



## Pencegahan Erosi melalui Optimalisasi Model Kineros dan Musle dalam Skala Daerah Aliran Sungai

\*Andi Setyo Pambudi

Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas)  
Menara Bappenas, Jl. H.R. Rasuna Said, Kuningan, Setia Budi,  
Jakarta Selatan, Daerah Khusus Jakarta 12920

\*Correspondent Author email: andi.pambudi@bappenas.go.id

### Abstrak

Dalam kajian hidrologi, perubahan tata guna lahan dalam wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) secara langsung memengaruhi volume limpasan permukaan dan tingkat erosi. Berbagai model hidrologi telah dikembangkan secara berkelanjutan untuk memprediksi kedua fenomena ini sebagai dasar penentuan arah konservasi yang tepat melalui optimalisasi penggunaan lahan. Di era pembangunan berkelanjutan saat ini, pendekatan terhadap konservasi harus mempertimbangkan secara proporsional dimensi sosial, ekonomi, dan lingkungan. Model Kineros (*Kinematic Runoff and Erosion*) dirancang untuk menganalisis keterkaitan antara penggunaan lahan dan limpasan permukaan. Sementara itu, model MUSLE digunakan untuk memprediksi tingkat erosi berdasarkan faktor lahan, curah hujan, jenis tanah, kemiringan lereng, serta praktik konservasi yang ada. Penelitian ini bertujuan menilai keunggulan masing-masing model dalam konteks hidrologi DAS dan mengeksplorasi kemungkinan integrasinya guna menghasilkan rekomendasi konservasi yang lebih holistik. Metodologi yang digunakan berupa studi literatur kualitatif terhadap dua jurnal utama yang relevan. Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan untuk meningkatkan akurasi pemetaan wilayah strategis. Temuan studi merekomendasikan pendekatan multidisiplin yang menggabungkan analisis spasial, perhitungan teknokratis, dan instrumen ekonomi untuk mendukung kebijakan konservasi sumber daya air yang lebih efektif.

**Kata Kunci:** Kineros, Musle, Limpasan Permukaan, Erosi

### Abstract

*Within the field of hydrology, land use changes in watershed areas significantly influence surface runoff dynamics and soil erosion processes. To address these challenges, various hydrological models have been progressively developed to predict erosion rates and runoff volumes, serving as critical tools for informing land-use-based conservation strategies. In the context of contemporary sustainable development paradigms, it is imperative to integrate environmental, social, and economic considerations in a balanced manner. The Kineros (Kinematic Runoff and Erosion) model offers a sophisticated simulation of the relationship between land cover and surface runoff within a hydrological system. Conversely, the MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) model is widely utilized to estimate soil erosion based on land characteristics, precipitation, topography, soil type, and existing conservation practices. This paper aims to evaluate the respective strengths of the Kineros and MUSLE models and to explore their potential integration to generate robust, environmentally grounded conservation recommendations. Employing a qualitative literature review of two key journals, supported by relevant scholarly sources, the study underscores the urgency of enhancing spatial accuracy in watershed management. The findings advocate for a multidisciplinary approach—combining spatial analytics, technocratic modeling, and economic instruments—to support more effective policies for protecting strategic water resource areas and achieving sustainable watershed governance.*

**Keywords:** Kineros, Musle, Surface Runoff, Erosion

**How to Cite:** Andi Setyo Pambudi (2025). Pencegahan Erosi melalui Optimalisasi Model Kineros dan Musle dalam Skala Daerah Aliran Sungai . *Journal Transformation of Mandalika*, E-ISSN: 2745-5882, P-ISSN: 2962-2956 , doi: <https://doi.org/10.36312/jtm.v6i8.5368>.



<https://doi.org/10.36312/jtm.v6i8.5368>.

Copyright©2025, Author (s)

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



## PENDAHULUAN

Daerah tangkapan air atau *catchment area* merupakan satuan hidrologis yang memiliki peran fundamental dalam menjamin keberlanjutan sumber daya air sebagai pilar

utama pembangunan jangka panjang. Sebagai suatu ekosistem yang krusial, daerah ini menjalankan fungsi regulatif terhadap siklus hidrologi, menekan laju erosi tanah, serta menjaga kualitas air yang dibutuhkan untuk berbagai keperluan seperti konsumsi rumah tangga, irigasi pertanian, dan kegiatan industri (Wurbs & James, 2002). Namun demikian, tekanan aktivitas manusia seperti deforestasi, ekspansi wilayah perkotaan tanpa perencanaan yang matang, serta praktik pertanian intensif telah menyebabkan degradasi kawasan tangkapan air. Dampak dari degradasi tersebut meliputi menurunnya kapasitas daya dukung lingkungan, meningkatnya risiko banjir, serta kurangnya ketersediaan air bersih (Falkenmark & Rockström, 2004). Oleh karena itu, pelindungan terhadap daerah tangkapan air perlu diposisikan sebagai prioritas strategis dalam kebijakan pembangunan berkelanjutan guna memastikan bahwa fungsi ekologis tetap terjaga dan mampu memenuhi kebutuhan generasi masa kini tanpa mengabaikan hak generasi mendatang (United Nations, 2015). Upaya pelindungan tersebut mencakup kegiatan reboisasi, perencanaan tata guna lahan berbasis ekosistem, serta penguatan instrumen regulasi guna meminimalkan dampak negatif aktivitas manusia terhadap keberlanjutan kawasan tangkapan air (Bruijnzeel, 2004).

Degradasi Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan tantangan strategis dalam pengelolaan sumber daya air, terutama di negara berkembang seperti Indonesia. Sebagai satuan wilayah hidrologi, DAS memiliki fungsi ekologis vital dalam menjaga kelestarian siklus air, mempertahankan kualitas sumber air, serta mereduksi potensi erosi dan banjir yang dapat mengancam kehidupan manusia dan produktivitas lahan. Namun, tekanan pembangunan yang tidak terkendali seperti urbanisasi pesat, deforestasi, dan pertanian intensif tanpa konservasi telah memicu kerusakan sistemik pada ekosistem DAS. Studi kasus di DAS Brantas menunjukkan bahwa alih fungsi lahan dari hutan menjadi permukiman dan infrastruktur secara signifikan meningkatkan limpasan permukaan dan laju erosi, sehingga mengganggu ketersediaan dan kualitas air di kawasan hilir (Bisri et al., 2017).

Fenomena ini menunjukkan urgensi integrasi prinsip pembangunan berkelanjutan dalam perencanaan dan pengelolaan DAS. Pembangunan yang hanya menekankan dimensi ekonomi tanpa memperhatikan aspek sosial dan lingkungan justru memperbesar risiko kerusakan sumber daya alam jangka panjang. Oleh karena itu, pendekatan integratif yang mengedepankan keseimbangan antara efisiensi ekonomi, keberlanjutan lingkungan, dan keadilan sosial sangat diperlukan untuk memastikan bahwa DAS tetap produktif dan resilien dalam mendukung kehidupan masyarakat lintas generasi.

Perlindungan *catchment area* atau daerah tangkapan air yang erat kaitannya dengan pola penggunaan lahan merupakan isu strategis yang layak dikaji secara ilmiah, terutama dalam kaitannya dengan keberlanjutan lingkungan dan daya dukung ekosistem. Fenomena meningkatnya frekuensi bencana hidrometeorologi seperti banjir, kekeringan, dan tanah longsor, serta ancaman krisis air di berbagai wilayah, mencerminkan bahwa pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) masih jauh dari optimal. Indikasinya tampak dari terus bertambahnya luas lahan kritis dan semakin kurangnya daerah resapan air yang berfungsi sebagai penyangga sistem hidrologi. Kondisi ini diperparah oleh kompleksitas persoalan yang muncul akibat interaksi antara aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan yang tumpang tindih dengan berbagai regulasi sektoral (Pambudi, 2025; GoI, 2012).

Secara hidrologis, perubahan penggunaan lahan di wilayah DAS secara langsung mempengaruhi besarnya limpasan permukaan dan potensi erosi. Oleh karena itu, berbagai model hidrologi telah dikembangkan untuk memprediksi dampak-dampak tersebut dan memberikan rekomendasi konservasi yang lebih tepat. Dalam kerangka pembangunan berkelanjutan, perlindungan DAS menjadi sangat penting karena wilayah ini menopang kebutuhan lintas sektor—dari ketersediaan air bersih hingga mitigasi bencana. Namun, efektivitas konservasi sering kali terhambat oleh keterbatasan dalam pemetaan wilayah prioritas dan pendekatan yang terlalu teknokratis. Diperlukan strategi yang lebih inovatif dan

integratif, yang memadukan analisis kuantitatif, spasial, dan multidisiplin, untuk mewujudkan pengelolaan DAS yang lebih adaptif, holistik, dan berkelanjutan.

Indonesia adalah negara yang memiliki masa musim hujan lebih dari enam bulan dengan curah hujan yang cukup tinggi (Ferijal *et al.*, 2020; Hamada *et al.*, 2002). Kondisi alam seperti ini menjadi dasar dalam mengelola sebuah kawasan. Perubahan penggunaan lahan akan menyebabkan curah hujan tidak bisa meresap lagi ke tanah pada saat musim hujan sehingga menyebabkan tingginya limpasan permukaan yang menyebabkan genangan. Permasalahan ini mempengaruhi upaya konservasi yang dilakukan jika tidak dilakukan upaya prediksi yang memadai, baik dalam kaitannya dengan erosi, sedimentasi maupun *run-off*.

Untuk wilayah perkotaan, isu krisis air akan menjadi kenyataan, apabila upaya pengelolaan sumberdaya air secara terprogram, terpadu dan berkelanjutan, tidak dilakukan secara serius (Uniyal *et al.*, 2020; GoI, 2019; Sivakumar, 2011). Perubahan penggunaan lahan dari daerah yang dulunya daerah resapan air potensial menjadi daerah yang bersifat kedap air dan hilangnya mata air menyebabkan berkurangnya pasokan air. Dampak yang terjadi adalah meningkatnya limpasan permukaan (*surface runoff*), genangan atau banjir ketika musim hujan serta berkurangnya ketersediaan air dimusim kemarau.

Perlu ada pengertian bagi masyarakat, bahwa terdapat hubungan sangat strategis antara pembangunan wilayah dan perencanaan daerah strategis perlindungan daerah penyangganya. Penataan ruang yang tepat akan mendorong optimalisasi pembangunan wilayah yang menyeimbangkan kebutuhan sosial, ekonomi dan lingkungan (Zhu *et al.*, 2022; Pambudi & Sitorus, 2021). Kaidah-kaidah konservasi hulu sumber air dan pembangunan wilayah harus terus disebarluaskan. Informasi kondisi daerah strategis harus dituangkan kedalam strategi pembangunan secara menyeluruh dalam target waktu yang tertentu pula.

Jurnal “*Application of the Kineros Model for Predicting the Effect Of Land Use on the Surface Run-Off, Case Study in Brantas Sub-Watershed, Klojen District, Malang City, East Java Province of Indonesia*”, ditulis oleh Bisri, *et al.* (2017). Tujuan penelitian Bisri *et al.* adalah untuk membahas kaitan antara perlindungan daerah resapan yang berpengaruh pada keberlangsungan kehidupan dan ekonomi sebuah wilayah melalui prediksi atau pendugaan serta identifikasi gambaran distribusi limpasan permukaan. Pemetaan daerah perlindungan ekosistem sumber air diharapkan akan bermanfaat untuk mendukung *supply* air di perkotaan yang menjadi tujuan di hilirnya sekaligus penentuan kebijakan pencegahan banjir. Penggunaan model Kineros dalam jurnal yang ditulis Bisri *et al.* menarik untuk dikembangkan ketika dikaitkan dengan analisis erosi pada penelitian lain. Model Kineros yang dikembangkan para ahli dapat menilai keterkaitan antara penggunaan lahan dan limpasan permukaan pada suatu wilayah hidrologi. Pada sisi lain, model MUSLE juga digunakan para peneliti untuk memprediksi laju erosi sebagai masukan arahan konservasi pada skala DAS dengan memperhatikan faktor lahan, hujan, faktor lahan, tindakan konservasi eksisting, jenis tanah, serta kemiringan lereng. Penilaian sisi positif dari model Kineros dan MUSLE ditinjau dari aspek hidrologi DAS menjadi menarik ketika diulas dalam konteks kombinasi dari sisi positif. Hal ini untuk menghasilkan rekomendasi terbaik konservasi berwawasan lingkungan di masa depan.

Penelitian ini ditujukan untuk melakukan evaluasi kritis terhadap keunggulan dan potensi integratif dari model Kineros (*Kinematic Runoff and Erosion Model*) dan MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) dalam konteks analisis hidrologi pada skala Daerah Aliran Sungai (DAS). Fokus utama kajian ini adalah untuk memahami dampak perubahan tata guna lahan terhadap dinamika limpasan permukaan dan tingkat erosi, serta bagaimana pemanfaatan gabungan kedua model tersebut dapat memberikan dasar ilmiah bagi penyusunan strategi konservasi yang ramah lingkungan dan berbasis data. Melalui pendekatan kualitatif berbasis studi literatur, penelitian ini tidak hanya menganalisis aspek

teknis dari masing-masing model, tetapi juga mengeksplorasi integrasi pendekatan spasial dan teknokratis guna memperkuat efektivitas kebijakan perlindungan sumber daya air.

Urgensi penelitian ini terletak pada semakin tingginya tekanan terhadap ekosistem DAS akibat pembangunan yang tidak terkendali, yang berdampak langsung pada degradasi lahan, penurunan kualitas air, serta peningkatan risiko bencana hidrometeorologis. Dalam konteks tersebut, kebutuhan akan pendekatan analisis yang komprehensif dan adaptif menjadi sangat penting.

Secara teoretis, studi ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan wacana ilmiah tentang pemodelan hidrologi yang multidisipliner dengan menekankan pentingnya integrasi spasial. Sementara secara praktis, temuan dari penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh para pembuat kebijakan dan perencana wilayah untuk menentukan lokasi prioritas konservasi secara efisien, baik dari segi waktu, biaya, maupun tenaga, serta mendukung pembangunan berkelanjutan yang seimbang secara sosial, ekonomi, dan lingkungan.

## METODE

Metodologi penelitian dalam artikel ini menggunakan pendekatan kualitatif yang berfokus pada studi literatur. Studi literatur dipilih karena memungkinkan penulis untuk menggali informasi mendalam dari berbagai sumber primer dan sekunder yang relevan. Metode ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan keefektifan model Kineros dan MUSLE dalam konteks hidrologi DAS. Studi literatur memungkinkan peneliti untuk memahami konsep, teori, dan hasil empiris sebelumnya yang mendukung pengembangan penelitian ini (Creswell, 2014)

Pengaruh perubahan penggunaan lahan terhadap limpasan permukaan dapat dianalisis dengan menggunakan Kineros model (limpasan kinetik dan model erosi). Model ini merupakan bagian dari program AGWA yang merupakan pengembangan dari perangkat lunak ESRI ArcView *Geographical Information System (GIS)* yaitu sebagai alat untuk menganalisis fenomena hidrologi dalam penelitian tentang DAS yang mensimulasikan proses infiltrasi, kedalaman limpasan dan erosi di daerah aliran sungai. Jurnal “*Application of the Kineros Model for Predicting the Effect of Land Use on the Surface Run-Off, Case Study in Brantas Sub-Watershed, Klojen District, Malang City, East Java Province of Indonesia*”, ditulis oleh Bisri, *et al.* (2017) dinilai dapat dioptimalkan dengan temuan dalam jurnal lain. Dalam rangka optimalisasi Kineros model, dilakukan *literature review* melalui ulasan dengan jurnal sejenis.

Analisis data dilakukan dengan pendekatan deskriptif-kritis, yaitu mengevaluasi kelebihan, kekurangan, dan potensi integrasi dari kedua model tersebut. Analisis ini tidak hanya mencakup aspek teknokratis seperti akurasi model dan parameter yang digunakan, tetapi juga mempertimbangkan relevansi sosial, ekonomi, dan lingkungan. Pendekatan ini mendukung konsep metodologi penelitian berbasis triangulasi data, yang meningkatkan validitas dan reliabilitas temuan (Patton, 2002).

Tujuan pengulas adalah memahami bagaimana konsep pendekatan yang ditunjukkan dalam jurnal dikaitkan dengan jurnal pengulas yang berjudul “Strategi Konservasi Untuk Mengurangi Erosi Hulu Daerah Aliran Sungai Brantas, Jawa Timur” (Pambudi *et al.*, 2023). Pengulas memilih jurnal ini karena 2 hal yaitu: 1) Kesamaan lokasi dan karakteristik wilayah yaitu di DAS Brantas; dan 2) Menggunakan model analisis pendugaan erosi serta analisis spasial *Geographical Information System (GIS)*. Metode yang digunakan dalam analisis adalah kualitatif melalui literature review yang mengulas 2 jurnal penting terkait model Kineros dan MUSLE yang diperkuat dengan jurnal-jurnal lain yang relevan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penggunaan lahan yang tidak terkelola dengan baik, terutama dalam konteks penebangan hutan, pembangunan infrastruktur fisik yang masif dan aktivitas pertanian yang intensif, dapat meningkatkan risiko erosi dan limpasan permukaan (Zhao *et al.*, 2022). Kedua proses ini dapat berinteraksi secara negatif, di mana erosi meningkatkan limpasan permukaan dan limpasan permukaan mempercepat erosi. Dalam praktiknya, penting untuk mengadopsi praktik optimalisasi penggunaan lahan yang berkelanjutan, mengelola aspek sosial dan ekonomi secara bijaksana, serta menjaga vegetasi pelindung untuk mengurangi dampak negatif erosi dan limpasan permukaan.

Erosi yang signifikan dapat memiliki dampak yang merugikan pada daerah aliran sungai (DAS). Halim (2014) menyatakan bahwa fungsi Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah sebagai areal penangkapan air (*catchment area*), penyimpan air (*water storage*) dan penyalur air (*distribution water*). Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah ekosistem alam yang secara hidrologis melibatkan wilayah pemberi air (daerah hulu) dan wilayah penerima air (daerah hilir) yang saling berhubungan dan mempengaruhi (Pambudi, 2024; GoI, 2014). Erosi pada skala DAS mempengaruhi tingkat pencemaran air, penurunan kualitas air, perubahan kontur sungai, peningkatan risiko banjir, dan kerusakan ekosistem sungai. Untuk menjaga kesehatan dan keberlanjutan daerah aliran sungai, penting untuk mengelola erosi dengan baik melalui praktik pertanian yang berkelanjutan, pengelolaan lahan yang tepat, dan perlindungan vegetasi pelindung di tepian sungai.

Meningkatnya limpasan permukaan (*surface runoff*), serta kurangnya ketersediaan air di kota-kota besar menunjukkan bagaimana keterkaitan hulu hilir dalam siklus air sedikit terlepas dari perhatian para pengambil kebijakan. Penyediaan air menjadi faktor kunci bagaimana kota-kota dapat tumbuh baik secara ekonomi dan menunjang keberlangsungan kehidupan lainnya. Rendahnya tingkat perlindungan formal terhadap daerah sumber air strategis sangat memprihatinkan padahal hal ini sangat penting bagi penyediaan air. Tekanan terhadap kawasan lindung sumber air dan dampaknya menunjukkan besarnya nilai untuk masyarakat, baik di lingkungan sekitarnya dan secara umum (Cumming, 2016; Watson *et al.*, 2014).

Studi ini menemukan bahwa perkembangan wilayah Kota Malang menuntut perubahan penggunaan lahan terbuka menjad lahan terbangun sehingga sering terjadi limpasan di wilayah ini. Limpasan hujan adalah masalah yang disebabkan oleh perubahan penggunaan lahan yang tidak diatur dengan baik (Arsyad, 2000; Asdak 2001). Tanah yang dibangun memiliki daya serap air yang lebih sedikit dari tanah yang dibuka. Jurnal menyampaikan bahwa Kecamatan Klojen di DAS Brantas adalah sebagai wilayah yang lebih sering terjadi limpasan, namun proses pengukuran limpasan secara langsung membutuhkan biaya, waktu, dan energi yang tinggi. Oleh karena itu, seringkali sulit untuk mendapatkan data limpasan karena untuk proses pengukuran yang sangat berat. Diperlukan simulasi limpasan yang disebabkan oleh perubahan penggunaan lahan dengan menetapkan model spasial *run-off* untuk membantu membuat keputusan dalam melakukan upaya untuk mengendalikan limpasan yang terjadi. Penelitian ini dimaksudkan untuk menganalisis limpasan permukaan dan distribusi dilokasi studi pada tahun 2000, 2005 dan 2010; kemudian mengevaluasi kesesuaian model Kineros untuk menganalisis limpasan permukaan di lokasi studi.

Pertumbuhan dan perkembangan Kota Malang membuat beberapa perubahan tata ruang. Penggunaan lahan terutama dari pertanian menjadi fungsi non-pertanian, daerah tangkapan air menjadi tempat tinggal daerah, masalah sempadan sungai menjadi pemukiman. Pada akhirnya, bertambahnya area tertutup menyebabkan resapan air semakin menipis. Kota Malang terdiri dari beberapa kabupaten. Lokasi studi yang dipilih adalah kabupaten Klojen dan memiliki pertumbuhan populasi yang cepat yang berbanding lurus dengan jarang

ditemukan daerah resapan air yang baik sehingga setiap terjadi hujan selalu terjadi limpasan permukaan yang tinggi.

Secara umum, masalah di kabupaten Klojen adalah sebagai berikut: 1) ada perubahan penggunaan lahan dari daerah tangkapan air area menjadi area perumahan; 2) semakin banyak daerah hunian yang menyebabkan limpasan yang tinggi; dan 3) diperlukan alat analisis untuk mensimulasikan kedalaman dan luas genangan karena intensitas curah hujan dan perubahan penggunaan lahan.

Penelitian ini menemukan bahwa ada nilai kedalaman permukaan limpasan masih diijinkan. Analisis dapat digunakan untuk mengevaluasi referensi penggunaan lahan di lokasi studi. Lokasi yang masuk sebagai bagian Sub DAS Brantas ini secara fungsional telah diubah signifikan dari kondisi idealnya menyebabkan meningkatnya kedalaman limpasan dari tahun ke tahun tahun. Bisri et al. (2017) memanfaatkan model Kineros dalam analisisnya. Model Kineros adalah model hidrologi yang digunakan untuk memprediksi aliran permukaan dan limpasan permukaan di daerah urban. Model ini menggabungkan informasi tentang pola hujan, jenis tanah, topografi, tutupan lahan, dan sistem drainase untuk memperkirakan aliran permukaan dan limpasan permukaan di suatu daerah (Gal et al., 2017)

Hasil simulasi model Kineros menunjukkan bahwa nilai kedalaman limpasan permukaan berbanding lurus dengan perubahan penggunaan lahan. Oleh karena itu, sangat diperlukan alternatif pengendalian untuk mengurangi limpasan di pusat kota Malang. Alternatif kontrol *run-off* yang disarankan Bisri et al. (2017), dalam jurnal ini adalah sebagai berikut: 1) merehabilitasi saluran dengan membangun saluran yang melebar, terutama daerah sekitar daerah kedalaman limpasan tinggi; 2) daerah yang belum memiliki saluran drainase, akan dibuat saluran baru; 3) diperlukan desain saluran masuk agar mudah curah hujan masuk ke saluran drainase; 4) diperlukan operasi dan pemeliharaan sistem drainase secara berkala.

Tidak ada perbedaan yang signifikan antara hasil Model Kineros dan limpasan permukaan maksimum di lapangan, dapat dikatakan relatif sama terutama untuk periode *return period* 2 tahun dan 5 tahun dengan kesalahan relatif 9,09%. Model ini dapat digunakan di Indonesia sehingga cukup relevan sebagai dasar penyusunan kebijakan konservasi DAS pada jangka menengah 5 tahunan. Dalam skema pelestarian lingkungan sebagaimana UU No 26/2007 tentang Penataan Ruang, luas hutan minimum 30% dari luas daerah aliran sungai sebaiknya dipertimbangkan. Model Kineros mampu memetakan daerah prioritas pelaksanaan kebijakan rehabilitasi lahan yang lebih tepat berdasarkan kedalaman *run-off* sehingga hasil kebijakan dapat lebih efektif dilakukan.

Semakin tua usia kota maka semakin kompleks dan semakin banyak kebutuhan yang harus disediakan kota tersebut. Hal yang paling mendasar adalah pemenuhan sumber daya alam seperti ketersedian air, energi, dan udara yang bersih. Fenomena tren penurunan kualitas lingkungan melatar belakangi konsep “*green urban water security model*” yaitu merupakan konsep kota yang sangat memperhatikan keberlanjutan lingkungan. Perencanaan tata ruang perkotaan sebaiknya dimulai dengan mengidentifikasi kawasan-kawasan yang secara alami harus diselamatkan (kawasan lindung) untuk menjamin kelestarian lingkungan, dan kawasan-kawasan yang secara alami rentan terhadap bencana di bagian hulu (*prone to natural hazards*) seperti gempa, longsor, banjir maupun bencana alam lainnya. Kawasan-kawasan inilah yang harus kita kembangkan sebagai ruang terbuka, baik hijau maupun non-hijau. Dengan demikian perencanaan tata ruang harus dimulai dengan pertanyaan: “dimana kita tidak boleh membangun?”

Kelebihan atau sisi positif dari jurnal yang ditulis Bisri et al. ini adalah sudah memunculkan konsep ruang yang tidak terbatas daerah administrasi dimana ada keterkaitan daerah penyanga diluar Kecamatan Klojen yang juga menentukan laju limpasan permukaan (*run-off*) dalam cakupan sub DAS Brantas meskipun tidak detail diulas. Sisi positif lain jurnal ini adalah bahwa model yang digunakan yaitu Kineros sudah dikalibrasi dengan hasil

perhitungan lapangan yang ditandai yaitu untuk periode *return period* 2 tahun dan 5 tahun dengan kesalahan relatif 9,09%. Model ini dapat digunakan di Indonesia sehingga cukup relevan sebagai dasar penyusunan kebijakan konservasi skala DAS pada jangka menengah 5 tahunan. Jurnal ini telah menunjukkan bahwa perlindungan ekosistem alam memberi dampak yang lebih baik daripada pembangunan infrastruktur, khususnya dalam kaitannya dengan mencegah genangan akibat limpasan permukaan yang tinggi. Jurnal ini akan memperkuat kebutuhan analisis prediksi erosi skala DAS karena kemampuannya menetapkan area strategis intervensi kebijakan sehingga memungkinkan para pengambil kebijakan maupun masyarakat melakukan program/kegiatan pemulihhan dengan lebih efektif dan terfokus. Ketepatan menentukan lokasi kebijakan berdampak pada efisiensi biaya, waktu dan tenaga.

Kelemahan atau sisi negatif dari jurnal ini salah satunya adalah hanya memperhitungkan perhitungan teknis secara hidrologi dan tidak memperhitungkan aspek lain seperti faktor tekanan penduduk terhadap lahan, analisis perilaku masyarakat serta tingkat bahaya erosi. Jurnal ini juga masih belum komprehensif karena masih fokus pada satu aspek, dan belum menyentuh aspek sosial dan ekonomi. Cakupan wilayah jurnal juga masih sempit dan belum di-*overlay* dengan hasil tingkat bahaya erosi agar hasilnya lebih optimal.

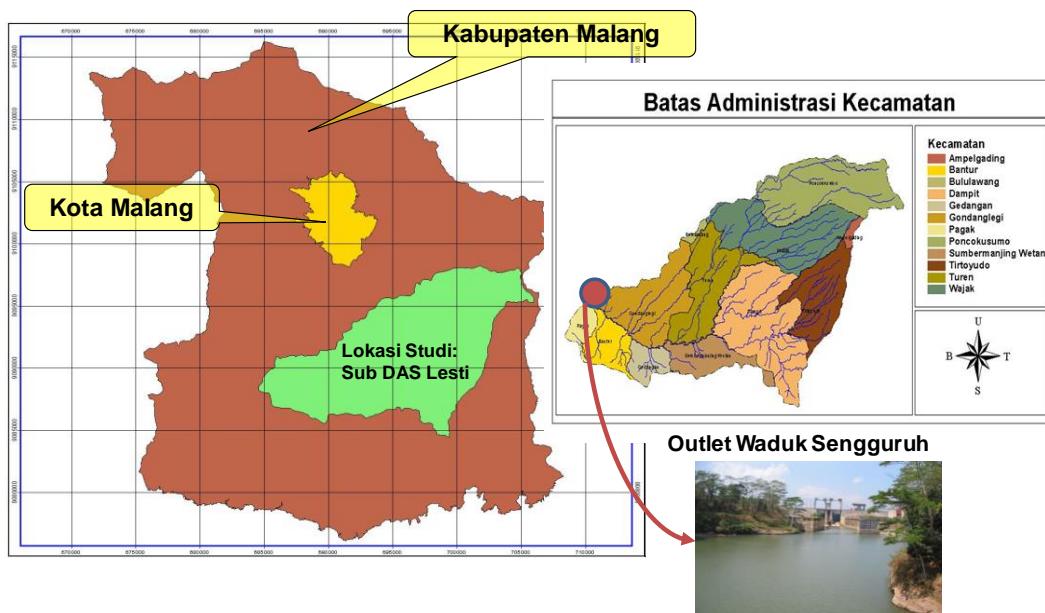
Model Kineros dapat membantu dalam memperkirakan dampak perubahan lahan limpasan permukaan. Dengan memasukkan data tentang tutupan lahan yang berbeda setelah perubahan tersebut, model dapat memberikan perkiraan tentang bagaimana perubahan tersebut akan mempengaruhi aliran permukaan dan limpasan permukaan di suatu daerah. Hal ini dapat membantu dalam perencanaan tata guna lahan yang lebih baik dan pengelolaan air yang lebih efektif di daerah urban. Penelitian dalam jurnal ini masih fokus pada penyediaan data peta daerah dengan rentan *run-off*, namun strategi setelah data ini didapatkan belum secara jelas diulas lebih dalam. Pengulas memandang bahwa dalam rangka menjamin keseimbangan alam dan ekonomi masyarakat, maka kombinasi pendekatan yang mampu menjembatani dua kepentingan tersebut harus menjadi perhatian.

Konsep tata ruang kota tidak bisa dipisahkan dengan pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) yang memperhatikan keseimbangan ekosistem hulu dan hilir dalam batas hidrologis yang sama (Pambudi *et al.*, 2023; Asdak 2010, Arsyad 2006, Suripin 2004). Pengelolaan DAS berkaitan erat dengan pendekatan ekosistem dan regulasi hidrologi. Regulasi hidrologi merupakan layanan ekosistem yang penting, dan mudah dipengaruhi oleh gangguan manusia. Banyak studi telah dilakukan mengenai dampak aktivitas manusia terhadap rezim dan pengaturan kapasitas dengan satu faktor lingkungan (Li *et al.*, 2018). Ketahanan air dengan kombinasi pendekatan spasial, konsep DAS, ekonomi dan sosial akan mewujudkan sebuah konsep *green urban water security model* sebagai harapan dari hasil penelitian Bisri *et al.*, (2017) tersebut.

Dalam rangka optimalisasi Kineros model, dilakukan literature review melalui ulasan dengan jurnal sejenis. Tujuan pengulas adalah memahami bagaimana konsep pendekatan yang ditunjukkan dalam jurnal dikaitkan dengan jurnal pengulas yang berjudul “*Analysis of Recent Erosion Hazard Levels and Conservation Policy Recommendations for Lesti Subwatershed, Upper Brantas Watershed*”. Pengulas memilih jurnal ini karena 2 hal yaitu: 1) Kesamaan lokasi dan karakteristik wilayah yaitu di DAS Brantas; dan 2) Menggunakan model analisis pendugaan erosi serta analisis spasial *Geographical Information System (GIS)*. Penelitian adalah penelitian deskriptif kuantitatif dengan menggunakan pendekatan ekologi. Penelitian ini menggambarkan, menganalisis dan memberi informasi tentang keadaan yang ada di lapangan yang berhubungan dengan erosi yang terjadi pada lahan di sub DAS Lesti sampai dengan sedimentasi yang masuk ke *outlet* di Waduk Sengguruh, Kabupaten Malang. Penelitian ini mendeskripsikan keterkaitan antara aktivitas manusia dengan erosi yang terjadi di sub DAS Lesti sebagai salah satu hulu DAS Brantas.

Berdasarkan pembahasan sebelumnya, metode penelitian menggunakan metode gabungan (*mixed methods*). Arah penelitian ini adalah berusaha mensimulasikan laju erosi di kawasan sub DAS Lesti yang mempertimbangkan aspek sosial dan ekonomi (tekanan penduduk) dan lingkungan (daya dukung lahan). Metode kuantitatif laju erosi dilakukan dengan metode perhitungan *Modify Universal Soil Loss Equation (MUSLE)* yang didukung dengan *tools* Sistem Informasi Geografis (Djoukbala *et al.*, 2018). Metode kualitatif dilaksanakan dengan kuisioner dan wawancara di kawasan sub DAS Lesti untuk mengetahui pengetahuan, sikap dan perilaku masyarakat terhadap erosi dan dampak yang ditimbulkannya.

Dalam melaksanakan penelitian, penulis membatasi lokasi penelitian pada sub DAS Lesti sebagai salah satu hulu DAS Brantas. Secara administratif sub DAS Lesti terletak pada Kabupaten Malang dengan luas seluruh sub DAS adalah 64.741 ha. Lokasi penelitian meliputi 12 wilayah kecamatan yaitu kecamatan Poncokusumo, Ampelgading, Wajak, Tirtoyudo, Turen, Dampit, Sumbermanjing, Bululawang, Gondanglegi, Gedangan, Bantur dan Pagak. Batasan wilayah penelitian dimulai dari hulu Sungai Lesti di Kecamatan Poncokusumo sampai *outlet* Waduk Sengguruh.



Gambar 1. Lokasi Studi

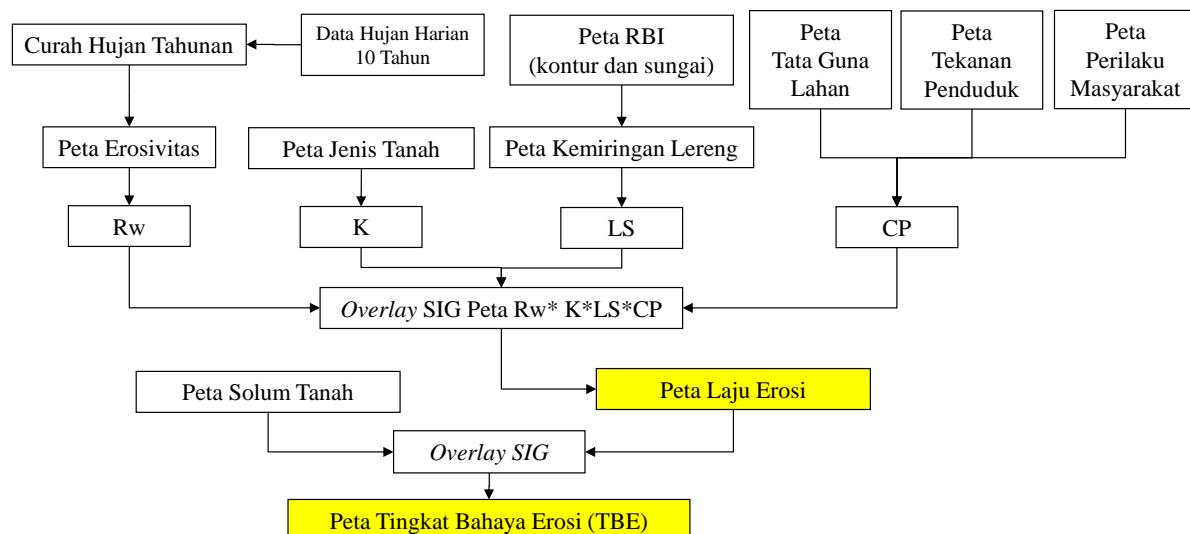
Sumber: Pambudi *et al.*, 2023

Secara umum terdapat banyak metode prediksi erosi yang telah dikembangkan para ilmuwan, seperti USLE, MUSLE, RUSLE, WEPP, GUEST, ANSWER, AGNPS dan lain lain. Di Indonesia, model prediksi erosi yang paling sering digunakan adalah metode USLE dan turunannya seperti MUSLE dan RUSLE. Sebagai contoh metode MUSLE yang memenuhi persyaratan pemodelan yang bersifat universal serta jumlah masukan atau parameter yang dibutuhkan lebih sedikit dibandingkan metode lain yang bersifat kompleks. Prediksi laju erosi rata-rata suatu lahan pada suatu kemiringan dengan pola hujan tertentu untuk setiap macam jenis tanah dan penerapan pengelolaan lahan setidaknya harus memperhatikan faktor erosivitas hujan, erodibilitas tanah, kemiringan lereng, panjang lereng, penutup tanah, dan tindakan konservasi. Perubahan lahan limpasan permukaan dapat memiliki pengaruh yang signifikan pada hidrologi suatu daerah (Guo *et al.*, 2019).

Perhitungan laju erosi lahan dihitung untuk setiap unit lahan dimana untuk mendapatkan unit lahan digunakan alat bantu Sistem Informasi Geografis (SIG), yaitu dengan melakukan *overlay* peta kemiringan lereng (nilai LS), peta jenis tanah (nilai K), dan peta tata

guna lahan/penggunaan lahan (nilai CP). Faktor tekanan penduduk terhadap lahan (TP) dan faktor perilaku masyarakat (positif atau negatif) berpengaruh pada penentuan nilai CP sebagai bagian dari perhitungan erosi.

Analisis laju erosi menggunakan peta guna lahan tahun 2012 dan 2017 sehingga dapat diketahui adanya pengaruh perubahan guna lahan terhadap besarnya laju erosi. Setelah dilakukan analisis laju erosi, dilanjutkan analisis Tingkat Bahaya Erosi (TBE) dengan meng-*overlay*-kan peta erosi dengan peta kedalaman solum tanah. Secara sederhana, alur dalam mencari Peta TBE dengan bantuan *tools* SIG adalah sebagaimana Gambar 2.



Gambar 2. Bagan Alir Perhitungan Area Tingkat Bahaya Erosi

Sumber: Pambudi *et al.*, 2023

Setelah analisis TBE, dilakukan analisis monitoring dan evaluasi DAS dikaitkan dengan tekanan penduduk terhadap lahan yang kemudian dilakukan penyusunan arahan konservasi berwawasan lingkungan yang sesuai dengan kondisi sub DAS Lesti. Model Kineros dalam jurnal yang ditulis oleh Bisri *et al.*, (2017) yang juga berbasis Sistem Informasi Geografis (GIS) dapat digunakan untuk mendukung penentuan lokasi prioritas konservasi melalui *overlay* dengan Peta Tingkat Bahaya Erosi (TBE) yang dilakukan penulis. Erosi, dan limpasan permukaan adalah 2 hal yang sangat terkait dalam menentukan pengelolaan DAS yang berkelanjutan. Limpasan permukaan (*run-off*) terjadi ketika jumlah curah hujan melampaui laju infiltrasi. Setelah laju infiltrasi terpenuhi, air mulai mengisi cekungan atau depresi pada permukaan tanah. Setelah pengisian selesai maka air akan mengalir dengan bebas di permukaan tanah.

Kineros (*Kinematic Runoff and Erosion Model*) merupakan model yang berorientasi pada kejadian, yang dipakai untuk menjelaskan proses intersepsi, infiltrasi, limpasan permukaan, dan erosi untuk DAS. Model ini dirancang untuk mensimulasikan proses infiltrasi, kedalaman limpasan permukaan dan erosi yang terjadi pada suatu DAS. Dasar pemikiran dari model Kineros adalah, apabila suatu lahan menerima hujan dengan intensitas tertentu, maka air yang jatuh ke permukaan tanah sebagian akan terinfiltasi ke dalam tanah sampai batas kejemuhan tertentu, sedangkan sebagian lagi akan melimpas di atas permukaan tanah atau menggenang, keadaan ini tergantung dari kemampuan tanah dalam menyerap air berdasarkan berbagai faktor. Hasil model Kineros adalah tampilan berupa peta zoning dari parameter yang dikehendaki yaitu salah satunya infiltrasi (mm) dan limpasan (mm).

Dengan pemetaan identifikasi yang lebih tepat, maka kebijakan perlindungan dan rehabilitasi hutan diharapkan lebih efektif dan efisien. Oleh karena itu, model pemetaan daerah strategis prioritas konservasi DAS dalam bentuk model spasial sangat bermanfaat

untuk dijadikan acuan menentukan kawasan-kawasan yang saling terkait, antara “wilayah rentan erosi” dan “wilayah dengan limpasan permukaan yang dalam”. Dengan dukungan model Kineros yang ditulis oleh Bisri *et al.*, (2017), maka didapatkan bagan alir penentuan wilayah prioritas konservasi sebagaimana dijelaskan pada Gambar 3.

Kombinasi metode *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE) dan *Kinematic Runoff and Erosion Model* (Kineros) menawarkan pendekatan yang saling melengkapi dalam analisis hidrologi pada skala Daerah Aliran Sungai (DAS). MUSLE berfokus pada estimasi laju erosi tanah berdasarkan faktor erosivitas hujan, erodibilitas tanah, panjang dan kemiringan lereng, serta penutup tanah dan tindakan konservasi. Sementara itu, Kineros lebih menekankan pada simulasi limpasan permukaan dan proses hidrologi lainnya, seperti infiltrasi, intersepsi, dan genangan.

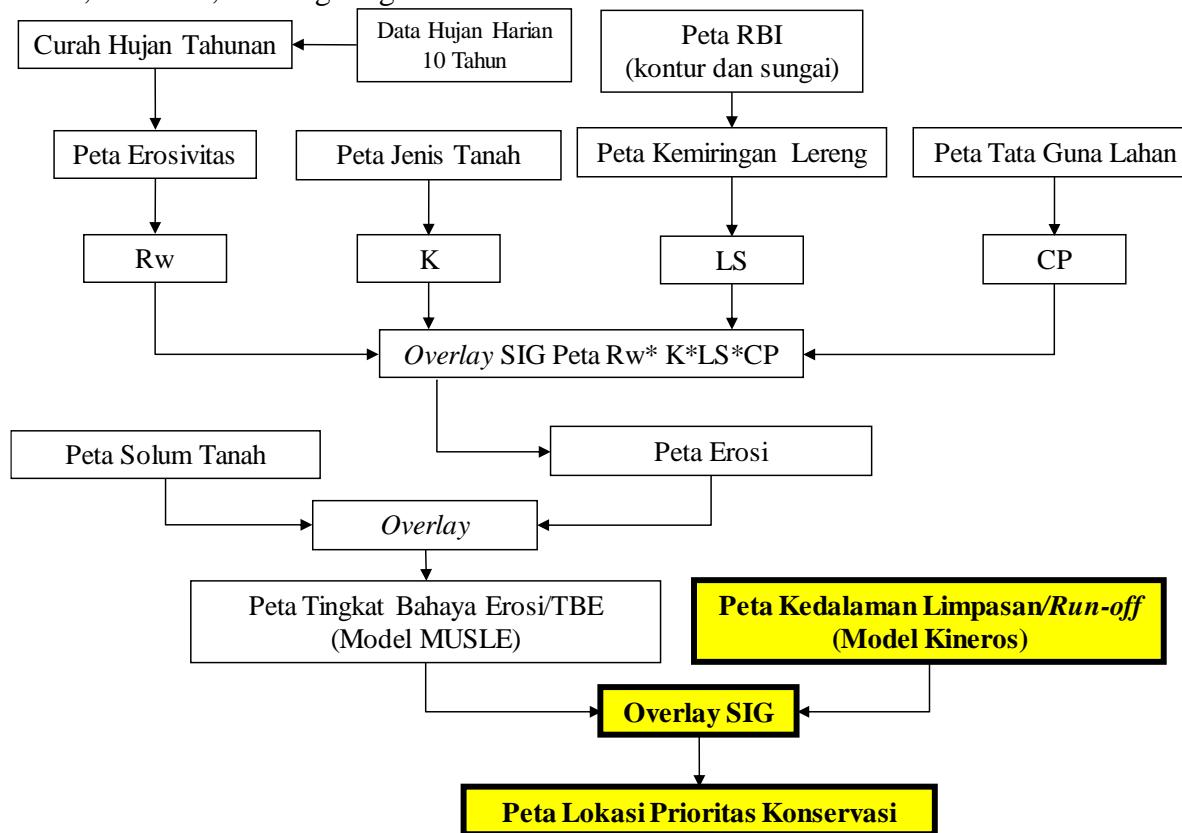
Tabel 1. Perbandingan Model Kineros dan Model MUSLE

Aspek	Model Kineros	Model MUSLE
Tujuan Utama	Simulasi limpasan permukaan dan proses hidrologi (infiltrasi, intersepsi, genangan)	Estimasi laju erosi tanah berdasarkan karakteristik lahan dan curah hujan
Jenis Model	<i>Event-based</i> (berbasis kejadian hujan tertentu)	<i>Long-term or event-based</i> (khususnya modifikasi dari USLE)
Keluaran Utama	Peta limpasan permukaan, infiltrasi, kedalaman genangan	Peta laju erosi, tingkat bahaya erosi
Kelebihan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu mensimulasikan proses hidrologi rinci secara spasial</li> <li>• Dapat digunakan untuk perencanaan sistem drainase</li> <li>• Sudah dikalibrasi dan akurat dalam prediksi <i>run-off</i> di studi kasus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menggunakan parameter yang lebih sedikit</li> <li>• Cocok untuk skala luas dengan sumber daya terbatas</li> <li>• Efektif untuk analisis tingkat bahaya erosi</li> </ul>
Kelebihan Tambahan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Output berupa peta zoning prioritas Konservasi\</li> <li>• Cocok untuk perkotaan dan kawasan intensif pembangunan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memungkinkan analisis spasial integratif dengan SIG</li> <li>• Dapat mempertimbangkan tekanan penduduk dan perilaku masyarakat</li> </ul>
Kekurangan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak memperhitungkan secara langsung tingkat bahaya erosi</li> <li>• Kurang mempertimbangkan aspek sosial dan ekonomi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak mensimulasikan dinamika limpasan permukaan secara rinci</li> <li>• Kurang presisi dalam skenario urban dengan banyak variabel hidrologis</li> </ul>
Kesesuaian Penggunaan	Perkotaan dan DAS dengan kebutuhan simulasi rinci limpasan permukaan	Pedesaan, lahan pertanian, dan wilayah konservasi berbasis erosi

Hasil dari kombinasi kedua metode ini memberikan gambaran yang lebih holistik tentang dinamika DAS. MUSLE memberikan estimasi kuantitatif terkait tingkat bahaya erosi yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi wilayah kritis yang membutuhkan intervensi konservasi. Sementara itu, Kineros, dengan basis simulasi spasial, menghasilkan peta limpasan permukaan yang dapat menunjukkan area dengan potensi genangan tinggi akibat perubahan tata guna lahan. Dalam konteks ini, hasil dari kedua metode dapat di-*overlay* menggunakan *Geographical Information System* (GIS) untuk menentukan lokasi prioritas konservasi yang lebih akurat.

Analisis integrasi kedua model menunjukkan bahwa wilayah dengan tingkat bahaya erosi tinggi sering kali beririsan dengan area limpasan permukaan yang intens. Sebagai contoh, pada sub-DAS Brantas, penggunaan kombinasi MUSLE dan Kineros mengidentifikasi bahwa perubahan tata guna lahan dari hutan menjadi pemukiman meningkatkan erosi dan limpasan permukaan secara signifikan. Kombinasi ini juga memungkinkan perhitungan biaya konservasi yang lebih efisien dengan fokus pada daerah yang paling membutuhkan intervensi. Penelitian ini menegaskan bahwa pendekatan multidisiplin yang menggabungkan metode kuantitatif (MUSLE), spasial (Kineros), dan

analisis berbasis GIS mampu menghasilkan rekomendasi konservasi yang lebih efektif dan realistik. Hal ini mendukung konsep pembangunan berkelanjutan yang seimbang antara aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan.



Gambar 3. Bagan Alir Penentuan Lokasi Prioritas Konservasi  
Sumber: Diolah dari Bisri *et al.*, (2017) dan Pambudi *et al.*, 2023

## KESIMPULAN

Penelitian ini menyoroti pentingnya penggunaan pendekatan integratif dalam pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS), khususnya melalui kombinasi dua model hidrologi, yaitu Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) dan Kinematic Runoff and Erosion Model (Kineros). Model MUSLE berfungsi untuk memperkirakan laju erosi secara kuantitatif berdasarkan parameter seperti kemiringan lereng, jenis tanah, tutupan lahan, dan curah hujan. Sementara itu, Kineros menawarkan pendekatan spasial yang memungkinkan pemetaan limpasan permukaan secara rinci. Ketika kedua model ini digabungkan, analisis yang dihasilkan menjadi lebih komprehensif dan mampu mengidentifikasi wilayah prioritas konservasi secara lebih akurat.

Dalam studi kasus sub-DAS Brantas, hasil integrasi MUSLE dan Kineros menunjukkan bahwa area dengan tingkat bahaya erosi tinggi sering kali beriris dengan zona limpasan yang signifikan. Temuan ini menjadi dasar bahwa strategi konservasi sebaiknya tidak hanya mempertimbangkan parameter teknis secara terpisah, tetapi juga memerlukan pendekatan spasial yang terintegrasi. Oleh karena itu, pemanfaatan kedua model tersebut secara simultan berpotensi besar dalam mendukung perencanaan konservasi yang lebih strategis, efisien, dan berbasis data ilmiah.

Lebih jauh lagi, penelitian ini juga menegaskan bahwa pengelolaan DAS tidak cukup dilakukan melalui pendekatan hidrologis semata, melainkan harus melibatkan dimensi sosial dan ekonomi yang relevan. Dalam hal ini, pemanfaatan teknologi seperti Sistem Informasi

Geografis (SIG) menjadi sangat krusial karena mampu menerjemahkan hasil analisis model ke dalam peta zonasi prioritas konservasi yang aplikatif bagi perumusan kebijakan. Hal ini juga ditegaskan dalam kajian jurnal Bisri et al. (2017) yang direkomendasikan untuk diadopsi dalam konteks Indonesia guna meningkatkan efektivitas pemetaan kawasan strategis perlindungan sumber daya air. Secara umum, penelitian ini menghasilkan 3 temuan utama, antara lain:

1. Area dengan erosi tinggi cenderung beririsan dengan zona limpasan ekstrem, menunjukkan keterkaitan spasial antara dua risiko utama DAS.
2. Ketepatan pemetaan lokasi prioritas sangat memengaruhi efektivitas kebijakan perlindungan sumber daya air.
3. Pengelolaan DAS yang hanya berfokus pada aspek teknis tidak cukup menjawab kompleksitas tekanan sosial dan ekonomi.

Dalam kerangka pembangunan berkelanjutan, ketepatan pemetaan lokasi intervensi menjadi sangat menentukan keberhasilan konservasi. Kombinasi pendekatan spasial, perhitungan teknokratis, serta integrasi dengan instrumen sosial dan ekonomi akan menciptakan sistem pengelolaan DAS yang seimbang dan multidimensi. Rekomendasi yang bisa diberikan antara lain:

1. Menerapkan integrasi model MUSLE dan Kineros secara simultan untuk merancang intervensi konservasi yang lebih tepat sasaran dan efisien.
2. Memperkuat kapasitas teknologi dan keterampilan SDM dalam penggunaan GIS untuk meningkatkan akurasi pemetaan konservasi.
3. Mengintegrasikan analisis sosial dan ekonomi, termasuk dampak kebijakan terhadap masyarakat dan tekanan penduduk terhadap lahan, guna memastikan konservasi mendukung kesejahteraan bersama.

Dengan demikian, hasil penelitian ini mengarahkan pada pentingnya formulasi kebijakan berbasis data yang dapat diimplementasikan secara realistik dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan dan sosial. Keberhasilan pengelolaan DAS masa depan sangat bergantung pada kemampuan mengadopsi pendekatan holistik, berbasis data, dan adaptif terhadap dinamika lingkungan yang terus berubah.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Arsyad, S. (2006). *Konservasi Tanah dan Air*. Bogor: IPB Press
2. Asdak, C. (2010). *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Edisi Kelima (Revisi). Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
3. Bisri, M., Limantara, L. M., Prasetyorini, L., & Chasanawati, D. (2017). Application of the Kineros model for predicting the effect of land use on the surface run-off Case study in Brantas sub-watershed, Klojen District, Malang City, East Java Province of Indonesia. *Journal of Water and Land Development*, 35(1), 3–9. <https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0062>
4. Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 185–228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>
5. Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Los Angeles: Sage Publications.
6. Cumming, G. S. (2016). The relevance and resilience of protected areas in the Anthropocene. *Anthropocene*, 13, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.03.003>
7. Djoukbal, O., Hasbaia, M., Benselama, O., & Mazour, M. (2018). Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0562-6>

8. Ferijal, T., Batelaan, O., & Shanafield, M. (2020). Rainy season drought severity trend analysis of the Indonesian maritime continent. *International Journal of Climatology*, 41(S1). <https://doi.org/10.1002/joc.6840>
9. Falkenmark, M., & Rockström, J. (2004). *Balancing water for humans and nature: The new approach in ecohydrology*. Stockholm: Earthscan
10. Gal, L., Grippa, M., Hiernaux, P., Pons, L., & Kergoat, L. (2017). The paradoxical evolution of runoff in the pastoral Sahel: analysis of the hydrological changes over the Agoufou watershed (Mali) using the KINEROS-2 model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9), 4591–4613. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4591-2017>
11. GoI. (2019). *Undang-undang Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air*. Jakarta: Pemerintah Indonesia (Government of Indonesia)
12. GoI. (2014). *Undang-undang Nomor 37 Tahun 2014 tentang Konservasi Tanah dan Air*. Jakarta: Pemerintah Indonesia (Government of Indonesia)
13. GoI. (2012). *Peraturan Pemerintah No. 37 Tahun 2012 tentang Pengelolaan DAS*. Jakarta: Pemerintah Indonesia (Government of Indonesia)
14. GoI. (2007). *Undang-undang Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang*. Jakarta: Pemerintah Indonesia (Government of Indonesia)
15. Guo, Y., Peng, C., Zhu, Q., Wang, M., Wang, H., Peng, S., & He, H. (2019). Modelling the impacts of climate and land use changes on soil water erosion: Model applications, limitations and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 250, 109403. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109403>
16. Hamada, J.-I., Yamanaka, M. D., Matsumoto, J., Fukao, S., Winarso, P. A., & Sribimawati, T. (2002). Spatial and Temporal Variations of the Rainy Season over Indonesia and their Link to ENSO. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80(2), 285–310. <https://doi.org/10.2151/jmsj.80.285>
17. Li, R., Zheng, H., Lv, S., Liao, W., & Lu, F. (2018). Development and evaluation of a new index to assess hydrologic regulating service at sub-watershed scale. *Ecological Indicators*, 86, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.023>
18. Pambudi, A.S. (2025). Policy and Regulatory Implementation in Water Resources Conservation Development in Indonesia: A Critical Analysis. *Protection: Journal Of Land And Environmental Law*, 3 (3), 103-130. <https://doi.org/10.38142/pjlel.v3i3>
19. Pambudi, A.S. (2024). Refleksi Dua Dekade Pembangunan Konservasi Sumber Daya Air Menuju Visi 2025-2045. *Jurnal Pembangunan Nagari*, 9(2), 77-91. <https://doi.org/10.30559/jpn.v9i2.464>
20. Pambudi, A. S., Junaidi, R., & Pramujio, B. (2023). Strategi Konservasi Untuk Mengurangi Erosi Hulu Daerah Aliran Sungai Brantas, Jawa Timur. *Jurnal Kebijakan Pembangunan Daerah*, 7(2), 1-19. <https://doi.org/10.56945/jkpd.v7i2.257>
21. Pambudi, A.S., & Sitorus, R.P.S. (2021). Omnibus Law dan Penyusunan Rencana Tata Ruang: Konsepsi, Pelaksanaan dan Permasalahannya di Indonesia. *Jurnal Ilmiah Wahana Bhakti Praja*. 11 (2), 198-217. <https://doi.org/10.33701/jiwp.v11i2.2216>
22. Pambudi, A. S., Moersidik, S.S. & Karuniasa, M. (2021). Analysis of Recent Erosion Hazard Levels and Conservation Policy Recommendations for Lesti Subwatershed, Upper Brantas Watershed. *Jurnal Perencanaan Pembangunan: The Indonesian Journal of Development Planning*, 5(1), 71-93. <https://doi.org/10.36574/jpp.v5i1.167>
23. Patton, M. Q. (2002). *Qualitative Research and Evaluation Methods*. Thousand Oaks: Sage Publications.
24. Sivakumar, B. (2011). Water crisis: From conflict to cooperation—an overview. *Hydrological Sciences Journal*, 56(4), 531–552. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.580747>
25. Suripin. (2004). *Pelestarian Sumber Daya Tanah dan Air*. Penerbit Andi. Yogyakarta

26. United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. New York: United Nations.
27. Uniyal, B., Jha, M. K., Verma, A. K., & Anebagilu, P. K. (2020). Identification of critical areas and evaluation of best management practices using SWAT for sustainable watershed management. *Science of The Total Environment*, 140737. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140737>
28. Watson, J., Dudley, N., Segan, D. (2014). The performance and potential of protected areas. *Nature* 515, 67–73 (2014).<https://doi.org/10.1038/nature13947>
29. Wurbs, R. A., & James, W. P. (2002). *Water Resources Engineering*. New Jersey: Prentice Hall
30. Zhao, J., Wang, Z., Dong, Y., Yang, Z., & Govers, G. (2022). How soil erosion and runoff are related to land use, topography and annual precipitation: Insights from a meta-analysis of erosion plots in China. *Science of The Total Environment*, 802, 149665. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.1496>
31. Zhu, X. G., Li, T., & Feng, T. T. (2022). On the Synergy in the Sustainable Development of Cultural Landscape in Traditional Villages under the Measure of Balanced Development Index: Case Study of the Zhejiang Province. *Sustainability* 2022, 14(18), 11367.<https://doi.org/10.3390/su141811367>