu operasional. Oleh karena itu, analisis TPI membantu memperjelas karakter fisik permukaan wilayah penelitian.

Citra ASTER menjadi salah satu sumber data yang banyak digunakan dalam pemetaan geologi dan geomorfologi (Errami et al., 2023). Data ini memungkinkan identifikasi litologi, pola rekahan, dan sifat mineral tertentu yang terkait dengan kemampuan batuan menampung atau mengalirkan air (Testa et al., 2018). Pada kawasan batugamping, citra ASTER dapat memberikan gambaran spektral mengenai kondisi batuan karbonat, zona alterasi, maupun indikasi area pelapukan (Sekandari et al., 2022). Informasi tersebut dapat memberikan konteks tambahan dalam menganalisis potensi jalur masuknya air ke area tambang. Dengan demikian, integrasi data ASTER menjadi elemen penting dalam memahami karakter geologi wilayah.

Wilayah Morowali secara umum memiliki dinamika geomorfologi yang cukup kompleks karena pengaruh tektonik dan litologi beragam (Pambudi et al., 2020). Variasi bentang alam ini menciptakan pola aliran permukaan yang berbeda-beda pada setiap satuan lahan (Khaleghi et al., 2020). Kondisi tersebut dapat berdampak pada pengelolaan air tambang yang berada di dalam kawasan tersebut (Wang et al.,

2024c). Oleh karena itu, memahami geomorfologi lokal merupakan langkah strategis untuk meminimalkan risiko gangguan akibat air pada area operasional. Pengetahuan geomorfologi yang baik juga mendukung pemodelan dewatering secara lebih akurat.

Kondisi iklim tropis di Sulawesi Tengah, termasuk Morowali, turut memberikan kontribusi terhadap tantangan pengelolaan air tambang (Eamus et al., 2016). Curah hujan yang tinggi pada periode tertentu dapat meningkatkan volume air yang masuk ke area tambang (Zhe et al., 2023). Hal ini menuntut sistem drainase dan dewatering yang lebih adaptif terhadap perubahan musiman (Yuan et al., 2025). Dengan demikian, analisis topografi dan geomorfologi diperlukan untuk memperkirakan pola akumulasi air pada kondisi cuaca ekstrem. Kesiapan dalam menghadapi variabilitas iklim menjadi faktor penting dalam menjaga kesinambungan operasional tambang.

Penelitian mengenai geomorfologi, hidrologi tambang, dan pemanfaatan data penginderaan jauh telah banyak dilakukan oleh berbagai peneliti sebelumnya. Abrams dan Yamaguchi (2019) menunjukkan bahwa citra ASTER memiliki kontribusi besar dalam pemetaan litologi dan eksplorasi mineral, terutama melalui kemampuan spektralnya dalam membedakan satuan batuan. Chernos et al. (2022) meneliti dampak gabungan antara penambangan terbuka dan perubahan iklim pada debit sungai serta kualitas air, dan hasilnya menunjukkan bahwa aktivitas tambang dapat memperbesar fluktuasi hidrologi di daerah aliran sungai pegunungan. Du et al. (2022) menganalisis distribusi spasial dan temporal airtanah pada tambang terbuka dan menemukan bahwa dinamika airtanah sangat dipengaruhi oleh kondisi morfologi serta pola penurunan muka air akibat kegiatan penambangan.

Kajian lain juga memberikan gambaran mengenai tantangan dewatering dan perubahan lingkungan akibat aktivitas tambang. Mahmutoğlu et al. (2019) meneliti terjadinya sinkhole akibat proses dewatering pada tambang terbuka dan menemukan bahwa penurunan muka air tanah dapat memicu runtuhnya permukaan di wilayah karbonat. Modrovits et al. (2021) membandingkan berbagai model kurva pertumbuhan untuk memprediksi perubahan muka air tanah setelah proses dewatering dihentikan di kawasan karst, dan hasilnya menunjukkan bahwa pemilihan model matematis yang tepat sangat menentukan akurasi prediksi. Ngoie et al. (2017) mengembangkan pendekatan jaringan saraf tiruan berbasis data sintesis untuk optimasi sistem dewatering dan menunjukkan bahwa metode tersebut mampu meningkatkan efektivitas pengelolaan air tambang.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas dinamika air tanah, pemetaan geomorfologi, hingga penggunaan citra satelit dalam mendukung pengelolaan tambang, kajian yang secara khusus memadukan analisis slope, watershed, TPI, dan citra ASTER untuk mengidentifikasi zona akumulasi air pada tambang batugamping masih sangat terbatas. Penelitian sebelumnya banyak berfokus pada tambang batu bara, prediksi muka air tanah, atau analisis dampak hidrologi berskala DAS, sehingga belum secara spesifik menjelaskan hubungan geomorfologi permukaan dengan potensi genangan pada kawasan batuan karbonat. Kondisi ini menunjukkan adanya

kebutuhan penelitian yang lebih terarah pada karakter geomorfologi Desa Topogaro yang memiliki kondisi topografi variatif, struktur rekahan karbonat, serta potensi akumulasi air yang memengaruhi operasional tambang. Oleh karena itu, penelitian ini menempati posisi penting dalam mengisi kekosongan literatur terkait integrasi analisis geospasial untuk mendukung perencanaan mine dewatering di kawasan batugamping.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakter geomorfologi wilayah Desa Topogaro melalui pendekatan geospasial yang meliputi analisis kemiringan lereng, analisis daerah tangkapan air, identifikasi bentuk lahan berbasis TPI, serta interpretasi spektral mineral dari citra ASTER guna menentukan zona potensial akumulasi air permukaan. Melalui kajian tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam bentuk informasi yang lebih akurat mengenai kondisi fisik wilayah yang relevan bagi proses perancangan sistem mine dewatering. Selain itu, hasil penelitian dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan teknis dalam pengelolaan operasional tambang batugamping, khususnya terkait mitigasi risiko genangan, peningkatan keselamatan kerja, serta optimalisasi drainase tambang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-geospasial yang bertujuan untuk menganalisis karakter geomorfologi wilayah penelitian dan mengidentifikasi zona potensial akumulasi air permukaan di Desa Topogaro. Pendekatan ini dipilih karena mampu menggambarkan kondisi fisik permukaan bumi secara kuantitatif melalui integrasi data DEM, citra satelit, serta teknik pemodelan keruangan. Tahapan metode mencakup pengumpulan data sekunder, pengolahan data geospasial, analisis topografi, analisis bentuk lahan, dan interpretasi hasil. Seluruh proses difokuskan untuk menghasilkan peta dan tabel analisis yang relevan bagi perencanaan sistem mine dewatering. Dengan demikian, metode penelitian ini berfungsi sebagai dasar untuk memahami dinamika geomorfologi yang berpengaruh terhadap akumulasi air tambang.

Data yang digunakan terdiri atas Digital Elevation Model (DEM) untuk analisis topografi dan citra ASTER Level 1T untuk analisis spektral mineral serta karakter litologi. Data DEM digunakan untuk menurunkan parameter kemiringan lereng, delineasi watershed, dan perhitungan Topographic Position Index (TPI), sedangkan citra ASTER digunakan untuk mengekstraksi informasi mengenai litologi karbonat, zona alterasi, dan pola rekahan yang berpotensi menjadi jalur masuknya air. Semua data diperoleh dari sumber resmi seperti USGS dan NASA yang menyediakan resolusi memadai untuk analisis geomorfologi berskala lokal. Selain itu, peta geologi regional dan data administratif wilayah Morowali digunakan sebagai penunjang proses interpretasi. Integrasi antar data dilakukan melalui Sistem Informasi Geografis (SIG).

Proses pengolahan data dilakukan dalam beberapa tahapan menggunakan perangkat lunak SIG seperti ArcGIS atau QGIS. Pertama, data DEM direkonstruksi melalui proses sink filling untuk menghilangkan depresi artefaktual sebelum

melakukan analisis lebih lanjut. Selanjutnya dilakukan slope analysis untuk menghasilkan peta kemiringan lereng, yang kemudian diklasifikasikan berdasarkan tingkat kecuraman yang relevan dengan potensi aliran dan akumulasi air. Tahap berikutnya adalah watershed delineation yang dilakukan dengan metode flow direction dan flow accumulation sehingga diperoleh batas daerah tangkapan air serta jalur aliran permukaan. Output dari tahap ini menjadi dasar untuk memahami pola distribusi air di wilayah penelitian.

Tahapan berikutnya adalah analisis Topographic Position Index (TPI) yang digunakan untuk mengidentifikasi bentuk lahan seperti punggung, lereng tengah, lembah, dan cekungan. Perhitungan TPI dilakukan melalui pemrosesan DEM dengan radius analisis yang disesuaikan dengan variasi topografi Desa Topogaro, sehingga mampu menampilkan bentuk lahan secara representatif. Hasil TPI kemudian dikombinasikan dengan slope dan watershed untuk menentukan area yang memiliki kecenderungan tinggi terhadap akumulasi air. Selanjutnya, citra ASTER diproses menggunakan teknik band ratio dan principal component analysis (PCA) untuk mengidentifikasi mineral karbonat, zona rekahan, serta area alterasi yang dapat berpengaruh pada permeabilitas batuan. Integrasi seluruh parameter menghasilkan model keruangan yang menunjukkan daerah-daerah kritis terkait potensi genangan air.

Hasil berbagai analisis tersebut kemudian disintesis menjadi beberapa peta tematik dan tabel interpretasi yang menggambarkan kondisi geomorfologi wilayah penelitian. Proses sintesis dilakukan dengan menumpangtindihkan (overlay) seluruh parameter, sehingga diperoleh zona prioritas yang memiliki potensi akumulasi air tertinggi. Tahap akhir penelitian adalah melakukan interpretasi terhadap hasil pemetaan dengan mengaitkannya pada kebutuhan operasional mine dewatering pada tambang batugamping. Interpretasi tersebut menghasilkan rekomendasi teknis mengenai area yang perlu mendapat perhatian dalam perancangan saluran drainase, lokasi sumuran dewatering, serta strategi pengelolaan air permukaan yang sesuai dengan karakter geomorfologi Desa Topogaro. Dengan pendekatan ini, metode penelitian mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai hubungan topografi, geologi, dan distribusi air pada area tambang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil

Hasil penelitian ini menyajikan karakter geomorfologi Desa Topogaro berdasarkan analisis geospasial yang meliputi kemiringan lereng, delineasi daerah tangkapan air (watershed), Topographic Position Index (TPI), serta interpretasi spektral mineral dari citra ASTER Level 1T dengan resolusi 15–30 meter. Seluruh parameter dianalisis menggunakan DEM yang telah diproses melalui tahapan sink-filling untuk mengurangi kesalahan elevasi lokal. Integrasi antarparameter dilakukan untuk mengidentifikasi zona prioritas akumulasi air yang berpotensi memengaruhi

aktivitas pertambangan batugamping. Bagian berikut menyajikan hasil analisis secara terstruktur melalui tabel, grafik, dan ringkasan interpretatif.

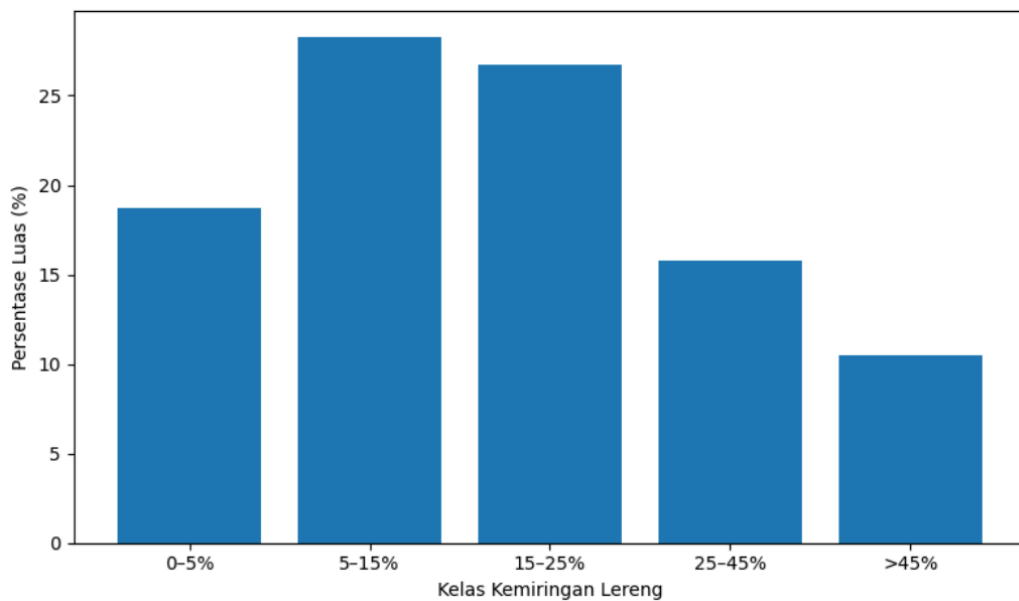
Analisis kemiringan lereng menunjukkan variasi topografi yang cukup kontras di wilayah penelitian. Kelas kemiringan menengah (5–25%) mendominasi lebih dari separuh luas wilayah, sementara kelas 0–5% hanya mencakup sebagian area dataran dan lembah kecil. Distribusi ini menggambarkan bahwa wilayah penelitian didominasi oleh morfologi perbukitan karbonat dengan transisi lereng yang relatif halus menuju dataran tengah. Detail pembagian kelas kemiringan disajikan pada Tabel 1, yang menunjukkan komposisi luas area pada setiap kategori slope.

Tabel 1. Distribusi Kemiringan Lereng (%) Wilayah Penelitian

Kelas Lereng (%)	Luas (km ²)	Persentase (%)	Interpretasi
0–5%	2.81	18.7	Zona genangan potensial
5–15%	4.25	28.3	Aliran lambat–sedang
15–25%	4.01	26.7	Aliran permukaan stabil
25–45%	2.38	15.8	Aliran cepat, erosi moderat
>45%	1.61	10.5	Aliran sangat cepat, erosi tinggi

Tabel 1 menunjukkan bahwa kelas lereng 5–15% merupakan kategori terluas, diikuti oleh 15–25%, yang bersama-sama mencakup 55% dari total area penelitian. Area dataran dengan kemiringan 0–5% memiliki luas 18.7% dan menjadi indikator awal potensi genangan. Sementara itu, lereng curam di atas 25% terdistribusi di sisi perbukitan dan berfungsi sebagai zona kontribusi aliran. Secara keseluruhan, pola ini memberikan gambaran awal mengenai sebaran topografi yang memengaruhi arah aliran permukaan.

Distribusi kemiringan lereng memperlihatkan pola variasi topografi secara visual melalui perbandingan persentase setiap kelas lereng seperti tervisualisasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Distribusi Kemiringan Lereng (%)

Gambar 1 memperlihatkan pola distribusi kemiringan secara visual berdasarkan persentase luas pada setiap kategori slope. Dominasi kelas 5–25% tampak jelas, dengan penurunan nilai signifikan pada kelas lereng curam. Grafik memberikan konfirmasi visual terhadap pola topografi yang bergradasi dari dataran rendah menuju punggung karbonat.

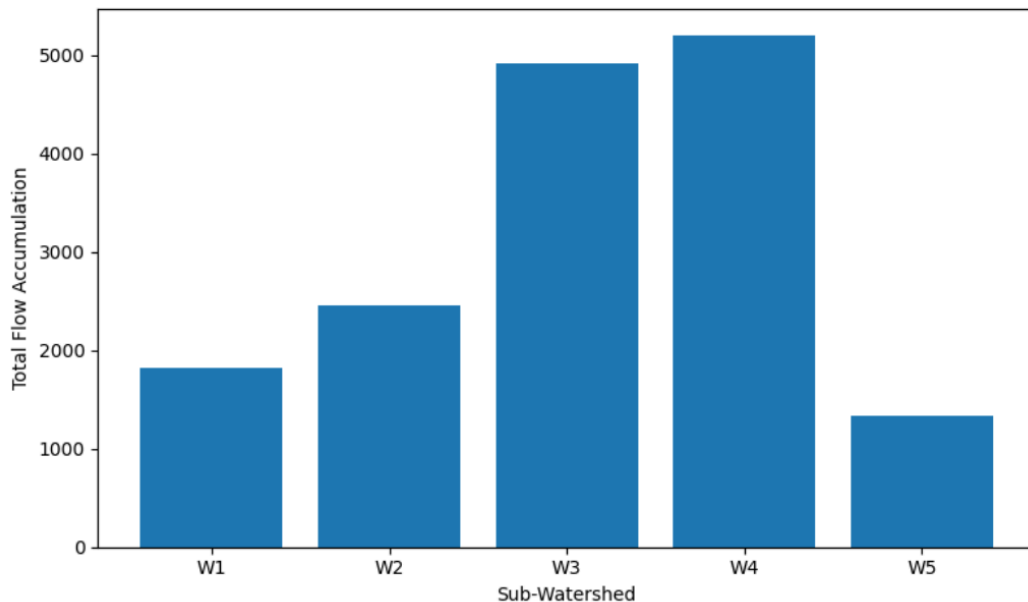
Selanjutnya, analisis watershed mengidentifikasi lima sub-watershed yang berperan penting dalam pengendalian arah aliran permukaan. Aliran umumnya bergerak dari bagian perbukitan di utara dan barat menuju dataran tengah yang merupakan area convergent flow. Nilai flow accumulation tertinggi ditemukan pada sub-watershed W3 dan W4, menunjukkan bahwa kedua area tersebut menerima limpasan terbesar dari elevasi tinggi. Rincian karakteristik tiap sub-watershed ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Sub-Watershed Wilayah Penelitian

Sub-Watershed	Luas (km ²)	Rata-Rata Slope (%)	Total Flow Accumulation	Potensi Akumulasi Air
W1	3.12	12.4	1,820	Rendah
W2	2.76	9.7	2,455	Sedang
W3	4.33	14.8	4,912	Tinggi
W4	3.89	16.3	5,204	Tinggi
W5	2.41	8.9	1,332	Rendah

Hasil flow accumulation menunjukkan perbedaan signifikan antar sub-watershed. W3 dan W4 memiliki akumulasi aliran tertinggi, menandakan bahwa keduanya menerima limpasan terbesar dari area perbukitan. Sebaliknya, W1 dan W5

menunjukkan akumulasi relatif rendah, yang mencerminkan kapasitas tangkapan kecil serta jaringan aliran yang kurang terkonsolidasi. Variasi ini memberikan gambaran awal mengenai distribusi potensi konsentrasi limpasan pada skala sub-watershed, yang penting dalam menentukan area prioritas untuk pengelolaan aliran permukaan.



Gambar 2. Pola Flow Accumulation Antar Sub-Watershed

Gambar 2 memperlihatkan perbandingan nilai flow accumulation antar sub-watershed secara visual. W3 dan W4 terlihat menonjol sebagai dua wilayah dengan nilai paling tinggi, konsisten dengan hasil perhitungan pada Tabel 2. Grafik ini membantu menggambarkan pola kontribusi limpasan dari masing-masing satuan wilayah.

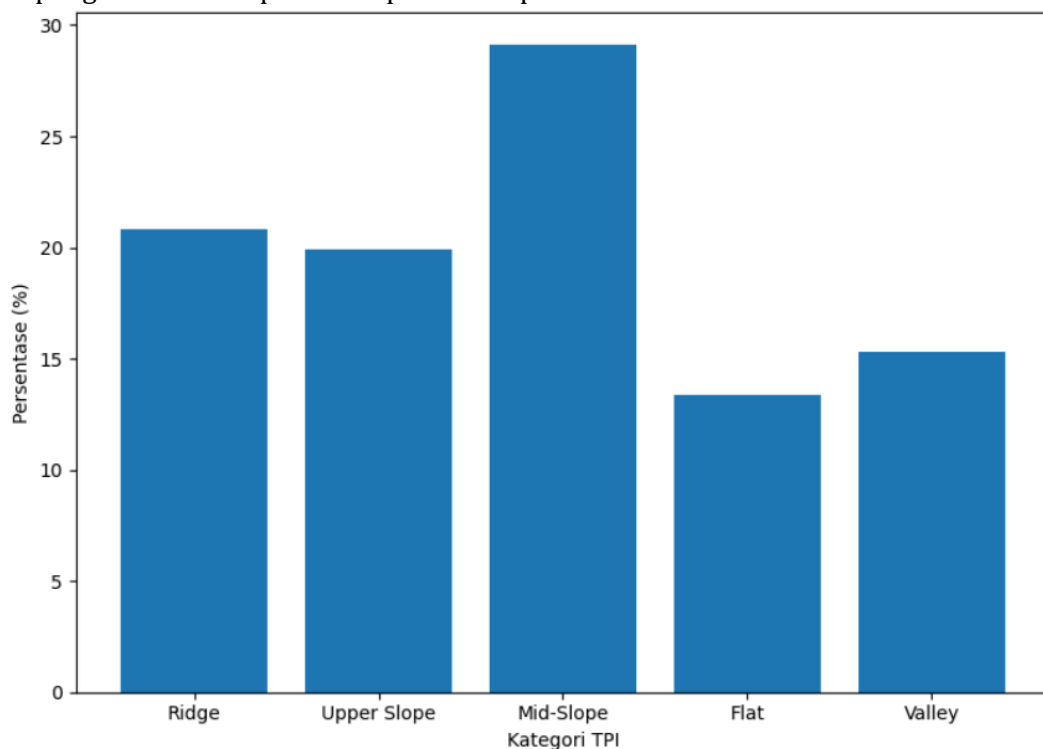
Analisis Topographic Position Index (TPI) mengidentifikasi variasi bentuk lahan yang terbagi menjadi lima kategori utama, yaitu ridge, upper slope, mid-slope, flat, dan valley. Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa wilayah penelitian didominasi oleh kategori mid-slope dan ridge, sementara area flat dan valley menempati proporsi yang lebih kecil dan cenderung terpusat pada dataran tengah serta lembah-lembah sempit. Distribusi kategori TPI ini memberikan gambaran awal mengenai konfigurasi geomorfologi yang memengaruhi pola arah limpasan dan potensi akumulasi air permukaan. Rincian luasan masing-masing kategori ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Klasifikasi TPI Wilayah Penelitian

Kategori TPI	Luas (km ²)	Persentase (%)	Interpretasi Geomorfologi
Ridge	3.12	20.8	Punggungan; zona sumber aliran
Upper Slope	2.98	19.9	Lereng atas; aliran cepat
Mid-Slope	4.36	29.1	Lereng tengah; zona transisi
Flat	2.01	13.4	Dataran; akumulasi rendah-sedang

Kategori TPI	Luas (km ²)	Persentase (%)	Interpretasi Geomorfologi
Valley	2.29	15.3	Lembah; zona akumulasi tinggi

Kategori mid-slope merupakan bagian paling luas dengan 29.1%, diikuti oleh ridge sebesar 20.8%. Sementara itu, kategori valley dan flat mencakup 28.7% secara keseluruhan dan menjadi indikator awal area yang berpotensi menahan air permukaan karena posisinya pada elevasi relatif rendah. Variasi proporsi antar kategori mencerminkan struktur geomorfologi berundak khas batuan karbonat yang berpengaruh terhadap arah limpasan dan pola konsentrasi air.



Gambar 3. Distribusi Kategori TPI Wilayah Penelitian

Gambar ini memperlihatkan distribusi persentase masing-masing kategori TPI secara visual. Dominasi kategori mid-slope dan ridge tampak jelas, sementara kategori valley terlihat sebagai unit yang lebih kecil namun relevan sebagai lokasi potensial akumulasi air. Grafik ini membantu menunjukkan hubungan antara posisi topografi dan kapasitas setiap zona dalam memfasilitasi aliran maupun penahanan air permukaan.

Analisis citra ASTER digunakan untuk mengidentifikasi karakter litologi karbonat dan zona alterasi pada wilayah penelitian. Hasil pemrosesan band ratio dan principal component analysis (PCA) menunjukkan persebaran litologi karbonat masif pada bagian tengah dan selatan, disertai keberadaan mineral kalsit dan dolomit yang terdeteksi melalui respons spektral karakteristik. Selain itu, zona alterasi tampak menonjol pada bagian barat dan timur, yang ditafsirkan sebagai area pelapukan intens dan rekahan batuan. Informasi ini memberikan gambaran mengenai variasi

permeabilitas batuan karbonat, yang berpotensi memengaruhi jalur air bawah permukaan. Rincian hasil interpretasi spektral disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Interpretasi Spektral Citra ASTER Wilayah Penelitian

Mineral / Alterasi	Lokasi Utama	Indikasi Geologis	Potensi Kontribusi Terhadap Akumulasi Air
Kalsit	Bagian tengah	Litologi karbonat masif	Permeabilitas sedang; jalur air sekunder
Dolomit	Selatan wilayah	Batuan karbonat terdolomitasi	Permeabilitas tinggi; zona resapan
Zona Alterasi	Barat dan timur	Pelapukan dan rekahan intens	Potensi tinggi sebagai jalur masuk air
Silika minor	Titik-titik lokal	Fragmen kuarsa terdispersi	Kontribusi rendah terhadap aliran air

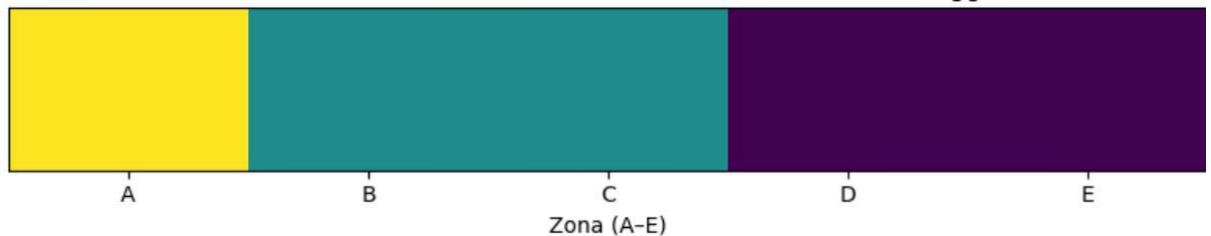
Distribusi mineral dan zona alterasi tersebut memberikan indikasi mengenai area dengan permeabilitas tinggi, terutama pada zona yang didominasi dolomit atau rekahan karbonat. Informasi ini menjadi penting ketika dikombinasikan dengan parameter topografi dalam mengidentifikasi wilayah yang berpotensi menampung atau mengalirkan air secara signifikan.

Integrasi seluruh parameter analisis yaitu slope, watershed, TPI, dan interpretasi ASTER menghasilkan peta zonasi potensi akumulasi air. Hasil overlay menunjukkan bahwa area dengan risiko tinggi terkonsentrasi pada zona lembah dengan kemiringan rendah dan nilai flow accumulation besar, khususnya pada hilir sub-watershed W3 dan W4. Zona dengan risiko sedang umumnya berada pada area transisi mid-slope, sedangkan zona risiko rendah berada pada area perbukitan dengan kemiringan curam serta litologi karbonat masif berpermeabilitas lebih rendah. Ringkasan kombinasi parameter dominan dan rekomendasi teknis ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Zona Potensi Akumulasi Air Berdasarkan Integrasi Parameter

Zona	Kombinasi Parameter Dominan	Tingkat Risiko	Rekomendasi Teknis
A	Slope rendah + Valley TPI + Flow Accumulation tinggi + Zona alterasi	Tinggi	Penempatan sumuran utama; drainase terbuka
B	Slope rendah-sedang + Flat TPI + Flow Accumulation sedang	Sedang	Perbaikan saluran permukaan; pemantauan berkala
C	Slope sedang + Mid-slope TPI + Rekahan karbonat	Sedang	Drainase samping; penguatan lereng lokal
D	Slope curam + Ridge/Upper slope TPI	Rendah	Tidak prioritas; hanya perlu kontrol limpasan

Zona	Kombinasi Parameter Dominan	Tingkat Risiko	Rekomendasi Teknis
E	Area dengan litologi karbonat masif namun flow accumulation rendah	Rendah	Pemetaan lanjutan jika aktivitas tambang meluas



Gambar 4. Peta Risiko Akumulasi Air (Zonasi Rendah–Tinggi)

Gambar ini menampilkan distribusi risiko genangan berdasarkan tiga kategori utama, yaitu tinggi, sedang, dan rendah. Zona risiko tinggi tampil paling menonjol pada area lembah di hilir W3 dan W4, sedangkan zona sedang tersebar pada daerah peralihan yang masih menerima limpasan dari wilayah perbukitan. Area risiko rendah didominasi oleh punggung karbonat dan lereng curam. Peta ini mengilustrasikan hubungan spasial antara bentuk lahan, aliran permukaan, dan karakter litologi dalam menentukan lokasi akumulasi air.

Hasil integrasi parameter menunjukkan bahwa wilayah penelitian memiliki pola akumulasi air yang dipengaruhi kuat oleh kombinasi kemiringan lereng rendah, posisi topografi rendah (valley dan flat), nilai flow accumulation tinggi, serta keberadaan litologi permeabel seperti dolomit dan zona alterasi. Informasi ini memberikan dasar teknis untuk penentuan lokasi sumuran dewatering, perencanaan saluran drainase, dan pengelolaan limpasan pada area tambang batugamping. Temuan tersebut juga menjadi dasar bagi pembahasan lebih lanjut mengenai peran geomorfologi dan litologi dalam mendukung desain sistem dewatering yang efisien.

B. Pembahasan

Pembahasan hasil penelitian ini menunjukkan bahwa karakter geomorfologi Desa Topogaro memiliki keterkaitan kuat dengan pola akumulasi air, terutama karena dominasi morfologi karbonat yang membentuk pola lereng undak dan lembah sempit. Distribusi kelas kemiringan 5–25% yang mendominasi wilayah penelitian mengindikasikan bahwa aliran permukaan bergerak secara gradual dari punggung karbonat menuju dataran tengah, sehingga memperbesar potensi akumulasi air pada area berlereng rendah. Temuan ini sejalan dengan konsep geomorfologi tambang yang menekankan peran slope sebagai pengontrol utama dinamika limpasan, sebagaimana ditegaskan oleh Barsi and Slingerland (2025) dalam kajian desain geomorfik pascatambang. Dengan demikian, pola lereng yang diidentifikasi dalam penelitian ini memberikan dasar penting dalam memahami pergerakan air pada sistem perbukitan karbonat tropis.

Delineasi sub-watershed memperlihatkan perbedaan signifikan dalam kontribusi aliran permukaan, khususnya pada sub-watershed W3 dan W4 yang memiliki nilai flow accumulation tertinggi. Temuan ini mengindikasikan adanya jalur konsentrasi aliran yang kuat dari zona perbukitan menuju lembah tengah, suatu fenomena yang juga ditemukan oleh Chernos et al. (2022) dalam pemodelan dinamika limpasan pada daerah tambang di lingkungan pegunungan. Pola konvergensi aliran pada Topogaro menunjukkan mekanisme hidrologi serupa, di mana kombinasi elevasi tinggi dan morfologi karbonat menyebabkan akumulasi air terkonsentrasi pada hilir sub-watershed. Hal ini menegaskan bahwa karakter watershed lokal berperan penting dalam menentukan distribusi risiko genangan pada daerah tambang terbuka.

Interpretasi Topographic Position Index (TPI) menunjukkan dominasi kategori mid-slope dan ridge yang berfungsi sebagai zona pelepas air, sementara valley dan flat berada pada area yang secara topografis terdefinisi sebagai penampung alami. Distribusi TPI ini mengonfirmasi bahwa bentuk lahan memiliki kontrol signifikan terhadap arah dan intensitas aliran permukaan. Pola ini sejalan dengan temuan Lian et al. (2021) yang menunjukkan bahwa struktur geomorfologi berjenjang pada tambang batu bara memengaruhi pergerakan kelembapan tanah di zona vadose. Dengan demikian, data TPI pada penelitian ini tidak hanya memperkuat identifikasi zona akumulasi air, tetapi juga menjelaskan bagaimana konfigurasi geomorfologi karbonat menciptakan sistem hidrologi lokal yang kompleks.

Analisis spektral citra ASTER menegaskan bahwa litologi karbonat—terutama kalsit, dolomit, dan zona alterasi—memiliki kontribusi besar terhadap jalur pergerakan air bawah permukaan. Persebaran dolomit di bagian selatan dan zona alterasi di barat-timur mengindikasikan adanya permeabilitas tinggi yang memungkinkan air merembes melalui rekahan karbonat. Temuan ini konsisten dengan kontribusi ASTER dalam pemetaan litologi sebagaimana dijelaskan oleh Abrams and Yamaguchi (2019), yang menunjukkan bahwa ASTER efektif dalam mengidentifikasi mineral karbonat dan zona alterasi pada wilayah pertambangan. Lebih lanjut, penelitian Adiri et al. (2016) dan Rezaei et al. (2020) juga membuktikan bahwa citra ASTER mampu mendeteksi variasi spektral litologi dengan akurasi tinggi pada lingkungan karbonat. Dengan demikian, hasil ASTER pada penelitian ini dapat dianggap valid dalam memetakan kondisi geologis permukaan yang berdampak pada pergerakan air.

Analisis ini juga memperlihatkan kesesuaian dengan temuan Fatima et al. (2017) yang menegaskan kemampuan ASTER dalam mendeteksi mineralisasi karbonat dan menentukan zona pelapukan. Distribusi mineral karbonat dan alterasi pada Topogaro yang teridentifikasi melalui band ratio ASTER konsisten dengan respons spektral yang ditemukan dalam studi-studi tersebut. Zona alterasi yang memiliki intensitas spektral tinggi juga berpotensi menjadi jalur masuknya air bawah permukaan, mendukung proses infiltrasi yang berperan dalam pembentukan genangan internal. Hal ini memperkuat argumentasi bahwa litologi karbonat

berperan ganda dalam sistem mine dewatering—sebagai jalur resapan sekaligus sebagai pengumpul air apabila berada pada area topografi rendah.

Integrasi seluruh parameter menunjukkan bahwa area lembah berkemiringan rendah dengan nilai flow accumulation tinggi merupakan zona berisiko paling besar terhadap akumulasi air. Pola ini sejalan dengan temuan Du et al. (2022) yang menjelaskan bahwa akumulasi air bawah permukaan pada tambang terbuka dipengaruhi oleh struktur hidrogeologi dan morfologi cekungan. Selain itu, bahaya air yang dihasilkan dari transisi tambang terbuka ke tambang bawah tanah sebagaimana dilaporkan oleh Zhang et al. (2019) memberikan gambaran bahwa kombinasi topografi rendah dan permeabilitas karbonat dapat menciptakan kondisi rentan terhadap air limpasan maupun air tanah. Dengan demikian, integrasi data pada penelitian ini memberikan gambaran yang komprehensif untuk dasar teknis perancangan dewatering.

Tingkat risiko genangan yang dihasilkan penelitian ini juga memiliki relevansi dengan model penurunan muka air tanah dan perubahan hidrologi seperti yang dijelaskan oleh Modrovits et al. (2021) serta Chen et al. (2024), yang menekankan bahwa perubahan sistem hidrogeologi akibat aktivitas penambangan dapat berdampak signifikan terhadap aliran permukaan dan bawah permukaan. Selain itu, model prediksi berbasis kecerdasan buatan yang dikembangkan oleh Ngoie et al. (2017) menunjukkan bahwa sistem dewatering dipengaruhi oleh variabel geologi, topografi, dan perilaku air tanah, selaras dengan parameter-parameter yang digunakan dalam penelitian ini. Dengan demikian, pendekatan integratif yang diterapkan pada Topogaro mencerminkan perkembangan terbaru dalam analisis risiko hidrologi pertambangan.

Hasil penelitian ini juga bersesuaian dengan temuan Zamroni et al. (2022) yang menegaskan bahwa sistem hidrogeokimia pada daerah pertambangan batugamping sangat dipengaruhi oleh rekahan karbonat dan pola aliran permukaan yang bergerak menuju lembah. Sementara itu, Eamus et al. (2016) mengingatkan bahwa perubahan karakteristik hidrologi akibat eksploitasi karbonat dapat berdampak pada ekosistem yang bergantung pada air tanah, sehingga temuan penelitian ini perlu dipertimbangkan dalam konteks penggunaan lahan jangka panjang. Penelitian Ignacy (2025) lebih jauh menekankan bahwa zonasi risiko berbasis elevasi relatif dan akumulasi air dapat mendukung mitigasi geohazard, yang secara langsung relevan dengan pemetaan risiko genangan pada Topogaro. Oleh karena itu, integrasi parameter yang dilakukan pada penelitian ini sudah sesuai dengan pendekatan kontemporer dalam analisis risiko hidrologi pertambangan.

Meskipun hasil penelitian ini memberikan gambaran komprehensif mengenai potensi akumulasi air di Desa Topogaro, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dicatat. Resolusi DEM 15–30 meter dapat menyebabkan hilangnya detail mikro-topografi yang berpotensi memengaruhi aliran skala kecil. Selain itu, analisis litologi dan alterasi berbasis ASTER memerlukan verifikasi lapangan dan analisis petrografi untuk memastikan akurasi klasifikasi mineral. Kondisi hidrologi musiman juga tidak

dimasukkan dalam model, padahal variabilitas curah hujan dapat mempengaruhi dinamika aliran permukaan dan bawah permukaan secara signifikan. Keterbatasan-keterbatasan ini menunjukkan perlunya integrasi data resolusi lebih tinggi, survei geologi langsung, dan pemodelan hidrologi dinamis pada penelitian lanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa potensi akumulasi air pada wilayah tambang batugamping di Desa Topogaro dipengaruhi oleh kombinasi faktor geomorfologi, hidrologi permukaan, dan karakter litologi karbonat. Analisis slope, watershed, TPI, dan interpretasi spektral ASTER memperlihatkan bahwa zona berisiko tinggi berada pada lembah dan dataran rendah yang menerima akumulasi aliran terbesar dari sub-watershed W3 dan W4 serta ditandai oleh litologi karbonat berpermeabilitas tinggi. Integrasi seluruh parameter memberikan gambaran yang jelas mengenai distribusi spasial area rawan genangan dan menghasilkan zonasi risiko yang dapat menjadi dasar bagi desain sistem mine dewatering. Keseluruhan temuan ini menegaskan pentingnya pendekatan geospasial dalam pemetaan risiko hidrologi tambang di lingkungan karbonat tropis.

Hasil penelitian memberikan implikasi signifikan bagi pengelolaan tambang batugamping terutama dalam perancangan sistem mine dewatering yang lebih efektif dan adaptif terhadap kondisi geomorfologi lokal. Zonasi risiko yang dihasilkan dapat digunakan untuk menentukan lokasi sumuran, jalur drainase, serta strategi mitigasi limpasan permukaan sehingga operasional tambang menjadi lebih aman dan efisien. Selain itu, pendekatan integratif antara analisis topografi dan interpretasi spektral menawarkan metode yang dapat direplikasi pada wilayah pertambangan karbonat lainnya. Implikasi ini juga mendukung pengembangan kebijakan perencanaan ruang berbasis risiko hidrologi dan memberikan landasan bagi kolaborasi antara geolog, ahli hidrologi, dan manajemen tambang dalam perumusan strategi pengendalian air.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan terutama terkait resolusi data DEM 15–30 meter yang masih menyisakan potensi bias pada skala mikro-topografi yang dapat mempengaruhi aliran lokal. Interpretasi litologi berbasis ASTER juga memerlukan verifikasi lapangan untuk memastikan akurasi peta spektral terutama pada zona alterasi yang kompleks. Selain itu, dinamika musiman seperti variasi curah hujan belum dimodelkan sehingga belum menggambarkan kondisi hidrologi tahunan secara penuh. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan DEM resolusi tinggi, pengujian petrografi dan survei geologi lapangan, serta pemodelan hidrologi dinamis berbasis skenario untuk meningkatkan akurasi prediksi dan ketepatan rekomendasi teknis dewatering.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrams, M., & Yamaguchi, Y. (2019). Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration. *Remote Sensing*, 11(11), 1394. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/11/1394>

- Adiri, Z., Harti, A. E., Jellouli, A., Maacha, L., & Bachaoui, E. M. (2016). Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Terra ASTER multispectral data in the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(1), 016005. <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/journal-of-applied-remote-sensing/volume-10/issue-1/016005/Lithological-mapping-using-Landsat-8-OLI-and-Terra-ASTER-multispectral/10.1117/1.JRS.10.016005.short>
- Baharuddin, I. I., Rusli, H. A. R., Asshidiqqi, M. H., Anarta, R., & Tanjung, D. A. (2025). Design analysis of drainage system design on coal mining land. *Jurnal Natural*, 25(3). <https://jurnal.usk.ac.id/natural/article/view/45589>
- Barsi, D., & Slingerland, N. (2025, September). *Complete closure landforms: Geomorphic design with commingled tailings and waste rock*. In *Mine Closure 2025: Proceedings of the 18th International Conference on Mine Closure*. Australian Centre for Geomechanics. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/2515_78_Slingerland/
- Chen, M., Zhang, C., Canbulat, I., Saydam, S., Fan, G., & Zhang, D. (2024). Assessment of factors and mechanism contributing to groundwater depressurisation due to longwall mining. *International Journal of Coal Science & Technology*, 11(1), 58. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40789-024-00716-7>
- Chernos, M., MacDonald, R. J., Straker, J., Green, K., & Craig, J. R. (2022). Simulating the cumulative effects of potential open-pit mining and climate change on streamflow and water quality in a mountainous watershed. *Science of the Total Environment*, 806, 150394. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721054711>
- Du, W., Chen, L., He, Y., Wang, Q., Gao, P., & Li, Q. (2022). Spatial and temporal distribution of groundwater in open-pit coal mining: A case study from Baorixile Coal Mine, Hailaer Basin, China. *Geofluids*, 2022(1), 8753217. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2022/8753217>
- Eamus, D., Fu, B., Springer, A. E., & Stevens, L. E. (2016). Groundwater dependent ecosystems: Classification, identification techniques and threats. In *Integrated groundwater management: Concepts, approaches and challenges* (pp. 313–346). Springer International Publishing. <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/28049/1001945.pdf>
- Errami, M., Algouti, A., Algouti, A., Farah, A., & Agli, S. (2023). Utilization of ASTER data in lithological and lineament mapping of the southern flank of the Central High Atlas in Morocco. *Geologos*, 29. <https://sciendo.com/2/v2/download/article/10.14746/logos.2023.29.1.01.pdf>
- Fatima, K., Khan Khattak, M. U., Kausar, A. B., Toqeer, M., Haider, N., & Rehman, A. U. (2017). Minerals identification and mapping using ASTER satellite image. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4), 046006.

<https://www.spiedigitallibrary.org/journals/journal-of-applied-remote-sensing/volume-11/issue-4/046006/10.1117/1.JRS.11.046006.short>

Flatley, A. J. (2022). *Geomorphology of small arid zone streams in the Pilbara (Western Australia) and implications for design of mine river diversions*. <https://minerva-access.unimelb.edu.au/items/a9248b44-8c8c-426d-afa8-bca439fe9fc0>

Galperin, A. M., Moseikin, V. V., Kutepov, Y. I., & Derevyankin, V. V. (2017). Assessment of state of water-saturated mine waste for the justification of engineering structure designs at open pit mines. *Eurasian Mining*, 1, 6–9. https://rudmet.net/media/articles/Article_EM_01_17_pp.6-9_1.pdf

Gao, Y., Li, J., Yang, T., Meng, L., Deng, W., & Zhang, P. (2024). Formation of pit lake and slope stability following mine closure: A case study of Fushun West Open-pit Mine. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1), 2340612. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19475705.2024.2340612>

Ignacy, D. (2025). Refining zoning of artificially-drained mine subsidence areas: Relative elevation models and hydrological hazard frameworks as decision support tools for spatial planning and mitigation of flood-related geohazards and risks regardless of prevailing water regimes. *Resources Policy*, 103, 105572. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142072500114X>

Joann, M., & Allan, J. (2021). Geomorphic perspectives on mining landscapes, hazards, and sustainability. *Treatise on Geomorphology*, 9, 106–143. <https://www.researchgate.net/publication/355103261>

Khaleghi, M., Ranjbar, H., Abedini, A., & Calagari, A. A. (2020). Synergetic use of the Sentinel-2, ASTER, and Landsat-8 data for hydrothermal alteration and iron oxide minerals mapping in a mine scale. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 17(3). <https://pdfs.semanticscholar.org/fca9/162bfe2487e98df5c7ea4e6fa912098dfb4e.pdf>

Lian, H., Yi, H., Yang, Y., Wu, B., & Wang, R. (2021). Impact of coal mining on the moisture movement in a vadose zone in open-pit mine areas. *Sustainability*, 13(8), 4125. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/8/4125>

Luino, F., Bonetto, S., Bono, B., Comina, C., Little, W. W., Porfido, S., & Turconi, L. (2024). Marl mining activity and negative repercussions for two hillside villages in Northern Italy. *Geosciences*, 14(7), 181. <https://www.mdpi.com/2076-3263/14/7/181>

Machowski, R., Rzetala, M. A., Rzetala, M., & Solarski, M. (2016). Geomorphological and hydrological effects of subsidence and land use change in industrial and urban areas. *Land Degradation & Development*, 27(7), 1740–1752. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.2475>

Mahmutoğlu, Y., Karagüzel, R., Şans, G., & Topçuoğlu, M. E. (2019). Sinkholes induced by dewatering in an open pit mine: Case study from a coal basin in Eastern

- Turkey. In *2019 Rock Dynamics Summit* (pp. 597–603). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429327933-96>
- Modrovits, K., Csepregi, A., Kovácsné Székely, I., Hatvani, I. G., & Kovács, J. (2021). Comparison of various growth curve models in characterizing and predicting water table change after intensive mine dewatering is discontinued in an East Central European karstic area. *Water*, 13(8), 1047. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/8/1047>
- Mokhtar, H. A. M. (2023). Using geomatics techniques to reveal mineralization alteration zones in Southwestern Sinai: A study in mineral geomorphology. *Bulletin de la Société de Géographie d'Égypte*, 96(1), 95–152. https://bsge.journals.ekb.eg/article_329988.html
- Ngoie, S., Lunda, J. M., Mbuyu, A., & Kabulo, J. F. (2017). Application of synthetic observations to develop an artificial neural network for mine dewatering. *Methodology*, 4(12). <https://www.academia.edu/download/55495829/IRJET-V4I12175.pdf>
- Okeke, C. J., Ukaegbu, V. U., & Egesi, N. (2019). Remote sensing signature of geological structures inferred on Landsat imagery of Afikpo area, Southeastern Nigeria. *Journal of Geology and Mining Research*, 11(1), 1–13. <https://academicjournals.org/journal/JGMR/article-full-text/C249FDC59935>
- Pambudi, R. A., Falah, A. B. R., Naldi, A., Bahri, N. F., Kharti, I. S. V., Hariadi, M. A., & Luthfi, A. (2020). Satellite imagery detection of land destruction in Klapanunggal Karst Landscape induced by limestone surface mining. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 211, p. 04002). EDP Sciences. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/71/e3sconf_jessd2020_04002/e3sconf_jessd2020_04002.html
- Rajendran, S., Nasir, S., & Jabri, K. A. (2020). Mapping and accuracy assessment of siltation of recharge dams using remote sensing technique. *Scientific Reports*, 10(1), 10364. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-67137-9>
- Rezaei, A., Hassani, H., Moarefvand, P., & Golmohammadi, A. (2020). Lithological mapping in Sangan region in Northeast Iran using ASTER satellite data and image processing methods. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 4(1), 59–70. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/24749508.2019.1585657>
- Riyadi, F. A., & Cahyadi, T. A. (2025, April). Surface water and mine drainage system management for open pit gold mine in Central Java, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1486, No. 1, p. 012032). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1486/1/012032/meta>
- Rybnikova, L. S., Rybnikov, P. A., & Tarasova, I. V. (2017). Geoecological challenges of mined-out open pit area use in the Ural. *Journal of Mining Science*, 53(1), 181–190. <https://link.springer.com/article/10.1134/S1062739117012006>

- Sekandari, M., Masoumi, I., Pour, A. B., Muslim, A. M., Hossain, M. S., & Misra, A. (2022). ASTER and WorldView-3 satellite data for mapping lithology and alteration minerals associated with Pb–Zn mineralization. *Geocarto International*, 37(6), 1782–1812.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106049.2020.1790676>
- Tarolli, P., Sofia, G., & Cao, W. (2018). The geomorphology of the human age: The quantification of the socio-economic impact on geomorphology. *Geomorphology*, 34.
https://www.research.unipd.it/bitstream/11577/3423190/1/THE_QUANTIFICATION_OF_THE_SOCIO-ECONOMIC_IMPACT_ON_GEOMORPHOLOGY.pdf
- Testa, F. J., Villanueva, C., Cooke, D. R., & Zhang, L. (2018). Lithological and hydrothermal alteration mapping of epithermal, porphyry and tourmaline breccia districts in the Argentine Andes using ASTER imagery. *Remote Sensing*, 10(2), 203. <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/2/203>
- Wang, J., Li, L., Zhang, L., Li, Q., & Liu, K. (2024a). Restoration strategies in the Heidaigou open-pit mine dump based on water sources and plant water utilization. *Forests*, 15(6), 906. <https://www.mdpi.com/1999-4907/15/6/906>
- Wang, S., Gan, L., Zhang, Y., Gao, Z., Luo, Z., Zhou, H., & Huang, T. (2024b). Effects of different reclamation years and modes on soil moisture transport pathways and permeability characteristics in an open-pit mining area in Guangxi. *Water*, 16(9), 1307. <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/9/1307>
- Wang, Y., Qin, K., Zhang, Z., He, Q., & Cohen, J. (2024c). Mapping open-pit mining area in complex mining and mixed land cover zone using Landsat imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 129, 103782.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569843224001365>
- Wu, Z., Wang, X., Dai, Z., Ma, W., Yang, D., Yang, Y., & Yu, Q. (2024). Spatial distribution and its driving forces analysis of soil organic matter in semi-arid grassland open-pit mining areas. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 32(4), 331–338.
<https://aviation.vgtu.lt/index.php/JEELM/article/view/22622>
- Yuan, S., Han, G., Liu, D., Li, G., Zhang, A., & Li, W. (2025). Analyzing water recharge mechanisms and predicting water inflow in deep mining based on hydrogeological structures: A case study. *Scientific Reports*, 15(1), 44764. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-28821-w>
- Zamroni, A., Trisnaning, P. T., Prasetya, H. N. E., Sagala, S. T., & Putra, A. S. (2022). Geochemical characteristics and evaluation of the groundwater and surface water in limestone mining area around Gunungkidul Regency, Indonesia. *The Iraqi Geological Journal*, 189–198. <https://www.igi-iraq.org/igi/index.php/igj/article/view/752>

- Zhang, H., Zhang, B., Xu, N., Shi, L., Wang, H., Lin, W., & Ye, Y. (2019). Water inrush characteristics and hazard effects during the transition from open-pit to underground mining: A case study. *Royal Society Open Science*, 6(3), 181402. <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsos.181402>
- Zhang, P., Gao, Y., Liu, Y., & Yang, T. (2025). Evaluation of slope stability and landslide prevention in a closed open-pit mine used for water storage. *Applied Sciences*, 15(15), 8659. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/15/8659>
- Zhe, Y., Hou, K., Liang, W., & Sun, H. (2023). Research on sustainable mining and water prevention in large open-pit water deposits. *Sustainability*, 15(13), 10238. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10238>