

Analisis Limpasan Permukaan di Kawasan Timur Gunung Sadeng, Kecamatan Puger, Kabupaten Jember Tahun 2015 - 2024

Adelisa Rizki Zaharani*, dan Ferryati Masitoh

Departemen Geografi, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia; e-mail: adelisa.rizki.2107226@students.um.ac.id

ABSTRAK

Kawasan timur Gunung Sadeng di Kecamatan Puger, Kabupaten Jember merupakan kawasan pertambangan yang mengalami intensifikasi dalam satu dekade terakhir. Aktivitas tersebut berdampak pada perubahan tutupan lahan yang memengaruhi limpasan permukaan. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung perubahan intensitas hujan, perubahan koefisien limpasan, dan perubahan debit limpasan tiap mikroDAS di kawasan tersebut dari tahun 2015-2024. Pendekatan yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif dengan metode rasional pada 4 mikroDAS. Data sekunder berupa curah hujan (2005-2024), kemiringan lereng, dan citra penggunaan lahan. Debit limpasan permukaan dianalisis dengan menggunakan beberapa periode ulang hujan, yaitu 1,2, 5, dan 20 tahun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi penurunan intensitas curah hujan kala ulang dua tahunan dari 22,33 mm/jam pada periode 2005-2014 menjadi 20,95 mm/jam pada periode 2015-2024. Selain itu, upaya reklamasi tambang yang meliputi revegetasi dan penataan lahan turut berkontribusi terhadap penurunan nilai koefisien limpasan di sebagian besar mikroDAS. Wilayah MD 2 yang sebelumnya memiliki kontribusi tertinggi terhadap limpasan mengalami penurunan signifikan akibat bertambahnya luasan area bervegetasi dan lahan landai. Dugaan total limpasan permukaan menurun dari 5,56 m³/detik pada tahun 2015 menjadi 5,18 m³/detik pada tahun 2024 atau sebesar 6,76%. Penurunan ini menunjukkan bahwa perubahan intensitas hujan yang lebih rendah serta perbaikan tutupan lahan pasca-pertambangan dapat secara efektif mengurangi risiko limpasan permukaan. Hasil studi relevan digunakan sebagai dasar dalam perencanaan sistem drainase tambang dan strategi pengelolaan lingkungan yang adaptif dan berkelanjutan di kawasan karst.

Kata kunci: Limpasan Permukaan, Pertambangan, Batu Kapur, Gunung Sadeng, Metode Rasional

ABSTRACT

The eastern area of Mount Sadeng in Puger District, Jember Regency is a mining area that has intensified in the last decade. These activities have an impact on land cover changes that affect surface runoff. This study aims to calculate changes in rainfall intensity, changes in runoff coefficients, and changes in runoff discharge of each microDAS in the region from 2015-2024. The approach used is descriptive quantitative by rational methods in 4 microDAS. Secondary data are rainfall (2005-2024), slope, and land use image. Surface runoff discharge is analyzed using several precipitations repeat periods of 1,2, 5, and 20 years. Research results showed that there was a decrease in rainfall intensity of two-year recalculation from 22,33 mm/h in the period 2005-2014 to 20,95 mm/h in the period 2015-2024. In addition, mine reclamation efforts, which include revegetation and land arrangement, also contributed to the decline in runoff coefficients in most of the watershed microDAS. The MD2 area that previously had the highest contribution to runoff experienced significant decrease due to the increasing area of vegetation and rampage land. The total surface runoff is expected to decrease from 5,56 m³/s in 2015 to 5,18 m³/s in 2024 or 6,76%. This indicates that lower rainfall intensity changes and post-mining land cover improvements can effectively reduce the risk of surface runoff. Relevant study results were used as a basis for planning mine drainage systems and adaptive and sustainable environmental management strategies in karst areas.

Keywords: Surface Runoff, Mining, Limestone, Mount Sadeng, Rational Method

Citation: Zaharani, A. R. dan Masitoh, F. (2026). Analisis Limpasan Permukaan di Kawasan Timur Gunung Sadeng, Kecamatan Puger, Kabupaten Jember Tahun 2015 - 2024. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(3), 614-630, doi:10.14710/jil.24.3.614-630

1. PENDAHULUAN

Batuan kapur merupakan bahan baku pembuatan semen yang sangat penting bagi industri infrastruktur, sehingga kebutuhan akan kapur

semakin meningkat seiring dengan pesatnya pembangunan (Lestari *et al.*, 2024). Gunung Sadeng terletak di Kecamatan Puger, Kabupaten Jember, merupakan salah satu lokasi yang memiliki banyak

cadangan batu kapur (Rawa, 2019). Menurut penelitian Esa (2013) banyaknya cadangan ini dikarenakan Kecamatan Puger secara geografis dikelilingi oleh pegunungan kapur bagian selatan. Pemberian Izin Usaha Pertambangan (IUP) di wilayah ini berdasarkan PP No.96 Tahun 2021 tentang pelaksanaan kegiatan usaha pertambangan mineral dan batu bara dilakukan dengan menyampaikan permohonan wilayah kepada Menteri, Gubernur atau Bupati/Wali kota sesuai kewenangannya. Perluasan area tambang di Kecamatan Puger dari 55 Ha menjadi 126 Ha disetujui berdasarkan Nomor Surat PB.01/1612-200/VII/2024 tanggal 22 Juli 2024 yang diterbitkan oleh Direktur Jenderal Tata Ruang, Kementerian Agraria dan Tata Ruang/Badan Pertanahan Nasional (ATR/BPN).

Pertambangan di Gunung Sadeng cenderung lebih intensif pada kawasan timur dibandingkan dengan kawasan Gunung Sadeng lainnya. Perluasan lahan pertambangan di kawasan timur Gunung Sadeng dapat terlihat pada Gambar 1a. yang menunjukkan kondisi di tahun 2015 dan Gambar 1b. yang menunjukkan kondisi di tahun 2024. Berdasarkan penelitian Rahmania et al. (2019), aktivitas pertambangan intensif di Gunung Sadeng menyebabkan kerusakan signifikan pada lahan karst. Indikator kerusakan meliputi peningkatan luas singkapan batuan, penurunan ketebalan tanah, dan berkurangnya kerapatan vegetasi. Lereng atas dan tengah Gunung Sadeng memiliki potensi kerusakan tinggi, yang meningkatkan risiko erosi dan limpasan permukaan. Selain itu, berdasarkan penelitian (Rahmasari, 2013a), aktivitas pertambangan di lahan karst Gunung Sadeng berdampak pada perubahan struktur tanah dan hilangnya zona *vadose*. Zona *vadose* adalah lapisan tanah di bawah permukaan bumi yang terletak di antara permukaan tanah dan muka air tanah. Ketika zona ini rusak akibat pertambangan, air hujan tidak terserap ke dalam tanah dan melimpas di permukaan. Perubahan struktur tanah juga menyebabkan potensi bencana banjir saat musim hujan kekeringan saat musim kemarau.

Batu kapur merupakan salah satu mineral industri yang dapat diekstraksi dari endapan dengan menggunakan sistem *quarry*. *Quarry* merupakan

metode penambangan terbuka yang digunakan untuk mengekstraksi endapan-endapan bahan galian industri atau mineral industri (Alhabsyi et al., 2024). Pada penerapan sistem pertambangan terbuka, operasi penambangan langsung terpapar dengan udara luar dan kondisi iklim, salah satunya adalah curah hujan (Khalik et al., 2021; F. A. R. Putri, 2020; Y. E. Putri, 2014). Curah hujan merupakan salah satu faktor cuaca yang memengaruhi semua operasi penambangan, dikarenakan sistem penambangan terbuka memungkinkan air masuk ke dalam area penambangan selama musim hujan. Berdasarkan penelitian Lusia et al. (2023) yang dilakukan di penambangan batu kapur PT. Semen Baturaja (Persero) Sumatera Selatan, selama musim hujan, curah hujan yang tinggi akan mengakibatkan banjir dan genangan air di dasar pit. Batu kapur memiliki sifat mudah larut oleh air hujan, membentuk rongga, rekahan, dan saluran bawah tanah, sehingga air cepat meresap tanpa menghasilkan limpasan permukaan yang signifikan (Utomo et al., 2012). Lapisan tanah yang tipis dan vegetasi terbatas mempercepat infiltrasi dan mengurangi kapasitas retensi air (Zhang et al., 2022). Aliran air di daerah karst pun dominan terjadi di bawah tanah melalui sistem gua dan lorong (Reszler et al., 2018). Saat intensitas hujan tinggi, kapasitas infiltrasi dapat terlampaui, menyebabkan limpasan permukaan dan potensi banjir lokal (Wang et al., 2022). Sebaliknya, pada musim kemarau, kawasan ini sangat rentan kekeringan karena ketiadaan cadangan air permukaan yang memadai (Sutarno, 2012).

Limpasan terjadi ketika suatu daerah mengalami curah hujan yang lebih tinggi daripada yang dapat diserap. Ada dua kategori faktor yang memengaruhi limpasan permukaan, yaitu faktor meteorologi dan karakteristik fisik daerah tangkapan air. Faktor karakteristik fisik meliputi penggunaan lahan, jenis tanah, dan topografi daerah tangkapan air, sedangkan faktor meteorologi meliputi jenis, intensitas, durasi, dan distribusi curah hujan (Sosrodarsono & Takeda, 1980). Berdasarkan Buku *Kecamatan Puger dalam Angka 2024*, rata-rata curah hujan tertinggi di stasiun pengamatan Grenden pada tahun 2024 terjadi di bulan April sebesar 18,10 mm/hari.



a. 2015



b. 2024

Gambar 1. Kawasan Gunung Sadeng
Sumber: Google Earth



a. Sebelum Tambang



b. Setelah Tambang

Gambar 2. Kondisi Kawasan Timur Gunung Sadeng Sebelum dan Sesudah Penambangan
Sumber: Laporan Evaluasi Tambang (2023)

Penggunaan lahan sebagai faktor karakteristik fisik limpasan permukaan memiliki dampak yang signifikan terhadap jumlah hujan yang jatuh ke tanah. Hujan pada akhirnya akan meresap ke dalam air tanah atau dimanfaatkan oleh tanaman di padang rumput dan hutan (Lestari, 2016). Gambar 2 menunjukkan bahwa kegiatan penambangan menghilangkan vegetasi penutup lahan, yang berperan penting dalam proses resapan air. Tanpa vegetasi, laju infiltrasi menurun drastis karena kurangnya perlindungan terhadap tanah dari erosi dan penguapan. Selain itu, struktur geologi yang khas pada lahan batu gamping, seperti *fissure* (celah) dan *diffuse flow* (aliran difus), sangat berperan dalam proses aliran air ke dalam tanah (Endah dkk., 2017). Menurut penelitian Pamuji (2014), pertambangan dapat berdampak pada zona infiltrasi, rekahan-rekahan akan hilang sehingga juga menyebabkan nilai infiltrasi rendah dan akan berdampak pada tingginya limpasan permukaan pada area ini. Limpasan permukaan di lantai bukaan tambang (*pit bottom*) merupakan masalah yang memiliki dampak signifikan terhadap produktivitas operasi penambangan dan menurunkan stabilitas lereng karena dapat melemahkan batuan. Produksi pertambangan akan terpengaruh oleh limpasan permukaan di jalur transportasi yang mengurangi efisiensi kerja alat angkut (Afrizal *et al.*, 2022).

Berdasarkan penelitian Y. E. Putri (2014), koefisien limpasan, intensitas hujan, dan *catchment area* memengaruhi debit air hujan yang masuk ke area tambang dan air limpasan (F. A. R. Putri, 2020). Analisis *catchment area* menggunakan mikroDAS membantu mengidentifikasi zona kontributor limpasan secara lebih akurat, sehingga sistem drainase dapat dirancang sesuai kondisi hidrologis. Berdasarkan Perdirjen RLPS No. P.15/V-Set/2009, mikroDAS atau mikro daerah aliran sungai adalah satuan wilayah hidrologi terkecil yang merupakan bagian dari suatu sub-DAS. MikroDAS memiliki batas-batas alami berupa punggung bukit dan menyalurkan air ke satu titik pengaliran, seperti anak sungai atau saluran tertentu dalam suatu sub-DAS.

MikroDAS merupakan bagian kecil DAS yang digunakan sebagai unit perencanaan teknis dalam kegiatan rehabilitasi lahan dan konservasi tanah dan air. Pendekatan ini penting di kawasan tambang kapur yang rawan terganggu sistem perkolasinya akibat aktivitas tambang. Menurut Y. E. Putri (2014), sistem drainase diperlukan agar air tidak mengganggu operasi tambang, sehingga penting bagi perusahaan mengetahui limpasan permukaan di mikroDAS. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung perubahan intensitas hujan, perubahan koefisien limpasan, dan perubahan debit limpasan tiap mikroDAS di kawasan timur Gunung Sadeng, Kecamatan Puger, Kabupaten Jember pada tahun 2015–2024. Berdasarkan publikasi literatur, penelitian mengenai limpasan permukaan di Gunung Sadeng belum pernah dilakukan. Penelitian sebelumnya di Gunung Sadeng berkaitan dengan hukum lingkungan (Arini, 2021), potensi kerusakan lahan karst (Rahmasari (2013); Gofur & Wesnawa (2018)), pemetaan Kualitas Air Irigasi (Ayuningrum *et al.*, 2023), dan sosial ekonomi penduduk (Satriyani, 2014). Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, maka terdapat *practical-gap* dengan penelitian saat ini. Dengan demikian, maka penelitian mengenai limpasan permukaan akibat pertambangan akan memberikan keterbaruan informasi mengenai kondisi lingkungan di Gunung Sadeng terutama yang berkaitan dengan limpasan permukaan akibat pertambangannya.

2. METODE PENELITIAN

Gambar 3 menunjukkan Peta lokasi penelitian yang dilakukan di kawasan timur Gunung Sadeng yang berada di Kecamatan Puger, Kabupaten Jember. Secara astronomis Gunung Sadeng di $113^{\circ} 28' - 113^{\circ} 29' \text{ LS}$ dan $8^{\circ} 20' - 8^{\circ} 21' \text{ BT}$. Gunung Sadeng secara administratif berada di tiga desa, yaitu Grenden, Puger Kulon, dan Puger Wetan. Gambar 3. Lokasi penelitian dibagi menjadi 4 mikroDAS dengan total luasan 158,8 Ha. MikroDAS (MD) 1 memiliki luas 31,64 Ha, MD 2 memiliki luas sebesar 59,25 Ha, MD 3 memiliki luas sebesar 26,7 Ha, dan MD 4 memiliki luas

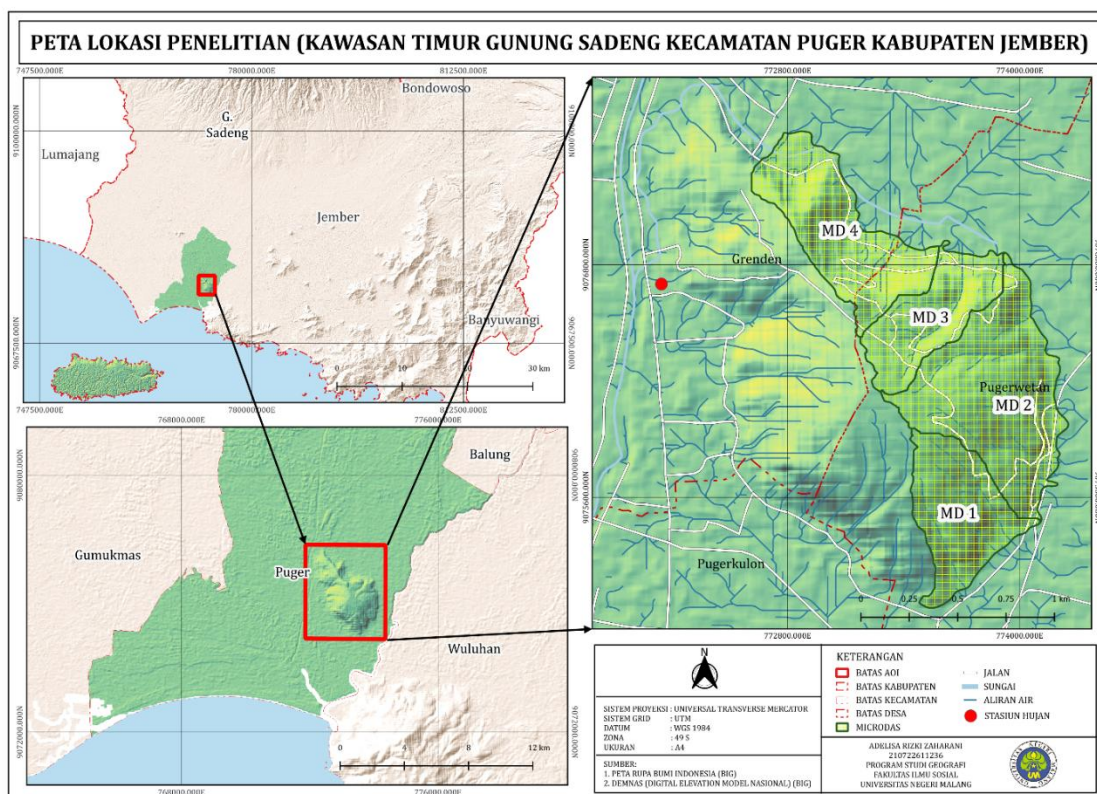
41,26 Ha. MikroDAS ini di buat berdasarkan arah aliran air menggunakan *software Global Mapper*. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif.

Metode pendugaan besar limpasan permukaan yang digunakan adalah metode rasional. Menurut Triatmodjo (2008), metode ini banyak digunakan pada daerah tangkapan kecil (<200 ha). Penggunaan metode rasional dalam pendugaan limpasan permukaan telah banyak dibuktikan keandalannya melalui berbagai penelitian. Berdasarkan penelitian Farida & Aryuni (2020), metode ini memungkinkan integrasi langsung antara parameter koefisien limpasan yang diperoleh dari penutup lahan aktual dengan data intensitas hujan, sehingga memberikan estimasi debit limpasan yang sesuai dengan kondisi eksisting wilayah terbangun. Penelitian lainnya oleh Febriani & Ahyuni (2023) juga menunjukkan bahwa metode rasional mampu mengakomodasi perubahan penggunaan lahan secara temporal untuk menganalisis kenaikan debit banjir, sehingga sesuai untuk studi jangka panjang. Penelitian di Sub-DAS Ciliwung Hulu menunjukkan bahwa metode rasional memiliki nilai koefisien determinasi tinggi dan efisiensi model yang baik, menandakan kesesuaiannya untuk analisis limpasan (Wahjunie *et al.*, 2023). Hasil pengolahan data dan perhitungan limpasan permukaan dilakukan analisis secara

deskriptif mengenai besar limpasan permukaan di mikroDAS kawasan timur Gunung Sadeng tahun 2015-2024. Rincian proses penelitian dapat dilihat dalam diagram alir pada Gambar 4.

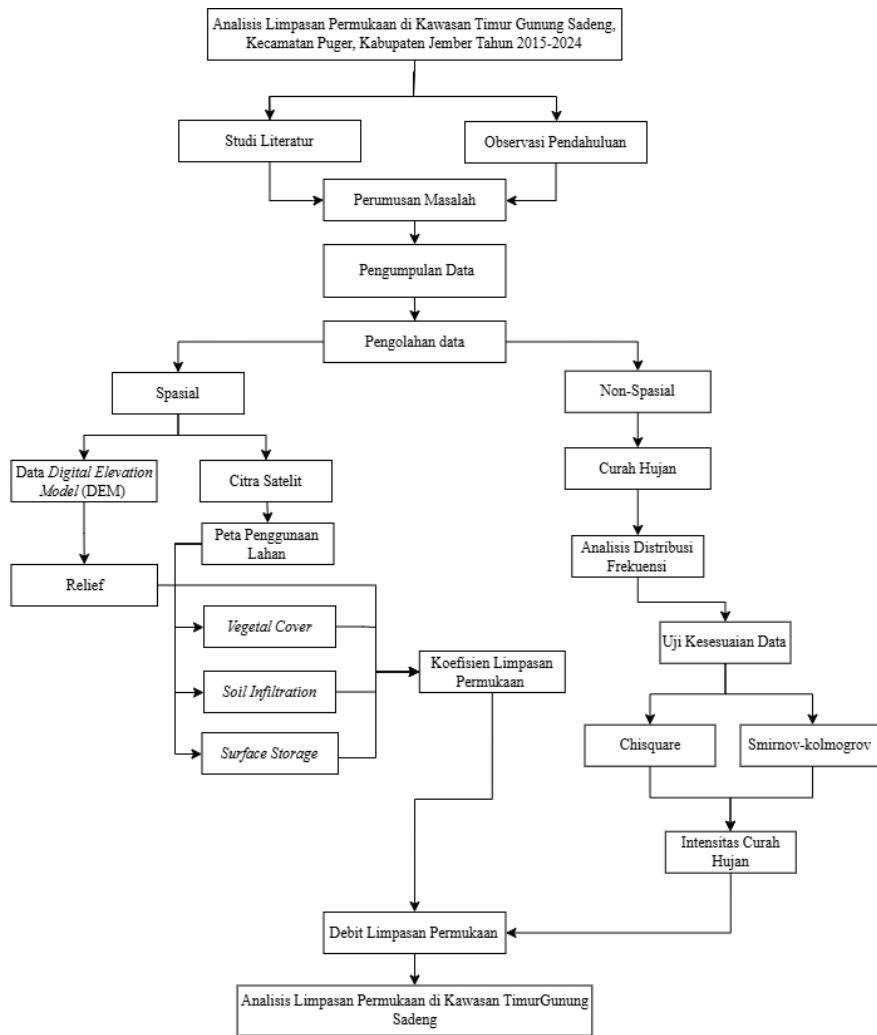
2.1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder yang terdiri dari data DEM, Citra udara, dan data curah hujan. Data ini diperoleh dari beberapa instansi pemerintah dan non-pemerintah yang menyediakan data geospasial. Data DEM (2011 dan 2024) digunakan sebagai data dasar parameter kemiringan lereng yang diperoleh dari DEMNAS (*Digital Elevation Model Nasional*) dan laporan evaluasi tambang. Proses *resampling* dilakukan pada data DEM dan data topografi laporan evaluasi tambang, untuk mendapatkan data yang konsisten. Resolusi yang digunakan mengikuti resolusi citra udara LANDSAT 8 yang memiliki resolusi spasial lebih rendah dibandingkan data topografi laporan tambang. Data Citra udara (2014 dan 2024) menggunakan Citra LANDSAT 8 Level 2, Collection 2, Tier 1, dengan metode *random forest*. Data Curah hujan (2005-2024) digunakan sebagai data dasar parameter intensitas curah hujan yang diperoleh dari Dinas PUSDA (Pekerjaan Umum Sumber Daya Air). Matrik pengumpulan data ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 3. Peta Lokasi Penelitian

Sumber: Penulis, 2025



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian
Sumber: Penulis, 2025

Tabel 1. Matrik Pengumpulan Data

Parameter	Data	Sumber Data
Kemiringan lereng	DEM (<i>Digital Elevation Model</i>) (2011 dan 2024)	1. DEMNAS dengan resolusi 7,5 x 7,5 m https://tanahair.indonesia.go.id/ 2. Laporan Evaluasi Tambang dengan resolusi 1 x 1m
Penggunaan lahan	Citra Udara (2015 dan 2024)	1. LANDSAT 8 Level 2, <i>Collection 2, Tier 1</i> dengan resolusi 30 x 30 m
Intensitas Curah Hujan	Curah Hujan (2005-2024)	1. Dinas PUSDA Jawa Timur, https://hidrologi.dpuair.jatimprov.go.id/

Sumber: Penulis, 2025

2.2. Pengolahan Data

Data yang diperoleh dari lapangan dan studi literatur diolah berdasarkan jenis data. Pengolahan data dilakukan menggunakan teknik Sistem Informasi Geografis dan teknik kuantitatif. Perangkat lunak yang digunakan untuk pengolahan data non-spasial menggunakan software *Microsoft Excel* sedangkan untuk mengolah data spasial adalah QGIS versi 3.36.2 (*Quantum Geographic Information System*). Pengolahan data dilakukan berdasarkan skala kerja 1:20.000 dengan resolusi 30 m. Tabel 2. menyajikan matrik teknik pengumpulan data yang dilakukan dalam penelitian ini. Pengolahan data curah hujan dilakukan per 10 tahun dari data curah hujan 20 tahun (2005-2014 dan 2015-2024) berdasarkan data hujan maksimum harian pertahun di Stasiun Grenden. Data

tahun 2005-2014 digunakan untuk mewakili periode sebelum ada pertambangan, sedangkan data tahun 2015-2024 mewakili setelah ada kegiatan pertambangan di Gunung Sadeng. Proses Pengolahan melalui tiga tahapan, yaitu analisis distribusi frekuensi dengan distribusi normal, distribusi log normal dua parameter, distribusi Gumbel tipe I, dan distribusi log-Pearson III. Analisis kesesuaian data dilakukan dengan uji Chi-Square dan Smirnov-Kolmogrov. Pendugaan intensitas curah hujan dengan metode Mononobe. Data dari proses pengolahan metode rasional menghasilkan data besar limpasan permukaan. Hasil pengolahan dilakukan analisis secara deskriptif mengenai limpasan permukaan kawasan timur Gunung Sadeng tahun 2015-2024.

Tabel 2. Matrik Teknik Pengolahan Data

Data	Jenis Data	Proses Pengolahan
Curah Hujan	Intensitas Curah hujan (mm/jam)	Proses pengolahan data ini menggunakan perangkat lunak <i>Microsoft Excel</i> . Hasil pengolahan data yaitu Data Intensitas Curah hujan
Citra Satelit	Penggunaan Lahan	Pengolahan data menggunakan teknik SIG menggunakan <i>Google Earth Engine (GEE)</i> dan QGIS. Hasil yang didapatkan adalah Peta Penggunaan Lahan
DEM	Kemiringan Lereng (%)	Pengolahan data menggunakan teknik SIG melalui perangkat lunak QGIS. Hasil yang didapatkan adalah Peta Kemiringan Lereng Kawasan Timur Gunung Sadeng Tahun 2015-2024
Relief, tutupan vegetasi, kecepatan infiltrasi, <i>surface storage</i> , Luas Area	Total koefisien Limpasan Permukaan	Proses pengolahan data menggunakan perangkat lunak <i>Microsoft Excel</i> . Hasil yang didapatkan adalah Nilai Total Koefisien Limpasan Permukaan
Koefisien limpasan, Intensitas curah hujan, luas <i>catchment area</i>	Limpasan Permukaan (m ³ /detik)	Pengolahan data koefisien limpasan, intensitas curah hujan, dan luas area menggunakan metode rasional melalui perangkat <i>Microsoft Excel</i> . Hasil pengolahan data yaitu Data Limpasan Permukaan

Sumber: Penulis, 2025

2.3. Limpasan Permukaan Metode Rasional

Limpasan permukaan merupakan debit maksimum tahunan yang terjadi dengan kemungkinan kejadian tertentu atau berdasarkan periode ulang tertentu. Salah satu metode yang umum digunakan untuk memperkirakan laju aliran puncak (debit banjir atau debit rencana) adalah metode rasional. Menurut Triatmodjo (2008), metode ini banyak digunakan pada daerah tangkapan kecil (<200 ha). Metode rasional berasumsi bahwa curah hujan terjadi setidaknya selama waktu konsentrasi (*time of concentration/tc*) dan tersebar secara merata di seluruh area wilayah drainase (Kementerian PUPR, 2018). Metode rasional digunakan untuk memperkirakan laju puncak limpasan pada suatu lokasi, dengan mempertimbangkan koefisien limpasan serta intensitas curah hujan rata-rata yang sesuai dengan durasi waktu konsentrasi. (Texas Departement of Transportation: Hydraulic Design manual, 2019). Rumus matematis metode rasional adalah (Kamaina, 2011):

$$Q = 0.278 \times C \times I \times A \dots\dots\dots(2.1)$$

Pada persamaan (2.1), Q adalah laju aliran permukaan (m³/detik), C merupakan nilai koefisien pengaliran, I adalah nilai intensitas curah hujan selama waktu konsentrasi (mm/jam), dan A merupakan luas daerah aliran (km²).

Pada penelitian ini, penentuan debit limpasan permukaan berdasarkan nilai pixel (*pixel-based*) secara spasial. Penelitian sebelumnya (Tahir Lopa & Karamma, 2026) dan (Muttaqin *et al.*, 2021) menyebutkan bahwa untuk analisis limpasan permukaan akibat perubahan penggunaan lahan dapat menggunakan metode rasional secara *pixel based*. Akan tetapi memiliki kelemahan dalam penentuan waktu konsentrasi

2.4. Koefisien Limpasan Permukaan

Koefisien limpasan permukaan atau disingkat C, adalah angka yang mewakili proporsi air limpasan terhadap curah hujan. Semakin banyak curah hujan yang berubah menjadi limpasan permukaan

ditunjukkan dengan nilai C yang tinggi (Bunga, 2023). Penelitian limpasan permukaan yang hanya menggunakan parameter penggunaan lahan untuk menentukan koefisien limpasan, seperti dalam studi di Sub-DAS Kali Premulung dan kawasan Universitas Muhammadiyah Sorong, menghasilkan pendekatan yang lebih sederhana namun kurang akurat karena tidak mempertimbangkan faktor topografi dan sifat fisik tanah, sehingga berpotensi menimbulkan deviasi antara hasil estimasi dan kondisi aktual (Farida & Aryuni, 2020; Rofi, 2018). Sebaliknya, penelitian di DAS Bondoyudo menambahkan parameter kemiringan lereng, jenis tanah, dan tutupan lahan untuk menghitung koefisien limpasan ($C = C_t + C_s + C_v$), yang menghasilkan variasi nilai C yang lebih representatif serta estimasi debit limpasan yang lebih dekat dengan data lapangan, sehingga meningkatkan akurasi dan keandalan hasil analisis limpasan permukaan (Aminata & Kurniawan Akbar, 2019). Tabel 3. dikembangkan untuk diterapkan pada daerah aliran sungai (DAS) di wilayah pedesaan, namun juga dapat digunakan sebagai metode verifikasi terhadap koefisien limpasan campuran yang diperoleh melalui pendekatan lain dengan mempertimbangkan karakteristik lahan dalam menghitung kondisi DAS yang telah mengalami perubahan lahan (Texas Departement of Transportation: Hydraulic Design manual, 2019).

Tabel 3. memberikan alternatif yang sistematis dalam pengembangan koefisien limpasan. Hal ini karena tabel 3 merupakan koefisien per karakteristik DAS. Koefisien relief (Cr) dan koefisien reservoir permukaan (Cs) berdasarkan data DEM, sedangkan infiltrasi tanah (Ci) dan vegetasi penutup (Cv) berdasarkan penggunaan lahannya. Analisis koefisien limpasan dilakukan melalui SIG sehingga nilai yang didapatkan adalah nilai per pixel.

Pada wilayah dengan penggunaan lahan yang beragam, perlu digunakan koefisien limpasan komposit. Penghitungan dapat dilakukan menggunakan persamaan 2.2, empat komponen yang ditetapkan ditambahkan untuk membentuk koefisien limpasan keseluruhan untuk area tertentu. Koefisien limpasan komposit diberi bobot berdasarkan luas

masing-masing penggunaan lahan dan dapat dihitung dengan persamaan berikut (Syarifuddin, 2017):

$$C_c = \frac{\sum_{n=1}^n A_n \cdot C_n}{A_{total}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Pada persamaan (2.2), C_c adalah koefisien limpasan rata-rata tertimbang, A_n merupakan luas lahan pada tata guna lahan (km^2), A_{total} adalah luas lahan total (km^2), dan C_n merupakan nilai koefisien limpasan pada tata guna lahan.

2.5. Intensitas Curah Hujan

Intensitas hujan merupakan jumlah curah hujan yang terjadi dalam satuan waktu tertentu, umumnya dinyatakan dalam mm/jam. Data intensitas hujan diperoleh melalui analisis hasil pencatatan curah hujan (Hardisusanto, 2010). Hubungan antara intensitas, durasi hujan, dan periode ulang digambarkan dalam kurva IDF (*Intensity Duration Frequency Curve*). Untuk membentuk kurva IDF berdasarkan pengukuran, dibutuhkan data hujan jangka pendek, seperti data hujan selama 5 menit, 10 menit, 30 menit, hingga 60 menit. Apabila hanya tersedia data curah hujan harian, perhitungan intensitas hujan dapat dilakukan menggunakan rumus Mononobe, yang memungkinkan estimasi intensitas tanpa data hujan jam-jaman (Kamaina, 2011; Suripin, 2003). Persamaan Mononobe untuk menentukan intensitas hujan dilakukan dengan persamaan berikut (Armid *et al.*, 2022):

$$I = \frac{R24}{24} \times \left[\frac{24}{T} \right]^{2/3} \dots\dots\dots (2.3)$$

Pada persamaan (2.3), I adalah intensitas hujan (mm/jam), $R24$ merupakan hujan harian (mm), dan T adalah lamanya waktu konsentrasi (jam).

2.6. Analisis Distribusi Frekuensi

Analisis distribusi frekuensi merupakan pendekatan statistik inferensial yang digunakan untuk memperkirakan probabilitas curah hujan rencana berdasarkan periode ulang tertentu (Hardisusanto, 2010; Kamaina, 2011; Tarru *et al.*, 2024). Dalam penelitian ini digunakan empat metode distribusi frekuensi curah hujan, yaitu distribusi normal, distribusi log normal dua parameter, distribusi Gumbel tipe I, dan distribusi log-Pearson III. Distribusi normal, yang juga dikenal sebagai sebaran Gauss, memiliki fungsi kerapatan peluang (*probability density function*) sebagai berikut (Hardisusanto, 2010):

$$P(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Pada persamaan (2.4), $P(X)$ adalah fungsi kerapatan peluang normal, π bernilai 3,14, e adalah 2,71828, μ merupakan nilai X rata-rata, dan σ adalah standar deviasi nilai X .

Distribusi Gumbel Tipe I sering digunakan dalam analisis curah hujan harian maksimum untuk memperkirakan kejadian ekstrem, seperti frekuensi banjir (Hardisusanto, 2010; Soewarno, 1995). Distribusi ini memiliki fungsi distribusi berupa eksponensial ganda, yang dinyatakan dalam persamaan berikut (Soewarno, 1995):

$$P(X) = e^{(-e)^{-Y}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Tabel 3. Koefisien Limpasan Permukaan

Karakteristik DAS	Ekstrem	Tinggi	Normal	Rendah
Relief - Cr	0.28 – 0.35 Terjal kasar, lereng rata-rata di atas 30%	0.20 – 0.28 Perbukitan, rata-rata kemiringan lereng antara 10 – 30%	0.14 – 0.20 Bergelombang, lereng rata-rata antara 5 – 10%	0.08 – 0.14 Lahan relatif datar antara 0 – 5%
Infiltrasi Tanah - Ci	0.12 – 0.16 Tanpa penutup tanah efektif; berupa batu atau lapisan tanah tipis yang kapasitas infiltrasinya rendah	0.08 – 0.12 Lambat untuk menyerap air, tanah liat atau tanah lempung yang dangkal dengan kapasitas infiltrasi rendah atau drainase buruk	0.06 – 0.08 Normal; tanah bertekstur ringan atau sedang berdrainase baik, lempung berpasir	0.04 – 0.06 Pasir yang dalam atau tanah yang mudah menyerap air; sangat ringan, tanah berdrainase baik
Vegetasi Penutup - Cv	0.12 – 0.16 Tidak ada tanaman penutup efektif, terbuka atau penutup sangat jarang	0.08 – 0.12 Buruk hingga sedang; bebas budidaya, tanaman pertanian atau penutup alami buruk, kurang dari 20% daerah tangkapan yang memiliki penutup yang baik	0.06 – 0.08 Sedang hingga baik, sekitar 50% dari area berupa padang rumput atau hutan, tidak lebih dari 50% area digunakan untuk budidaya pertanian	0.04 – 0.06 Baik hingga sangat baik; sekitar 90% dari daerah tangkapan air berupa padang rumput dan hutan yang baik, atau penutup lahan sejenisnya.
Reservoir Permukaan - Cs	0.10 – 0.12 Dapat diabaikan; cekungan permukaan sedikit dan dangkal, saluran drainase terjal dan kecil	0.08 – 0.10 Saluran drainase kecil terdefinisi dengan baik, tanpa kolam atau rawa	0.06 – 0.08 Normal; cekungan permukaan cukup besar, seperti danau tampungan, kolam, dan rawa	0.04 – 0.06 Banyak tampungan di permukaan, sistem drainase tidak terdefinisi secara jelas; tampungan air di dataran banjir luas, banyak kolam atau rawa

Sumber: Texas Departement of Transportation: Hydraulic Design manual (2019)

Pada persamaan (2.5) dengan batasan $X \leq x$ dan $-\infty < x < +\infty$, $P(X)$ adalah fungsi kerapatan peluang X , X merupakan variabel acak kontinu, e bernilai 2,71828, dan Y adalah faktor reduksi.

Menurut Chow et al. (1988), Log-Normal dua parameter lebih mudah diterapkan karena hanya memerlukan dua parameter, yaitu rata-rata dan simpangan baku dari nilai logaritmik, dibandingkan dengan versi tiga parameter yang memerlukan tambahan parameter lokasi. Distribusi Log-Normal dua parameter juga dianggap sesuai untuk data hidrologi, yang umumnya bersifat menceng ke kanan (*right-skewed*) dan memiliki nilai minimum mendekati nol namun tidak negatif. Fungsi kerapatan peluang dari distribusi ini dinyatakan sebagai berikut (Hardisusanto, 2010):

$$P(X) = \frac{1}{x\sigma_n\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_n}{\sigma_n}\right)^2} \dots\dots\dots(2.6)$$

Pada persamaan (2.6), $P(X)$ adalah fungsi kerapatan peluang normal, π bernilai 3,14156, e adalah 2,71828, σ_n merupakan standar deviasi nilai X , dan μ_n adalah nilai X rata-rata.

Pearson telah mengembangkan berbagai model matematis fungsi peluang untuk merumuskan distribusi secara empiris. Salah satu yang umum digunakan adalah distribusi Log-Pearson Tipe III, yang sering diterapkan dalam analisis curah hujan harian maksimum untuk memperkirakan besar banjir rencana pada periode ulang tertentu. Fungsi kerapatan peluang dari distribusi ini dapat dinyatakan melalui persamaan berikut (Hardisusanto, 2010):

$$P(X) = \frac{1}{a\gamma.b} \left[\frac{x-c}{a}\right]^{b-1} e^{-\left[\frac{x-c}{a}\right]} \dots\dots\dots(2.7)$$

Pada persamaan (2.7), $P(X)$ adalah fungsi kerapatan peluang variat X , X merupakan nilai variat, a , b , dan c adalah parameter, serta γ merupakan fungsi gamma.

Data curah hujan harian maksimum yang telah dihitung berdasarkan periode ulang kemudian diplot pada grafik peluang, yang umumnya membentuk garis lurus dan mengikuti persamaan garis umum (Hardisusanto, 2010):

$$X_{tr} = \bar{x} + k.s \dots\dots\dots(2.8)$$

Pada persamaan (2.8), X_{tr} adalah perkiraan nilai yang diharapkan terjadi pada periode ulang tertentu, $\bar{x}$ merupakan nilai rata-rata kejadian, k adalah faktor frekuensi yang merupakan fungsi peluang atau periode ulang, dan s adalah standar deviasi.

2.7. Uji Kesesuaian

Uji kesesuaian distribusi dilakukan untuk mengevaluasi apakah distribusi frekuensi dari data sampel sesuai dengan fungsi distribusi probabilitas

yang diasumsikan dapat merepresentasikan data tersebut (Kamaina, 2011). Metode yang umum digunakan dalam pengujian ini antara lain adalah uji Chi-Square dan uji Smirnov-Kolmogorov (Kementerian PUPR, 2018). Uji Chi-Square ini menggunakan parameter χ^2 , metode ini diperoleh berdasarkan rumus (Hardisusanto, 2010):

$$\chi^2 = \sum \frac{(Ef - Of)^2}{Ef} \dots\dots\dots(2.9)$$

Pada persamaan (2.9), χ^2 adalah harga Chi-Square, Ef merupakan frekuensi yang diharapkan sesuai pembagian kelas, dan Of adalah frekuensi yang terbaca pada kelas yang sama.

Uji kesesuaian Smirnov-Kolmogorov termasuk dalam kategori uji nonparametrik karena tidak bergantung pada bentuk distribusi tertentu. Pengujian ini dilakukan dengan cara yang lebih sederhana, yaitu membandingkan nilai peluang kumulatif empiris dengan peluang kumulatif teoritis untuk memperoleh selisih maksimum yang dikenal sebagai nilai D maksimum (D_{max}). Selisih tersebut digunakan untuk menentukan persamaan berikut (Hardisusanto, 2010):

$$D = \text{maksimum}[P(X_m) - P'(X_m) \dots\dots\dots(2.10)$$

Pada persamaan (2.10), D adalah perbedaan peluang maksimum, $P(X_m)$ merupakan nilai peluang data pengamatan, dan $P'(X_m)$ adalah nilai peluang teoritis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Intensitas Curah Hujan

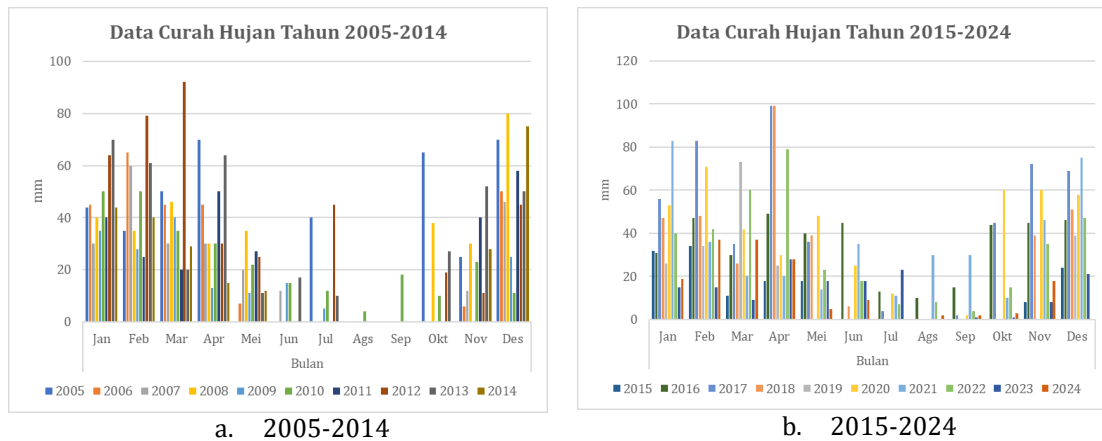
Data hujan yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan data pencatatan hujan di Stasiun Grenden dan diperoleh dari situs resmi Dinas PUSDA Provinsi Jawa Timur. Perhitungan intensitas curah hujan pada penelitian ini dibagi dalam 2 periode, yaitu tahun 2005-2014 dan tahun 2015-2024. Berdasarkan diagram curah hujan pada Gambar 5a. dan Gambar 5b. dapat diketahui bahwa dalam 20 tahun terakhir curah hujan mulai mengalami peningkatan di bulan Oktober hingga bulan Mei, sedangkan di bulan Juni hingga September curah hujan cenderung mengalami penurunan. Berdasarkan kedua diagram tersebut, juga dapat diketahui bahwa curah hujan pada tahun 2005-2014 cenderung lebih tinggi dibandingkan tahun 2015-2024.

Data hujan kedua periode diolah untuk mendapatkan data curah hujan rencana menggunakan 4 metode analisis distribusi frekuensi yaitu, distribusi normal, distribusi log normal dua parameter, distribusi Gumbel tipe I, dan distribusi log-Pearson III. Hasil perhitungan data curah hujan rencana pada Tabel 4 dan Tabel 5 dilakukan analisis kesesuaian data dengan uji Chi-Square dan Smirnov-Kolmogorov. Analisis ini dilakukan untuk memilih data hujan yang paling efisien untuk digunakan. Berdasarkan uji kesesuaian pada Tabel 6 dan Tabel 7,

nilai chi-square hitung lebih kecil daripada nilai chi-square kritis (χ^2 hitung < χ^2 kritis). Dengan demikian, hipotesis nol (H_0) diterima, yang berarti tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara distribusi frekuensi hujan berdasarkan data observasi (kemungkinan terjadi) dan distribusi frekuensi hujan berdasarkan model teoritis (kemungkinan teoritis). Penerimaan H_0 menunjukkan bahwa model distribusi teoritis yang digunakan dalam analisis IDF mampu merepresentasikan pola kejadian hujan yang tercatat secara historis dengan baik.

Hasil analisis distribusi frekuensi yang efisien untuk digunakan adalah Log Normal Dua Parameter (Tabel 8). Pada periode 2005-2014, metode ini

menghasilkan nilai Chi-Square sebesar 1 dan Δ Peluang sebesar 0,127, yang merupakan nilai terkecil dibandingkan metode lainnya. Pada periode 2015-2024, metode ini menghasilkan nilai Chi-Square sebesar 1,5 dan Δ Peluang sebesar 0,175, yang menunjukkan nilai statistik uji yang memenuhi kriteria kesesuaian. Penelitian Yuniarti & Rito Goejantoro (2020), di Kecamatan Long Iram, Kabupaten Kutai Barat menemukan Gumbel sebagai distribusi terbaik, sementara penelitian Zainal & Zufrimar (2021) di DAS Kuranji, Kota Padang memilih Normal Perbedaan ini menegaskan bahwa pemilihan distribusi bergantung pada karakteristik data, seperti koefisien variasi (CV) dan keberadaan nilai ekstrem.



Gambar 5. Data Curah Hujan
Sumber: Dinas PUSDA

Tabel 4. Rekapitulasi Perhitungan Hujan Rencana 2005-2014

Periode Ulang Tr (Tahun)	Nilai Probabilitas yang Terjadi $P(X) = (1/Tr)*100(\%)$	Normal	Log Normal Dua Parameter	Log Pearson Tipe III	Gumbel Tipe I
1	100	20.33	30.9667	41.72	34.88
2	50	66.00	64.3457	66.06	62.31
5	20	78.58	77.1685	79.14	83.20
10	10	85.17	85.6891	85.66	100.31
20	5	90.56	93.7421	91.29	120.33
25	4	91.58	95.4547	92.50	125.14

Sumber: Penulis, 2025

Tabel 5. Rekapitulasi Perhitungan Hujan Rencana 2015-2024

Periode Ulang Tr (Tahun)	Nilai Probabilitas yang Terjadi $P(X) = (1/Tr)*100(\%)$	Normal	Log Normal Dua Parameter	Log Pearson Tipe III	Gumbel Tipe I
1	100	15.51	14.5545	25.84	18.31
2	50	65.20	60.3794	62.79	56.06
5	20	87.43	85.2685	88.88	97.89
10	10	99.07	100.0532	103.45	140.39
20	5	108.60	114.0245	116.87	199.40
25	4	110.40	116.9740	119.85	215.04

Sumber: Penulis, 2025

Tabel 6. Hasil Uji Kesesuaian Data Hujan 2005-2014

Metode	Chi-Kuadrat Hitung (χ^2 hitung)	Chi-Kuadrat Kritis (χ^2 kritis)	Δ Peluang Maksimum	Δ Kritis	Kesimpulan (χ^2)	Kesimpulan (Δ)
Distribusi Normal	3	5.991	0.139	0.410	H_0 diterima	H_0 diterima
Distribusi Log Normal Dua Parameter	1	5.991	0.127	0.410	H_0 diterima	H_0 diterima
Distribusi Log Pearson III	1	5.991	0.141	0.410	H_0 diterima	H_0 diterima
Distribusi Gumbel Tipe I	8.5	5.991	0.147	0.410	H_0 diterima	H_0 ditolak

Sumber: Penulis, 2025

Tabel 7. Hasil Uji Kesesuaian Data Hujan 2015-2024

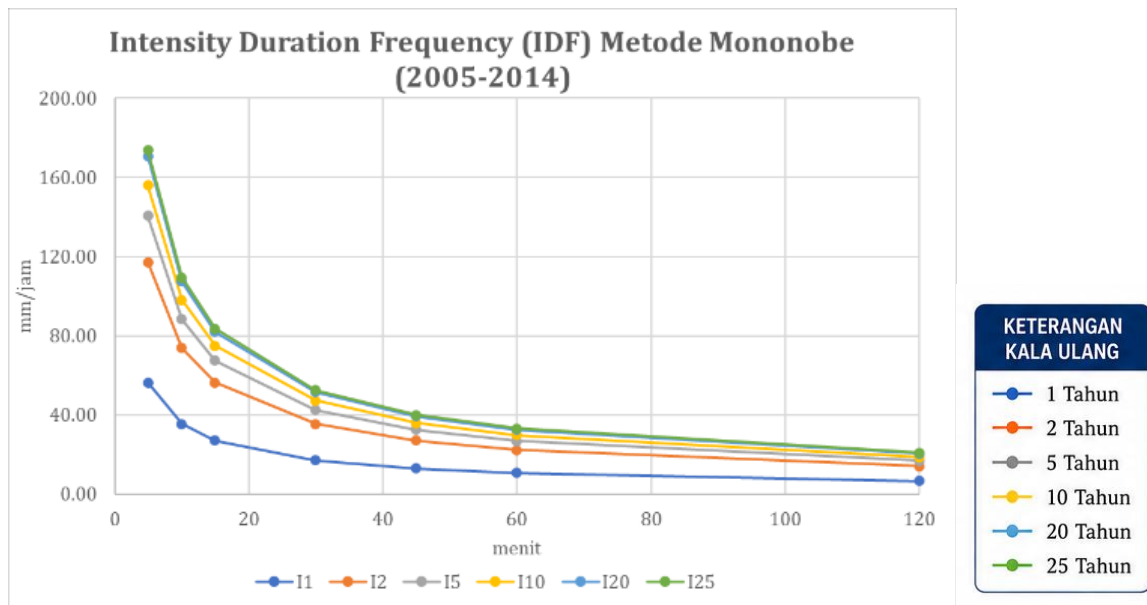
Metode	Chi-Kuadrat Hitung (χ^2 hitung)	Chi-Kuadrat Kritis (χ^2 kritis)	Δ Peluang Maksimum	Δ Kritis	Kesimpulan (χ^2)	Kesimpulan (Δ)
Distribusi Normal	1.5	5.991	0.115	0.410	H ₀ diterima	H ₀ diterima
Distribusi Log Normal Dua Parameter	1.5	5.991	0.175	0.410	H ₀ diterima	H ₀ diterima
Distribusi Log Pearson III	3.33	5.991	0.155	0.410	H ₀ diterima	H ₀ diterima
Distribusi Gumbel Tipe I	8.5	5.991	0.175	0.410	H ₀ diterima	H ₀ ditolak

Sumber: Penulis, 2025

Tabel 8. Ringkasan Uji Kesesuaian Distribusi

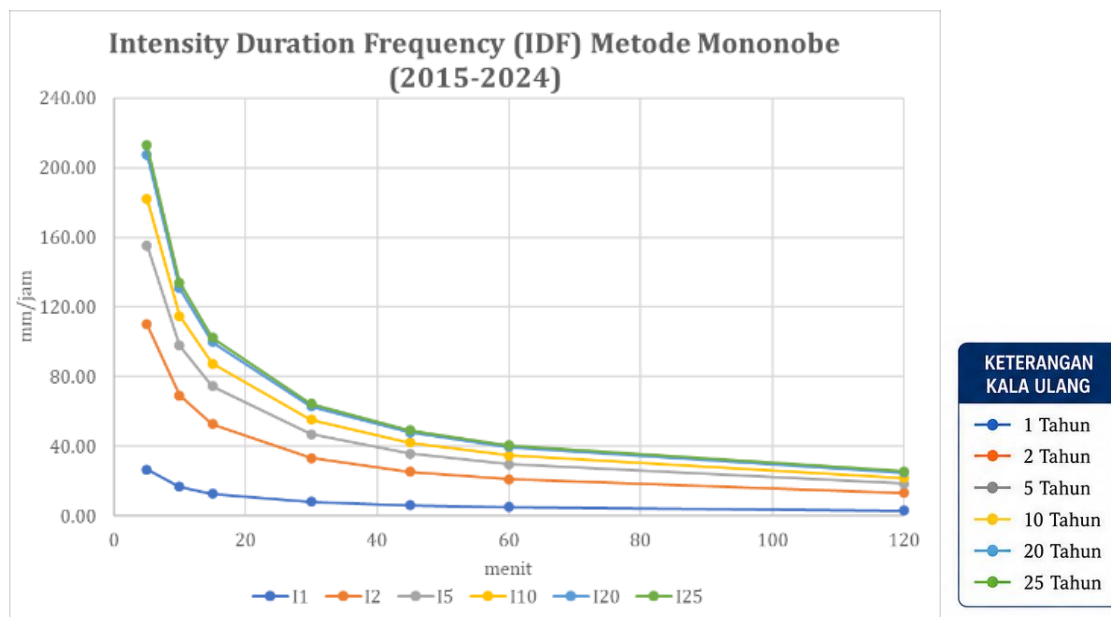
Metode	Chi-Square Hitung (2005-2014)	Chi-Square Hitung (2015-2024)	Kesimpulan
Normal	3	1.5	Diterima
Log Normal 2 Parameter	1	1.5	Diterima
Log Pearson III	1	3.33	Diterima
Gumbel Tipe I	8.5	8.5	Ditolak (Partial)

Sumber: Penulis, 2025



Gambar 6. Kurva IDF 2005-2014

Sumber: Penulis, 2025



Gambar 7. Kurva IDF 2015-2024

Sumber: Penulis, 2025

Perhitungan intensitas curah hujan dilakukan dengan berdasarkan metode Mononobe pada persamaan 2.3. Data Intensitas curah hujan berdasarkan perhitungan yang dilakukan terdiri dari intensitas curah hujan 5 menit hingga 120 menit dalam kala ulang 1 hingga 25 yang disajikan dalam kurva IDF pada Gambar 6 dan Gambar 7. Untuk melakukan perhitungan limpasan permukaan dengan metode rasional diperlukan data hujan jam-jaman, sehingga data intensitas hujan yang digunakan adalah pada menit ke 60. Penelitian Najwasyah (2023) menunjukkan bahwa metode Mononobe efektif dalam mengkonversi curah hujan harian maksimum menjadi intensitas hujan untuk berbagai durasi, sehingga cocok digunakan dalam perencanaan drainase dan pengendalian banjir.

3.2. Koefisien Limpasan Permukaan

3.2.1. Kemiringan Lereng

Tabel 9. Kemiringan Lereng 2015

MD	>30% (m ²)	10-30% (m ²)	5-10% (m ²)	0-5% (m ²)
1	126746.72	167881.58	20569.99	1248.08
2	200285.71	326073.54	52754.24	13371.47
3	61675.82	174986.74	23176.76	7184.98
4	252979.16	99925.97	48831.68	10853.01
Total	641687.41	768867.83	145332.66	32657.54

Sumber: Penulis, 2025

Tabel 10. Kemiringan Lereng 2024

MD	>30% (m ²)	10-30% (m ²)	5-10% (m ²)	0-5% (m ²)
1	142942.23	152807.35	9159.11	11537.68
2	214103.87	239616.27	25443.56	113321.26
3	95741.03	81667.63	28951.72	60663.91
4	241134.27	116051.77	24759.31	30644.47
Total	693921.40	590143.01	88313.70	216167.33

Sumber: Penulis, 2025

Tabel 9 dan Tabel 10 menunjukkan luasan area berdasarkan kemiringan lereng. Klasifikasi kemiringan lereng dilakukan berdasarkan Tabel 3. koefisien limpasan permukaan. Pada tahun 2015, MD 1, 2, dan 3 didominasi kemiringan lereng dalam kelas 10-30% sedangkan MD 4 didominasi kelas >30%. Pada tahun 2024, MD 1 dan MD 2 didominasi kemiringan lereng dalam kelas 10-30%, sedangkan MD 3 dan 4 didominasi kelas >30%. Perubahan kemiringan lereng pada MD 3 disebabkan adanya pertambangan yang berdampak pada perubahan topografi di area ini. Berdasarkan tabel tersebut, pada tahun 2015 kemiringan lereng paling luas berada dalam kelas kemiringan 10-30% seluas 76.867,83 m², sedangkan kemiringan lereng paling sedikit berada dalam kelas kemiringan 0-5% seluas 32.657,54 m². Pada tahun 2024 kemiringan lereng paling luas berada dalam kelas kemiringan >30% seluas 693.921,40 m², sedangkan kemiringan lereng paling sedikit berada dalam kelas kemiringan 5-10% seluas 88.313,70 m².

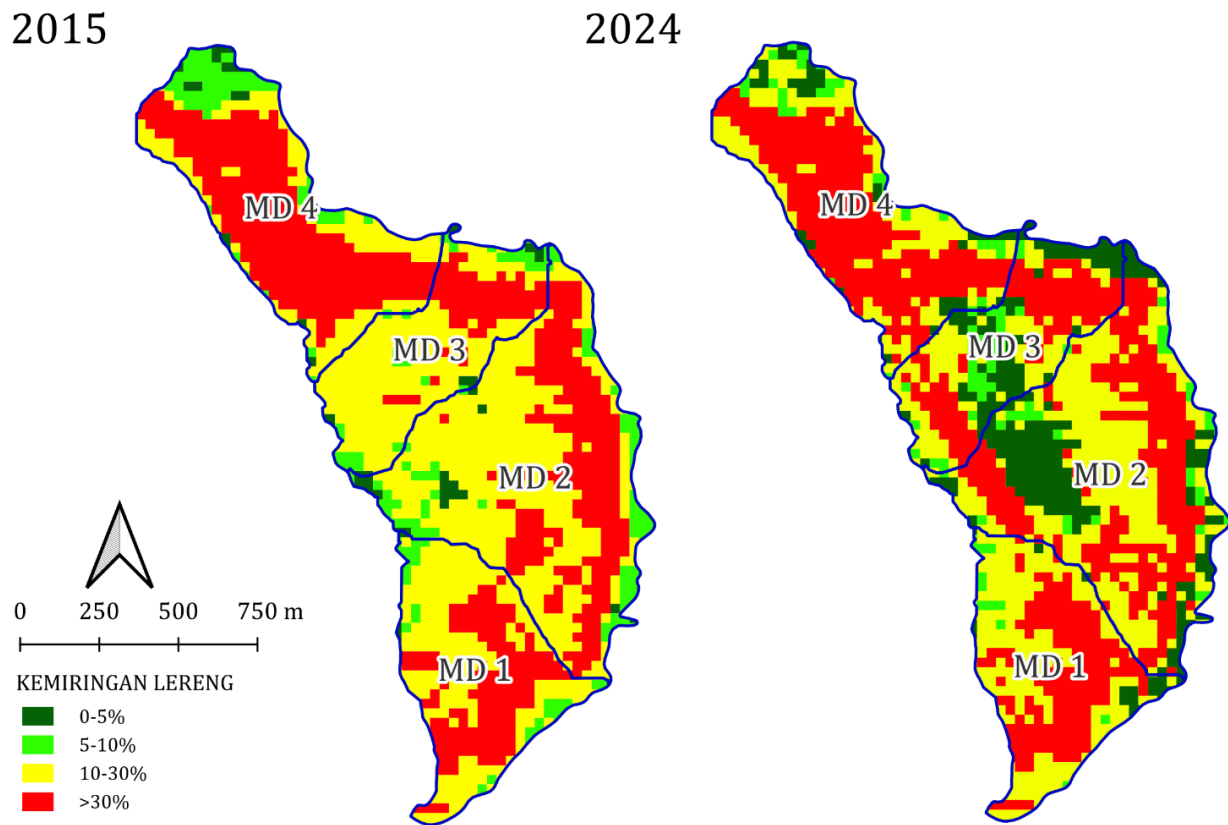
Luasan kemiringan yang cenderung lebih curam pada tahun 2024 disebabkan adanya kegiatan pertambangan yang mengubah topografi kawasan timur Gunung Sadeng yang dapat dilihat pada Gambar 8. Luasan pada tingkat kemiringan > 30% terjadi peningkatan sebesar 8,14%, dengan perluasan terbesar di MD 1 dan MD 3. Pada tingkat kemiringan 10-30% terjadi penurunan luasan sebesar 23,25%, dengan penurunan terbesar di MD 2 dan MD 3. Pada tingkat kemiringan 5-10% terjadi penurunan luasan sebesar 39,16%, terutama di MD 2 dan MD 4. Pada tingkat kemiringan 0-5% terjadi peningkatan terbesar, yaitu 561,89% yang menunjukkan perluasan yang signifikan pada lahan datar di seluruh MD, terutama MD 2 dan MD 3.

Terjadinya peningkatan luasan pada daerah dengan kemiringan lereng tingkat 0-5% ini diakibatkan oleh perluasan area tambang. Penambangan kapur akan membuat pit (lubang galian), yang mana area dasarnya merupakan area datar yang memiliki kemiringan lereng rendah. Peningkatan luas area dengan kemiringan rendah di lahan tambang dapat dilihat pada Gambar 8 yang menunjukkan penurunan tingkat kemiringan lereng pada dasat pit di tahun 2024. Berdasarkan penelitian Gofur & Wesnawa (2018), penambangan batu kapur di Gunung Sadeng menyebabkan perubahan topografi yang signifikan.

3.2.2. Penggunaan Lahan

Penggunaan lahan pada penelitian ini diklasifikasikan menjadi 8 jenis penggunaan lahan, yaitu bangunan, jalan, vegetasi, tanpa vegetasi, semak, sawah, tambang, dan rumput. Hasil dari pengolahan data ini berupa peta penggunaan lahan (Gambar 9) dan persentase luasan masing-masing penggunaan lahan. Pengolahan data dilakukan dengan metode *random forest* dengan data referensi (*training sample*) yang digunakan adalah data titik deliniasi berdasarkan interpretasi citra *google earth* yang memiliki resolusi lebih tinggi (0,65x0,65 m). Interpretasi citra dilakukan berdasarkan pedoman buku "Tim Bahan Ajar Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan."

Berdasarkan hasil menghasilkan data penggunaan lahan pada tahun 2015 dengan akurasi total 0,82 dan nilai kappa sebesar 0,80, pada tahun 2024 memiliki dengan akurasi total 0,87 dan kappa sebesar 0,85. Berdasarkan klasifikasi (Viera & Garret, 2005), nilai kappa menunjukkan tingkat kesepakatan yang kuat (*substantial agreement*) antara hasil klasifikasi dan data referensi. Sementara itu, pada tahun 2024 menunjukkan kesepakatan yang hampir sempurna (*almost perfect agreement*) dalam hasil klasifikasi penggunaan lahan.



Gambar 8. Peta Kemiringan Lereng
Sumber: Penulis, 2025

Pada Gambar 10 dan Gambar 11 dapat diketahui bahwa penggunaan lahan tahun 2015 dan 2024 didominasi oleh lahan tanpa vegetasi, tahun 2015 sebesar 40% dan tahun 2024 sebesar 20%. Dapat diketahui pula peningkatan luasan paling signifikan terjadi pada lahan tambang, vegetasi, dan jalan. Salah satu penyebab peningkatan ini adalah adanya kegiatan penambangan dan revegetasi yang dilakukan oleh pihak tambang. Berdasarkan laporan evaluasi tambang, reklamasi akan dilakukan progresif setiap tahunnya dari tahun 2022-2030 mengikuti kemajuan tambang tahunan. Reklamasi yang dilakukan berupa penataan lahan, penebaran tanah pucuk, dan revegetasi. Berdasarkan Kepmen ESDM No.1827 K/30/MEM/2018, kegiatan reklamasi pada tahap Operasi Produksi salah satunya dapat dilakukan dalam bentuk revegetasi.

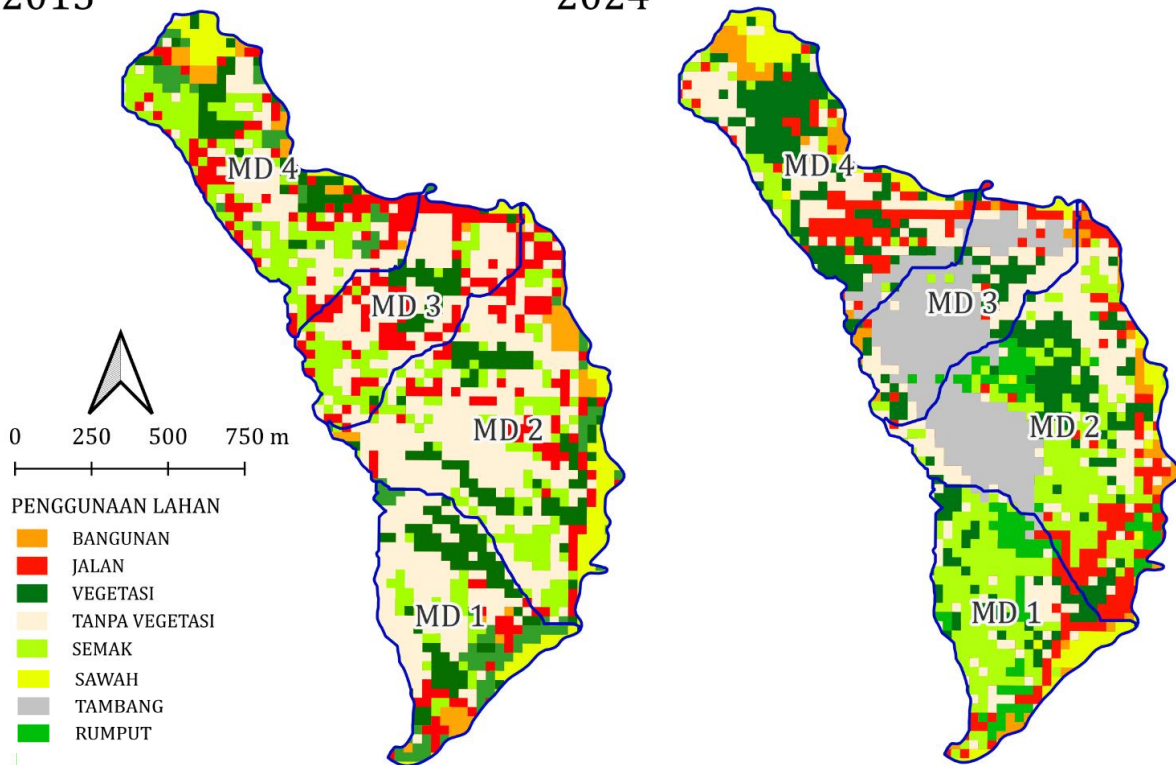
3.2.3. Koefisien Limpasan Permukaan Total

Perhitungan total koefisien limpasan permukaan dilakukan berdasarkan klasifikasi pada Tabel 3 dan Persamaan 2.2. Berdasarkan klasifikasi tersebut, koefisien terbagi menjadi 3 bagian, yaitu relief yang

dihitung berdasarkan kemiringan lereng, sedangkan bagian infiltrasi, vegetasi penutup, dan reservoir permukaan dihitung berdasarkan informasi penggunaan lahan. Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan pada Tabel 11 dan Tabel 12, diketahui bahwa total koefisien limpasan di tahun 2015 cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan tahun 2024. Pada tahun 2015, koefisien limpasan tertinggi berada pada MD 3 dan terendah pada MD 1 hal ini disebabkan kondisi penggunaan lahan di MD 3 yang didominasi oleh lahan tanpa vegetasi yang mana akan mengakibatkan infiltrasi, vegetasi penutup, dan reservoir permukaan memiliki nilai koefisien yang lebih tinggi dibandingkan mikroDAS lainnya meskipun koefisien relief cenderung lebih rendah dibandingkan MD 4. Pada tahun 2024, koefisien limpasan tertinggi berada pada MD 4 dan terendah pada MD 3 hal ini disebabkan kondisi penggunaan lahan di MD 4 yang didominasi oleh kemiringan >30% meskipun nilai infiltrasi, vegetasi penutup, dan reservoir permukaan cenderung lebih rendah dibandingkan MD 2.

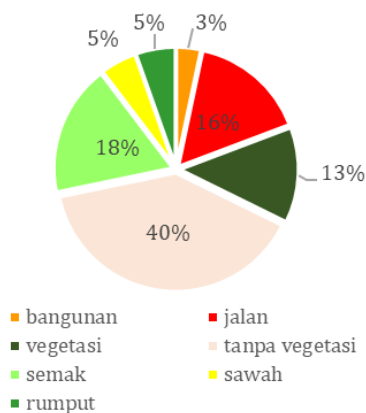
2015

2024



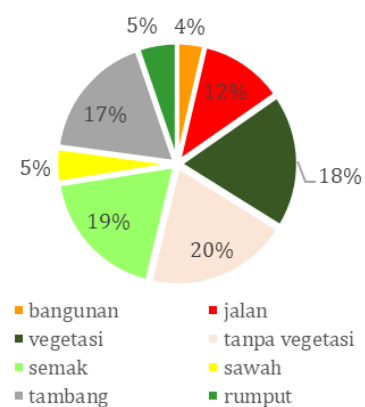
Gambar 9. Peta Penggunaan Lahan
Sumber: Penulis, 2025

Penggunaan Lahan 2015



Gambar 10. Diagram Penggunaan Lahan 2015
Sumber: Penulis, 2025

Penggunaan Lahan 2024



Gambar 11. Diagram Penggunaan Lahan 2024
Sumber: Penulis, 2025

Tabel 11. Koefisien Limpasan Permukaan 2015

C	Relief	Infiltrasi Tanah	Vegetasi Penutup	Reservoir Permukaan	Total C
1	0.265	0.101	0.105	0.078	0.549
2	0.256	0.112	0.117	0.084	0.569
3	0.248	0.118	0.123	0.088	0.577
4	0.274	0.108	0.112	0.081	0.576

Sumber: Penulis, 2025

Tabel 12. Koefisien Limpasan Permukaan 2024

C	Relief	Infiltrasi Tanah	Vegetasi Penutup	Reservoir Permukaan	Total C
1	0.267	0.097	0.100	0.074	0.538
2	0.239	0.113	0.117	0.084	0.553
3	0.230	0.136	0.138	0.097	0.511
4	0.270	0.105	0.106	0.081	0.561

Sumber: Penulis, 2025

3.3. Limpasan Permukaan

Tabel 13. Limpasan Permukaan 2015

Kala Ulang	Q (Debit Aliran) m ³ /detik 2015			
	MD1	MD2	MD3	MD4
1	0.519	1.008	0.460	0.688
2	1.079	2.094	0.957	1.430
5	1.294	2.511	1.147	1.715
10	1.437	2.789	1.274	1.905
20	1.572	3.051	1.394	2.084
25	1.601	3.107	1.419	2.122

Sumber: Penulis, 2025

Tabel 14. Limpasan Permukaan 2024

Kala Ulang	Q (Debit Aliran) m ³ /detik 2024			
	MD1	MD2	MD3	MD4
1	0.239	0.460	0.225	0.325
2	0.993	1.909	0.933	1.349
5	1.402	2.696	1.318	1.905
10	1.645	3.164	1.547	2.235
20	1.875	3.605	1.763	2.547
25	1.923	3.699	1.808	2.613

Sumber: Penulis, 2025

Perhitungan limpasan permukaan dilakukan menggunakan metode rasional dengan persamaan 2.1. Tabel 13 dan Tabel 14 menunjukkan hasil perhitungan limpasan permukaan terdiri dari kala ulang 1 hingga 25 tahun. Berdasarkan laporan evaluasi tambang, kala ulang yang digunakan dalam pendugaan limpasan permukaan adalah kala ulang 2 tahunan karena tambang masih mengalami perluasan dan dianggap cukup sering sehingga fasilitas tetap berfungsi optimal tanpa *over-design* untuk saluran operasional harian. Kala ulang 2 tahun sebab sesuai dengan kriteria pembangunan sarana tambang (Priskila Secilia *et al.*, 2023). Berdasarkan kala ulang 2, pada tahun 2015 dan 2024, limpasan permukaan tertinggi diduga terjadi pada MD 2 dan limpasan permukaan terendah terjadi pada MD 1 dan MD 3. Selain itu, dapat diketahui juga jika perubahan limpasan permukaan paling signifikan berada pada MD 2, yaitu sebesar 8,83%.

Perubahan kemiringan lereng dan penggunaan lahan secara langsung memengaruhi besar kecilnya debit limpasan permukaan. Pada MD1, luasan lahan tanpa vegetasi menurun sebesar 67%, semak meningkat dari 29.448,99 m² menjadi 126.162,49 m² dan luas lereng sangat landai (0–5%) meningkat dari 1.248,08 m² menjadi 11.537,68 m². Kondisi ini menyebabkan limpasan berdasarkan kala ulang 2 tahun turun sekitar 8% dari 1,079 m³/detik pada 2015 menjadi 0,993 m³/detik pada 2024. Pada MD2, meskipun terjadi perluasan lahan tambang dari nol menjadi 104.254 m², peningkatan lereng sangat landai dari 13.371,47m² menjadi 113.321,26 m² dan penurunan lahan tanpa vegetasi sebesar 57% menyebabkan penurunan limpasan sebesar 9% dari 2,094 m³/detik menjadi 1,909 m³/detik. MD3 mengalami perluasan lahan tambang yang paling signifikan, dari nol menjadi 146.582 m², disertai penurunan luas semak hingga 92%. Walaupun vegetasi meningkat dan lereng sangat landai meningkat dari 7.184,98 m² menjadi 60.663,91m²,

limpasan hanya turun dari 0,957 m³/detik menjadi 0,933 m³/detik (2,5%). Sementara itu, pada MD4, vegetasi meningkat dari 48.311,15 m² menjadi 128.444,36 m² dan lereng sangat landai dari 10.853,01m² menjadi 30.644,47 m², meskipun terjadi penurunan tutupan rumput hingga 98% dan peningkatan lahan tambang seluas 24.041 m². Hal ini menyebabkan limpasan menurun dari 1,430 m³/detik menjadi 1,349 m³/detik atau sekitar 5,7%. Penurunan limpasan pada kala ulang 2 tahun di seluruh MD berkisar antara 2–9%, yang menunjukkan bahwa peningkatan tutupan vegetasi dan pelandaian lereng mampu menurunkan limpasan permukaan. Namun, dampak ekspansi tambang dan hilangnya penutup tanah rendah seperti rumput tetap menjadi faktor yang menghambat infiltrasi. Pernyataan ini didukung dengan hasil penelitian Muchtar *et al.* (2024) dan Fatahillah *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa kemiringan lereng yang landai akan memberikan lebih banyak kesempatan tanah untuk menyerap dan mengalirkan air ke dalam tanah dan penggunaan lahan tanpa tutupan vegetasi dapat meningkatkan limpasan permukaan.

Penurunan limpasan permukaan juga disebabkan oleh penurunan intensitas curah hujan jam-jaman pada kala ulang 2 tahun dan koefisien limpasan. Penurunan intensitas curah hujan 60 menit pada kala ulang 2 tahun dari 22,33 mm/jam (2005–2014) menjadi 20,95 mm/jam (2015–2024) menunjukkan adanya kecenderungan berkurangnya intensitas hujan dengan frekuensi kejadian yang relatif sering. Sebaliknya, pada kala ulang yang lebih besar seperti 5 hingga 25 tahun, intensitas justru meningkat, mengindikasikan adanya lonjakan pada hujan-hujan ekstrem yang lebih jarang terjadi. Perbedaan tren ini disebabkan oleh pengaruh distribusi statistik yang lebih sensitif terhadap nilai ekstrem pada kala ulang tinggi, serta keterbatasan data yang hanya menggunakan curah hujan harian maksimum tahunan, sehingga estimasi untuk kala ulang rendah cenderung merepresentasikan kejadian umum, sementara kala ulang tinggi dipengaruhi oleh kejadian ekstrem dalam periode tersebut (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017)

Menurut penelitian Sutarno (2012), batu kapur memiliki sifat mudah kering, sehingga tutupan lahan pada area ini juga tergantung pada curah hujan. Curah hujan merupakan salah satu parameter limpasan permukaan yang tidak bisa diprediksi, meskipun curah hujan pada 10 tahun terakhir cenderung menurun, curah hujan ada 10 tahun kedepan bisa juga meningkat karena kondisi perubahan iklim yang tidak menentu. Pada aspek kemiringan lereng, terjadinya peningkatan pada lahan dengan kemiringan rendah dapat berkontribusi terhadap penurunan nilai koefisien limpasan. Kegiatan revegetasi yang dilakukan pertambangan juga dapat menjadi faktor penurunan limpasan permukaan pada kawasan ini. Batuan kapur yang permeabel dengan rongga bawah permukaan memungkinkan infiltrasi tinggi sehingga limpasan permukaan tetap rendah. Karakteristik

permeabel batuan kapur akan berpengaruh terhadap pola limpasan permukaan, sehingga pengelolaan lahan dan sistem drainase harus mempertimbangkan kondisi geologi lokal untuk mengoptimalkan infiltrasi dan mengurangi risiko limpasan permukaan (Munir, 2016).

Penurunan koefisien limpasan sebagai dampak positif upaya reklamasi dan revegetasi tidak serta merta menghilangkan potensi bahaya limpasan. Terdapat indikasi peningkatan risiko debit limpasan permukaan pada beberapa mikroDAS, terutama saat menghadapi curah hujan dengan periode ulang yang lebih tinggi (5-25 tahun). Kondisi ini mengindikasikan bahwa dinamika debit limpasan tidak hanya bergantung pada koefisien limpasan, melainkan juga sangat dipengaruhi oleh intensitas curah hujan ekstrem yang dapat memicu kenaikan debit signifikan melebihi kapasitas drainase yang ada saat ini.

Total limpasan permukaan mengalami penurunan dibandingkan tahun 2015, sekalipun luas lahan tambang pada tahun 2024 mencapai 17%. Fenomena ini didorong oleh kombinasi beberapa faktor krusial. Pertama, terdapat penurunan intensitas curah hujan jam-jaman, khususnya pada kala ulang 2 tahun, yang secara langsung mengurangi volume air yang masuk ke sistem. Kedua, upaya reklamasi tambang yang berkelanjutan telah meningkatkan tutupan vegetasi dan memperbaiki struktur lahan, sehingga secara efektif menurunkan nilai koefisien limpasan total. Ketiga, perubahan topografi akibat aktivitas penambangan menciptakan lebih banyak area landai (lereng 0-5%), yang memberikan ruang infiltrasi lebih luas serta kapasitas tampungan permukaan yang lebih baik dibandingkan kondisi sebelumnya, sehingga mampu meredam laju debit limpasan sekalipun terdapat ekspansi area terbuka.

Meskipun berdasarkan perhitungan limpasan permukaan tahun 2015-2024, pada kala ulang 2 tahun. Pada kala ulang 5-25 tahun periode 2015-2024 terjadi peningkatan limpasan permukaan, yang salah satunya terjadi karena curah hujan yang tinggi dibandingkan periode sebelumnya, tidak hanya karena kondisi di dalam tambang (misalnya kelerengan dan kondisi penggunaan lahan). keterbatasan dalam penelitian ini yaitu, bahwa penelitian ini tidak mempertimbangkan kejadian hujan ekstrem. Keterbatasan penelitian ini juga pada adanya belum ada validasi debit lapangan dan belum dihitung waktu konsentrasi tiap mikroDAS. Dengan demikian, maka kondisi perubahan curah hujan, risiko hujan ekstrem, risiko perubahan iklim, serta validasi lapangan dan waktu konsentrasi tiap mikroDAS tetap dapat diperhatikan bagi penelitian selanjutnya, misalnya dalam pembangunan sarana drainase dan *settling pond* di area pertambangan. *Settling pond* merupakan salah satu sarana tambang yang mempunyai fungsi sebagai kolam pengendapan. Untuk mengantisipasi limpasan permukaan akibat adanya hujan dengan intensitas yang lebih tinggi (kala ulang >2 tahun) maka disarankan menggunakan tambahan *spillway*, serta membuat *settling pond*

dalam beberapa kompartemen, sehingga tampungan dapat meningkat.

4. KESIMPULAN

Hasil perhitungan yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa dugaan total limpasan permukaan berdasarkan kala ulang 2 pada tahun 2015 sebesar 5,56 m³/detik dan tahun 2024 sebesar 5,184 m³/detik. Hasil ini menunjukkan adanya penurunan limpasan permukaan sebesar 6,76%. Penurunan ini dapat disebabkan oleh menurunnya intensitas curah hujan jam-jaman di kala ulang 2, perubahan topografi, dan penggunaan lahan akibat aktivitas pertambangan dan revegetasi, yang berdampak pada penurunan nilai koefisien limpasan. Terjadi peningkatan signifikan pada area dengan kemiringan lereng rendah serta luasan vegetasi (di MD 4 meningkat dari 48.311,15 m² menjadi 128.444,36 m²) dan semak (di MD 1 meningkat dari 29.448,99 m² menjadi 126.162,49 m²), yang memberikan kontribusi besar terhadap pengurangan limpasan permukaan. Meskipun terjadi penurunan limpasan, keberadaan limpasan permukaan tetap menjadi perhatian dalam pengelolaan tambang karena berpotensi mengganggu aktivitas operasional. Oleh karena itu, hasil pendugaan ini sangat penting sebagai dasar perencanaan sistem drainase tambang, seperti perencanaan *settling pond* yang sesuai dengan dinamika hidrologi di Kawasan Timur Gunung Sadeng. Keterbatasan dalam penelitian ini yaitu tidak dipertimbangkannya hujan ekstrem, serta belum ada validasi debit lapangan dan waktu konsentrasi tiap mikroDAS, sehingga untuk mengantisipasi limpasan permukaan akibat adanya hujan dengan intensitas yang lebih tinggi (kala ulang >2 tahun) maka disarankan menggunakan tambahan *spillway*, serta membuat *settling pond* dalam beberapa kompartemen, sehingga tampungan dapat meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrizal, R., Misdiyanta, P., & Mohamad, M. A. (2022). Kajian Teknis Sistem Mine Drainage Pada Tambang Terbuka Batubara Di Pt. Sims Jaya Kaltim. *Mining Insight: Jurnal Mahasiswa Teknik Pertambangan*, 3(1), 33-42. [//journal.itny.ac.id/index.php/mining/article/view/2806](http://journal.itny.ac.id/index.php/mining/article/view/2806)
- Alhabsyi, G. A., Ranggu, R. B., Syamsuddin, & Sani, H. (2024). *Pengenalan Kegiatan Pertambangan* (Efitra, Ed.). PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Arini, D. P. (2021). Pelaksanaan Izin Pertambangan Batu Kapur di Gunung Sadeng Jember Perspektif Hukum Lingkungan. *Rechtenstudent Journal*, 2, 145-157.
- Armidi, Mangidi, U., & Oetama, D. (2022). *Pengelolaan Limpasan Air Permukaan Proyek Smelter di Kabupaten Kolaka*. Penerbit Adab.
- Ayuningrum, V. R., Yushardi, Nurdin, A. E., Astutik, S., & Fahrudi, A. I. (2023). Pemetaan Persebaran Kualitas Air Sungai Irigasi pada Lahan Pertaniandi Lereng Karst Gunung Sadeng Kecamatan Puger Kabupaten Jember. *JPIG (Jurnal Pendidikan Dan Ilmu Geografi)*, 8. <http://ejournal.unikama.ac.id/index.php/JPIG/>

- Zaharani, A. R. dan Masitoh, F. (2026). Analisis Limpasan Permukaan di Kawasan Timur Gunung Sadeng, Kecamatan Puger, Kabupaten Jember Tahun 2015 - 2024. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(3), 614-630, doi:10.14710/jil.24.3.614-630
- Bunga, N. I. (2023). *Sistem Agroforestri Untuk Pengendalian Limpasan Permukaan Dan Erosi*. Feniks Muda Sejahtera.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company.
- Esa, A. D. (2013). Studi Geografis Industri Batu Gamping Di Desa Puger Kulon Dan Desa Kasiyan Kecamatan Puger. *Jurnal Mahasiswa Universitas Negeri Surabaya*.
- Farida, A., & Aryuni, V. T. (2020). Analisis Limpasan Permukaan Di Sekitar Kampus Universitas Muhammadiyah Sorong Kota Sorong. *Jurnal Sains Dan Teknologi Lingkungan*, 12(2), 146-161.
- Fatahillah, A. W., Suyarto, R., & Wiyanti. (2022). Analisis Spasial Koefisien Limpasan Permukaan untuk Estimasi Luapan Banjir di DAS Tukad Buleleng Provinsi Bali. *Jurnal Agroteknologi Tropika*, 11(1), 30-40.
- Febriani, N., & Ahyuni. (2023). Analisis Perubahan Penggunaan Lahan Tahun 2010-2020 Terhadap Debit Banjir di Daerah Aliran Sungai (DAS) Sikilang Kabupaten Pasaman. *El-Jughrafiyah*, 3(1), 146-161.
- Gofur, M. A., & Wesnawa, I. G. A. (2018). Dampak Ekologi Penambangan Batu Kapur Sebagai Bahan Dasar Pembuatan Semen di Gunung Sadeng Kecamatan Puger, Kabupaten Jember. *Jurnal Pendidikan Geografi Undiksha*, 6(3). <https://doi.org/10.23887/JIPG.V6I3.20703>
- Hardisusanto, N. (2010). *Aplikasi Hidrologi*. Jogja Mediautama.
- Kamaina, I. M. (2011). *Teknik Perhitungan Debit Rencana Bangunan Air*. Graha Ilmu.
- Kementerian PUPR. (2018). *Analisis Hidrologi dan Sedimen*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia Pusat Pendidikan Dan Pelatihan Sumber Daya Air Dan Konstruksi.
- Khalik, R. M., Cahyadia, T. A., Amri, N. A., & Setiawan, A. (2021). Kajian Dan Rancangan Sistem Penyaliran Tambang Pada Tambang Terbuka Dengan Studi Kasus Extreme Rainfall. *Jurnal Teknologi Pertambangan*, 6(2), 106-120.
- Lestari, N. P., Widoanindyawati, V., Kusumastuti, D. R., Triwardaya, T., & Marsudi, M. (2024). Optimalisasi Kandungan Kapur Pada Material Organik Untuk Meningkatkan Kuat Geser Tanah. *Bangun Rekaprima*, 10(1), 125-134. <https://doi.org/10.32497/BANGUNREKAPRIMA.V10I1.5585>
- Lusia, M., Safaruddin, S., & Zulkifli, Z. (2023). Tinjauan Teknik Settling Under Mining Pond (Sump) Di Penambangan Batu Kapur Pt. Semen Baturaja (Persero) Tbk. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 53-66. <https://doi.org/10.36546/TEKNIKSIPIL.V12I2.826>
- Muchtar, A., Wahyullah, W., Herawaty, H., Arsyad, U., & Fathurrahman, A. F. (2024). Estimasi Limpasan Permukaan dengan Menggunakan Metode CN Modifikasi di Sub DAS Mamasa. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(4), 1001-1008. <https://doi.org/10.14710/jil.22.4.1001-1008>
- Munir, M. (2016). Studi Pengaruh Penggunaan Lahan Terhadap Peningkatan Limpasan Air Permukaan. *Jurnal Ilmu- Ilmu Teknik*, 15(1).
- Muttaqin, A., Suntoro, & Komariah. (2021). Estimation of peak runoff impact from land use change using remote sensing and GIS in Keduang sub-watershed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 824(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/824/1/012005>
- Najwasyah, F. (2023). *Penerapan Metode Perhitungan Intensitas Hujan Untuk Menentukan Kurva Intensitas Durasi Frekuensi (IDF) Di Stasiun Gunungsari, Kabupaten Lombok Barat*.
- Pamuji, K. E. (2014). The Impact Of Limestone Mining On Groundwater Reserves (Case Study: Limestone Mining, Maruni, Manokwari, West Papua). *JISTECH: Journal of Information Science and Technology*, 6(2). <https://jurnal.unipa.ac.id/index.php/istech/article/view/144>
- Perdirjen RLPS No. P.15/V-Set/2009. (n.d.). *Perdirjen RLPS No. P.15/V-Set/2009*.
- PP No.96 Tahun 2021. (n.d.). *PP No.96 Tahun 2021*.
- Priskila Secilia, M., Bisri, M., & Andawayanti, U. (2023). Studi Evaluasi Sistem Drainase Air Limpasan Permukaan Di Site Gurimbang Mine Operation PT Berau Coal Study Evaluation of Surface Runoff Mine Drainage System at Gurimbang Mine Operation PT Berau Coal. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 03(02), 719-732. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.tahun.vol.no>
- Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi. (2017). *Modul 6 Analisis Hidrologi*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia.
- Putri, F. A. R. (2020). Kajian Teknis Sistem Penyaliran Tambang Batubara pada Tambang Terbuka di PT. X. *Jurnal IPTEK*, 24(1), 59-66. <https://doi.org/10.31284/JIPTEK.2020.V24I1.902>
- Putri, Y. E. (2014). Analisa Penyaliran Air Tambang Batu Kapur PT. Semen Baturaja (Persero) di Pabrik Baturaja. *Jurnal Desiminasi Teknologi*, 2(1).
- Rahmania, T., Apriyanto, B., & Astutik, S. (2019). Potensi Terjadinya Longsor Pada Kawasan Karst Gunung Sadeng Puger Karena Adanya Aktivitas Pertambangan. *Majalah Pembelajaran Geografi*, 2(1), 161-171. <https://jurnal.unej.ac.id/index.php/PGE0/article/view/11937>
- Rahmasari, I. (2013). Potensi Kerusakan Lahan Karst di Gunung Sadeng Kecamatan Puger Kabupaten Jember. *Swara Bhumi*, 2(3).
- Rawa, C. G. (2019). Pengenalan Bentang Lahan Karst Puger, Pantai Pancer, Gladak Perak, Gunung Bromo, Dan Pantai Bentar. *Majalah Pembelajaran Geografi*. *Majalah Pembelajaran Geografi*, 2(1), 22-46.
- Reszler, C., Komma, J., Stadler, H., Strobl, E., & Blöschl, G. (2018). A propensity index for surface runoff on a karst plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6147-6161. <https://doi.org/10.5194/HESS-22-6147-2018>
- Satriyani, D. A. P. (2014). Studi Tentang Kondisi Sosial Ekonomi Penambang Kapur Di Gunung Sadeng Kecamatan Puger Kabupaten Jember. *Swara Bhumi*, 3.
- Soewarno. (1995). *Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisa Data Jilid 1*. Nova.
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1980). *Hidrologi untuk pengairan*. PT. Pradnya Paramita.
- Suripin. (2003). *Sistem drainase perkotaan yang berkelanjutan*. Andi.
- Sutarno. (2012). Kajian Hidrologi pada Satuan Penggunaan Lahan. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Agroklimatologi*, 9(1).

- Syarifuddin, A. (2017). *Drainase Perkotaan Berwawasan Lingkungan*. Penerbit Andi.
- Tahir Lopa, R., & Karamma, R. (2026). *Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur Kajian Pengaruh Perubahan Tutupan Lahan terhadap Koefisien Limpasan dengan Menggunakan Metode Rasional dan Metode Cook di Kota Makassar*.
- Tarru, R. O., Widyastuti, I., Prihatini, W. ode zulia, & Tarru, H. E. (2024). *Hidrologi*. Deepublish.
- Texas Departement of Transportation: Hydraulic Design manual. (2019). *Hydraulic Design manual*. Texas Departement of Transportation.
- Tim Bahan Ajar Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. (2013). *Dasar-Dasar Penginderaan Jarak Jauh (Inderaja = Remote Sensing)*. Direktorat Jenderal Pendidikan Dasar dan Menengah, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan.
- Triatmodjo, B. (2008). *Hidrologi Terapan*. Beta Offset Yogyakarta.
- Utomo, M., H, S., & Soedjoko, S. (2012). Kajian Pengaruh Karakteristik Hujan Terhadap Volume Aliran dan Berat Suspensi di Kawasan Karst. *Widyariset*, 15(3), 527–534.
- Viera, A., & Garret, J. (2005). *Understanding Interobserver Agreement: The Kappa Statistic*. Family Medicine.
- Wahjunie, E. D., Hidayat, Y., Dewanti, K. Y., & Purwakusuma, W. (2023). Prediksi Debit Puncak DAS Ciliwung Hulu sebagai Pengendali Jasa Lingkungan Hidrologi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(4), 946–955. <https://doi.org/10.14710/jil.21.4.946-955>
- Wang, S., Yan, Y., Fu, Z., & Chen, H. (2022). Rainfall-runoff characteristics and their threshold behaviors on a karst hillslope in a peak-cluster depression region. *Journal of Hydrology*, 605, 127370. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127370>
- Yuniarti, D., & Rito Goejantoro, dan. (2020). Analisis Distribusi Frekuensi dan Periode Ulang Hujan (Studi Kasus: Curah Hujan Kecamatan Long Iram Kabupaten Kutai Barat Tahun 2013-2017) Frequency Distribution Analysis and Rain Return Period (Case Study: Rainfall data of Long Iram Sub-District, West Kutai District in 2013 to 2017). *Jurnal EKSPONENSIAL*, 11(1).
- Zainal, E., & Zufrimar, D. (2021). *Distribusi Probabilitas Curah Hujan pada Daerah Aliran Sungai Kuranji*. 11(01), 17–26.
- Zhang, J., Chen, H., Fu, Z., Luo, Z., Wang, F., & Wang, K. (2022). Effect of soil thickness on rainfall infiltration and runoff generation from karst hillslopes during rainstorms. *European Journal of Soil Science*, 73(4), e13288. <https://doi.org/10.1111/EJSS.13288>; [WEBSITE:WEBSITE.BSSSJOURNALS:PAGEGROUP.STRING:PUBLICATION](https://www.ejss-journal.com/issue/view/EJSS.13288)