

## STRATEGI DAN TEKNOLOGI DALAM SMART WATERSHED MANAGEMENT MENUJU DAS BERKELANJUTAN (STUDI LITERATUR)

Eva Rolia<sup>1</sup>, Mufidah<sup>2</sup>, Eri Prawati<sup>3</sup>, Ramadhani Yanidar<sup>4</sup>

Prodi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Metro<sup>1,2,3</sup>

Fakultas Arsitektur Lansekap dan Teknologi Lingkungan Universitas Trisakti<sup>4</sup>

E-mail: roliaeva@yahoo.com<sup>1</sup>, mufidahupik8@gmail.com<sup>2</sup>, eri.prawati@gmail.com<sup>3</sup>,  
ramadhan@trisakti.ac.id<sup>4</sup>

### ABSTRAK

*Smart Watershed Management* (SWM) merupakan pendekatan inovatif dalam pengelolaan daerah aliran sungai (DAS) yang mengintegrasikan teknologi modern, perencanaan strategis, dan partisipasi multipihak. Studi ini merupakan tinjauan literatur sistematis terhadap berbagai publikasi ilmiah yang membahas strategi dan teknologi dalam SWM selama dekade terakhir. Fokus utama kajian mencakup penggunaan model hidrologi (seperti SWAT dan DML-PMA), pendekatan *Total Maximum Daily Load* (TMDL), serta perencanaan partisipatif berbasis SWOT dan PESTEL. Hasil kajian menunjukkan bahwa keberhasilan SWM bergantung pada integrasi antara pemanfaatan data spasial, penguatan kapasitas kelembagaan, dan keterlibatan masyarakat lokal. Selain itu, SWM terbukti meningkatkan efektivitas konservasi tanah dan air, menurunkan beban pencemar, serta memperkuat ketahanan sosial-ekologis DAS, khususnya di wilayah dengan tekanan lingkungan tinggi. Temuan ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengambil kebijakan dan peneliti dalam merancang pengelolaan DAS yang adaptif dan berkelanjutan.

**Kata Kunci :** *Smart Watershed Management*; TMDL; pengelolaan DAS; teknologi spasial; partisipasi masyarakat.

### PENDAHULUAN

Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) menjadi isu sentral dalam pembangunan berkelanjutan, khususnya dalam konteks degradasi sumber daya alam, perubahan iklim, dan meningkatnya tekanan terhadap ketersediaan air bersih (Chen et al., 2025; Muche et al., 2024). DAS sebagai satuan hidrologis alami mencerminkan keterkaitan erat antara aktivitas manusia dan proses ekologis. Dalam konteks ini, pengelolaan DAS tidak lagi cukup hanya melalui pendekatan sektoral atau reaktif, melainkan membutuhkan strategi yang terintegrasi, adaptif, dan berbasis ilmu

pengetahuan serta teknologi (Khiavi et al., 2024; Wang et al., 2025). Salah satu pendekatan mutakhir yang berkembang dalam dekade terakhir adalah *Smart Watershed Management* (SWM) (Guo et al., 2024).

SWM bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, ketepatan, dan keberlanjutan dalam pengelolaan DAS melalui pemanfaatan berbagai teknologi canggih seperti pemodelan hidrologi (misalnya SWAT, DML-PMA), sistem informasi geografis (GIS), penginderaan jauh (*remote sensing*), serta integrasi data spasial-temporal (Bodrud-Doza et al., 2025; Guo et al., 2024). Teknologi ini memungkinkan para pengelola DAS

untuk memperoleh informasi secara *real-time*, menganalisis risiko banjir dan kekeringan, mengidentifikasi titik-titik kritis pencemaran, serta merancang intervensi yang berbasis bukti dan prediktif.

Di samping aspek teknologi, SWM juga menekankan pentingnya strategi kelembagaan dan tata kelola berbasis partisipatif. Berbagai studi menunjukkan bahwa keberhasilan pengelolaan DAS tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis, tetapi juga oleh mekanisme kolaborasi antara pemerintah, masyarakat, sektor swasta, dan lembaga penelitian (Khiavi et al., 2024; Jat et al., 2025). Pendekatan seperti SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) dan PESTEL (*Political, Economic, Social, Technological, Environmental, Legal*) digunakan dalam perencanaan strategis untuk menilai berbagai faktor yang mempengaruhi efektivitas pengelolaan DAS secara komprehensif (Wang et al., 2025).

Lebih lanjut, pendekatan SWM juga relevan dalam konteks global yang sedang menghadapi tantangan krisis air, degradasi ekosistem, dan ketidakpastian iklim. Beberapa negara telah menerapkan strategi SWM untuk mengatasi permasalahan DAS yang kompleks. Sebagai contoh, studi di Iran menunjukkan bahwa pendekatan berbasis pengambilan keputusan multi-kriteria dan partisipasi lokal mampu menghasilkan strategi pengelolaan DAS yang lebih inklusif dan responsif (Khiavi et al., 2024). Di Ethiopia dan India, penerapan *Integrated Watershed Management* (IWM) berbasis konservasi lahan dan partisipasi masyarakat terbukti mampu meningkatkan produktivitas lahan, efisiensi air, serta ketahanan sosial-ekologis masyarakat pedesaan (Muche et al., 2024; Jat et al., 2025). Praktik IWM menjadi bagian penting dalam SWM, khususnya di wilayah rentan seperti daerah kering, dataran tinggi, dan lahan

pertanian intensif. IWM mendorong konservasi sumber daya berbasis masyarakat, restorasi ekosistem, serta peningkatan produktivitas lahan dan air. Studi di India dan Ethiopia menunjukkan bahwa IWM mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 25%, produksi pertanian sebesar 45%, dan mengurangi erosi tanah lebih dari 50% (Muche et al., 2024; Jat et al., 2025).

Kontribusi utama dari konsep SWM adalah kemampuannya untuk mengintegrasikan dimensi ekologis, teknis, dan sosial dalam satu kerangka kerja yang saling mendukung. Hal ini sangat penting mengingat bahwa pengelolaan DAS sering kali melibatkan berbagai sektor seperti kehutanan, pertanian, pemukiman, dan industri, yang memiliki kepentingan berbeda-beda (Chen et al., 2025; Fan et al., 2025). Tanpa pendekatan yang holistik, konflik penggunaan lahan, degradasi sumber daya, dan kerentanan bencana akan terus meningkat.

Meskipun demikian, implementasi SWM di lapangan masih menghadapi berbagai tantangan, antara lain keterbatasan infrastruktur digital, kurangnya kapasitas teknis di tingkat lokal, kesenjangan data spasial, serta belum optimalnya regulasi yang mendukung integrasi lintas sektor (Wang et al., 2025). Oleh karena itu, penting bagi para peneliti dan pengambil kebijakan untuk memahami berbagai pendekatan dan pengalaman implementasi SWM dari berbagai negara sebagai pembelajaran dalam membangun sistem pengelolaan DAS yang lebih cerdas dan adaptif.

Studi ini disusun untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai strategi dan teknologi dalam SWM berdasarkan kajian literatur sistematis. Fokus utama dari penelitian ini mencakup: (1) mengidentifikasi teknologi utama yang digunakan dalam pengelolaan DAS berbasis SWM, (2) menganalisis strategi perencanaan dan tata kelola yang

mendukung implementasi SWM, serta (3) mengevaluasi dampak dan efektivitas SWM terhadap keberlanjutan ekosistem DAS dan kesejahteraan masyarakat. Harapannya, hasil dari studi ini dapat menjadi referensi bagi para pengambil kebijakan, akademisi, dan praktisi dalam merancang pendekatan pengelolaan DAS yang lebih inovatif dan berkelanjutan.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis sistematik literatur (*systematic literature review*) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian yang relevan terkait konsep dan implementasi *Smart Watershed Management* (SWM). Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan pemahaman komprehensif terhadap praktik terbaik, tantangan, serta perkembangan teknologi dan strategi dalam pengelolaan DAS.

1. Protokol Penelusuran Literatur  
Penelusuran literatur dilakukan secara sistematik dengan langkah-langkah sebagai berikut:
  - a. Sumber database: ScienceDirect, Scopus, dan Google Scholar.
  - b. Kata kunci utama: "Smart Watershed Management", "Integrated Watershed Management", "watershed pollution control", "ecosystem services in watershed", "Total Maximum Daily Load", "watershed planning strategies", "best management practices (BMPs)".
  - c. Kriteria inklusi:
    - Artikel ilmiah yang diterbitkan antara tahun 2015–2025.
    - Studi berbasis data primer atau tinjauan sistematik yang relevan dengan pengelolaan DAS berbasis teknologi, strategi kebijakan, atau partisipatif.
    - Artikel berbahasa Inggris.

d. Kriteria eksklusi:

- Artikel non-ilmiah, opini, atau tanpa landasan metodologis yang kuat.
2. Studi dengan lingkup yang sangat lokal tanpa relevansi terhadap kerangka SWM.  
Prosedur Seleksi dan Sintesis Tahapan seleksi dilakukan dalam tiga tahap:
    - a. Identifikasi awal berdasarkan judul dan abstrak.
    - b. Evaluasi isi penuh untuk menilai kesesuaian dengan tujuan studi.
    - c. Sintesis tematik berdasarkan kategori berikut:
      - Praktik teknis dan teknologi SWM (misal: model hidrologi, TMDL, GIS, RS).
      - Strategi kelembagaan dan perencanaan (misal: SWOT-PESTEL, partisipasi pemangku kepentingan).
      - Dampak terhadap layanan ekosistem dan keberlanjutan sosial-ekologis.Data diklasifikasikan secara manual ke dalam tabel matriks berdasarkan fokus studi, wilayah kajian, metode yang digunakan, dan hasil utama. Setiap artikel dianalisis untuk menggali kontribusinya dalam memahami pendekatan SWM yang efektif dan aplikatif dalam berbagai konteks geografis.
  3. Validasi dan Keterbatasan Untuk meningkatkan validitas, hasil analisis dibandingkan silang antar studi dan dipastikan terdapat representasi dari berbagai konteks (negara maju, berkembang, wilayah tropis, lahan kering, dan dataran tinggi). Keterbatasan studi ini mencakup potensi bias publikasi dan keterbatasan ada akses artikel berbayar.

## HASIL PENELITIAN

### Pendekatan Teknologi dan Model Hidrologi

Teknologi memainkan peran penting dalam mendukung *Smart Watershed Management* (SWM). Berbagai studi menunjukkan bahwa model hidrologi dinamis seperti SWAT, HSPF, dan AnnAGNPS digunakan untuk memetakan distribusi spasial dan temporal beban polutan di DAS secara lebih akurat. Misalnya, pendekatan *Dynamic Modeling and Loading Priority Management Areas* (DML-PMA) mampu mengidentifikasi *sub-watershed* kritis dan memperkirakan kontributor utama pencemaran dalam resolusi temporal yang tinggi. Selain itu, penggunaan GIS, *remote sensing*, dan pemantauan berbasis sensor mendukung proses pengambilan keputusan berbasis data di tingkat sub-DAS.

### Strategi Perencanaan dan Tata Kelola

Strategi perencanaan dan tata kelola DAS yang efektif menjadi aspek vital dalam mewujudkan *Smart Watershed Management* (SWM) yang berkelanjutan. Studi terkini menegaskan perlunya pendekatan terpadu yang menggabungkan perencanaan strategis, pengambilan keputusan multi-objektif, serta partisipasi aktif pemangku kepentingan (Khiavi et al., 2024; Muche et al., 2024).

Khiavi et al. (2024) menyoroti pentingnya penerapan model perencanaan strategis yang mengakomodasi berbagai tujuan lingkungan, sosial, dan ekonomi secara bersamaan dalam pengelolaan DAS. Dengan menggunakan pendekatan multi-objektif, tata kelola DAS dapat dioptimalkan untuk menjaga keseimbangan antara konservasi sumber daya air dan kebutuhan masyarakat. Model ini juga memungkinkan penyesuaian kebijakan secara adaptif berdasarkan evaluasi kinerja berkelanjutan.

Selain itu, Muche et al. (2024) menekankan peran inovasi strategi pengelolaan terintegrasi yang menggabungkan teknologi, kebijakan, dan pemberdayaan masyarakat. Pendekatan ini memperkuat tata kelola berbasis komunitas, meningkatkan kesadaran, dan mendukung implementasi praktik-praktik berkelanjutan yang sesuai dengan kondisi lokal. Penguatan kapasitas komunitas dan koordinasi antar lembaga menjadi kunci sukses dalam pelaksanaan strategi ini.

Dalam konteks global, Jat et al. (2025) mengangkat strategi adaptasi iklim melalui pengelolaan DAS yang cerdas secara iklim (*climate-smart*). Pendekatan ini memprioritaskan pengelolaan sumber daya air dan lahan secara berkelanjutan, sekaligus meningkatkan ketahanan masyarakat petani di wilayah kering melalui teknologi inovatif dan kebijakan pendukung. Hal ini menunjukkan bahwa tata kelola DAS tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga harus mempertimbangkan aspek sosial-ekonomi dan perubahan iklim.

Implementasi *Total Maximum Daily Load* (TMDL) sebagai kebijakan pengendalian pencemaran juga mendapat sorotan dalam tata kelola DAS modern (Wang et al., 2025). TMDL menyediakan kerangka kerja untuk menetapkan batasan beban polutan secara ilmiah dan sistematis, sehingga pengelolaan kualitas air menjadi lebih terukur dan efektif.

Secara keseluruhan, strategi perencanaan dan tata kelola dalam SWM mengarah pada pendekatan holistik yang mengintegrasikan aspek teknis, kebijakan, sosial, dan lingkungan. Pendekatan ini didukung oleh teknologi canggih dan model perencanaan yang fleksibel, serta partisipasi aktif semua pemangku kepentingan untuk mencapai pengelolaan DAS yang adaptif dan berkelanjutan.

## **Praktik Konservasi dan Restorasi Ekosistem**

Konservasi dan restorasi ekosistem menjadi komponen penting dalam *Smart Watershed Management* (SWM), terutama untuk memulihkan fungsi ekologis daerah aliran sungai (DAS) yang mengalami degradasi. Pendekatan ini bertujuan menjaga keberlanjutan sumber daya air, meningkatkan kualitas lingkungan, dan memperkuat ketahanan ekosistem terhadap tekanan antropogenik dan perubahan iklim.

Menurut Chen et al. (2025), penerapan pola tata guna lahan yang berorientasi konservasi di wilayah Loess Plateau, Tiongkok, berhasil memperbaiki layanan ekosistem melalui peningkatan vegetasi penutup tanah, pengurangan erosi, dan stabilisasi kualitas air. Konservasi berbasis lanskap ini didorong oleh kebijakan penggunaan lahan yang adaptif serta pemanfaatan teknologi pemetaan untuk mengidentifikasi wilayah rawan degradasi.

Di wilayah Ethiopia, Muche et al. (2024) melaporkan efektivitas penerapan teknik konservasi tanah dan air seperti pembuatan terasering, reforestasi, dan pengendalian limpasan permukaan yang secara signifikan meningkatkan retensi air tanah dan mengurangi sedimentasi di DAS. Praktik-praktik ini tidak hanya memulihkan ekosistem DAS, tetapi juga meningkatkan produktivitas lahan pertanian masyarakat setempat.

Pendekatan konservasi berbasis ekosistem juga ditunjukkan dalam studi Fan et al. (2025), yang mengeksplorasi manajemen fosfor berkelanjutan di DAS melalui integrasi restorasi habitat perairan dan pengurangan polusi dari sumber pertanian. Hasilnya menunjukkan peningkatan resiliensi sistem perairan terhadap eutrofikasi dan gangguan antropogenik, sekaligus menjaga keberlangsungan biodiversitas lokal.

Restorasi ekosistem dalam konteks SWM juga diperkuat dengan teknologi

pemodelan dan pemantauan. Dengan bantuan GIS dan data penginderaan jauh, daerah-daerah kritis dapat diidentifikasi untuk intervensi restoratif, seperti revegetasi atau rehabilitasi bantaran sungai (Guo et al., 2024). Data spasial ini mendukung prioritas lokasi restorasi yang paling berdampak terhadap peningkatan kualitas DAS secara keseluruhan.

Secara umum, praktik konservasi dan restorasi ekosistem yang terintegrasi dalam SWM tidak hanya memulihkan fungsi ekologis DAS, tetapi juga memberikan manfaat sosial dan ekonomi yang berkelanjutan. Keberhasilan intervensi ini sangat bergantung pada kombinasi pendekatan ilmiah, dukungan teknologi, serta keterlibatan masyarakat dan kebijakan yang mendukung konservasi jangka panjang.

## **Dampak Sosial dan Lingkungan**

Implementasi *Smart Watershed Management* (SWM) tidak hanya berfokus pada aspek teknis dan tata kelola, tetapi juga memiliki dampak signifikan terhadap aspek sosial dan lingkungan di wilayah DAS. Literatur terbaru menunjukkan bahwa pengelolaan DAS yang berkelanjutan mampu meningkatkan kualitas hidup masyarakat sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem (Chen et al., 2025; Jat et al., 2025).

Chen et al. (2025) menyoroti bagaimana pengelolaan DAS yang memperhatikan layanan ekosistem dapat mengoptimalkan manfaat lingkungan sekaligus memberikan dampak positif terhadap kesejahteraan masyarakat lokal. Strategi pengelolaan yang mempertimbangkan variabel sosial-ekonomi dan pola penggunaan lahan menghasilkan peningkatan fungsi ekosistem, seperti penyediaan air bersih, pengendalian erosi, dan habitat keanekaragaman hayati. Hal ini menunjukkan pentingnya integrasi aspek sosial dalam pengelolaan teknis DAS.

Selain itu, Jat et al. (2025) menegaskan bahwa pengelolaan DAS yang adaptif terhadap perubahan iklim dan berbasis pendekatan cerdas iklim dapat meningkatkan ketahanan sosial ekonomi komunitas agraris, khususnya di wilayah kering dan rentan. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi risiko bencana terkait air, seperti banjir dan kekeringan, tetapi juga memperkuat kemampuan masyarakat dalam menghadapi perubahan lingkungan yang dinamis.

Dampak lingkungan dari praktik SWM juga tercermin dalam penurunan beban polutan dan perbaikan kualitas air sungai. Wang et al. (2025) membahas efektivitas implementasi kebijakan *Total Maximum Daily Load* (TMDL) dalam mengendalikan polutan, yang secara langsung mendukung pemulihan ekosistem perairan dan keberlanjutan sumber daya air. Perbaikan kualitas lingkungan ini pada gilirannya memperkuat ketahanan ekosistem dan keberlangsungan fungsi DAS.

Namun, beberapa studi juga mencatat tantangan sosial dalam implementasi SWM, terutama terkait kesenjangan akses teknologi dan partisipasi masyarakat. Oleh karena itu, pemberdayaan komunitas dan edukasi lingkungan menjadi bagian penting untuk memastikan bahwa manfaat SWM dapat dirasakan secara merata dan berkelanjutan (Muche et al., 2024).

Secara keseluruhan, dampak sosial dan lingkungan dari *Smart Watershed Management* sangat positif bila pendekatan integratif diterapkan, memperkuat hubungan harmonis antara manusia dan lingkungan serta mendukung pembangunan berkelanjutan di wilayah DAS.

## KESIMPULAN

*Smart Watershed Management* (SWM) menawarkan pendekatan holistik dan adaptif dalam pengelolaan daerah aliran sungai (DAS). Berdasarkan hasil

kajian literatur, terdapat beberapa poin penting yang dapat disimpulkan:

1. Penggunaan teknologi canggih seperti pemodelan hidrologi, sistem informasi geografis (GIS), dan penginderaan jauh sangat membantu dalam identifikasi sumber pencemar, pemantauan kualitas air, dan perencanaan intervensi.
2. Perencanaan strategis berbasis pendekatan partisipatif seperti SWOT dan PESTEL terbukti efektif dalam menghasilkan strategi pengelolaan DAS yang lebih inklusif dan berkelanjutan.
3. Praktik konservasi berbasis ekosistem seperti terasering, konservasi tanah dan air, serta *agroforestry* menunjukkan dampak positif terhadap keberlanjutan lingkungan dan produktivitas lahan.
4. Implikasi sosial dari SWM sangat signifikan, terutama dalam peningkatan kesejahteraan masyarakat lokal, pemberdayaan ekonomi, serta ketahanan terhadap perubahan iklim.

Namun, tantangan dalam implementasi SWM masih ada, termasuk keterbatasan data spasial, koordinasi kelembagaan, dan kapasitas teknis sumber daya manusia. Oleh karena itu, upaya kolaboratif lintas sektor, peningkatan kapasitas, dan pemanfaatan data terbuka menjadi kunci keberhasilan penerapan SWM di masa mendatang.

Studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan kebijakan dan strategi pengelolaan DAS yang berbasis ilmu pengetahuan, teknologi, dan partisipasi masyarakat secara aktif.

## DAFTAR PUSTAKA

Bodrud-Doza, M., Yang, W., Liu, Y., Yerubandi, R., Daggupati, P., DeVries, B., & Fraser, E. D. G. (2025). *Evaluating best management*

- practices for nutrient load reductions in tile-drained watersheds of the Laurentian Great Lakes Basin: A literature review.* \*Science of The Total Environment, 965\*, 178657. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178657>
- Chen, L., Wei, W., Tong, B., & Chen, L. (2025). *Ecosystem services and their drivers under different watershed-management patterns in the western Chinese Loess Plateau.* \*Ecological Indicators, 172\*, 113321. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113321>
- Guo, W., Wang, P., Wu, W., Zorn, C., Du, M., Gong, W., Wang, B., Wu, J., Qiao, S., & Huang, X. (2024). *A dynamic modeling approach to quantify pollution contributions from priority management areas within watersheds at fine temporal resolution.* \*Journal of Environmental Management, 371\*, 123061. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123061>
- Khiavi, A. N., Vafakhah, M., & Sadeghi, S. H. (2024). *Application of strategic planning and multi-objective decision-making models in integrated watershed management: A case study in the Cheshmeh-Kileh Watershed, Iran.* \*Journal of Hydrology, 631\*, 130690. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130690>
- Muche, A. T., Ketsela, Y. S., & Ali, B. M. (2024). *Assessing the effectiveness of integrated watershed management practices and suggesting innovative strategies in southern Ethiopia.* \*Heliyon, 10\*, e38619. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38619>
- Wang, H., Guan, Y., Hu, M., Hou, Z., Ping, Y., Zhang, Z., Zhang, Q., Shang, F., Lin, K., & Feng, C. (2025). *Enhancing pollution management in watersheds: A critical review of total maximum daily load (TMDL) implementation.* \*Environmental Research, 264\*, 120394. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120394>
- Jat, M. L., et al. (2025). *Integrated watershed management for transforming dryland livelihoods: A climate-smart strategy for sustainable dryland agriculture in India.* \*Resources, Conservation and Recycling: Advances, 16\*, 200152. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200152>
- Fan, Y., et al. (2025). *Watershed sustainable phosphorus management involving the resilience assessment.* \*Resources, Conservation and Recycling: Advances, 16\*, 200162. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200162>