



Smart sustainable hydrology : Teknologi Digital, Pemodelan, GIS, dan Rekayasa Air untuk Infrastruktur Tangguh Iklim

Diterima :

17 Desember 2025

Direvisi :

05 Januari 2026

Diterbitkan :

20 Januari 2026

Gamaliel K. Jarek¹, Verdy Sarangnga²

Dosen dan Mahasiswa Prodi Fakultas Teknik

Universitas Doktor Nugroho Magetan

Email : gamalielkarek@udn.ac.id

ABSTRAK

Artikel ilmiah ini disusun sebagai ringkasan konseptual yang diturunkan dari penulisan buku Smart Sustainable Hydrology: Teknologi Digital, Pemodelan, GIS, dan Rekayasa Air untuk Infrastruktur Tangguh Iklim. Latar belakangnya adalah meningkatnya risiko hidrometeorologi akibat variabilitas dan perubahan iklim—banjir, kekeringan, degradasi DAS, serta penurunan kualitas air—yang menuntut infrastruktur air lebih adaptif, prediktif, dan berbasis data. Kajian dilakukan melalui sintesis literatur tentang integrasi sensor dan Internet of Things (IoT), analitik data dan kecerdasan buatan, pemodelan hidrologi–hidraulika, serta GIS dan penginderaan jauh untuk pemetaan risiko dan dukungan keputusan. Temuan menunjukkan bahwa pendekatan “smart hydrology” paling efektif ketika menggabungkan (i) akuisisi data real-time, (ii) pemodelan dan simulasi skenario iklim, (iii) analisis spasial berbasis GIS/remote sensing, dan (iv) tata kelola data yang mendukung verifikasi serta interoperabilitas. Artikel menegaskan perlunya spesifikasi berbasis kinerja, validasi lapangan, dan peta jalan implementasi untuk memastikan teknologi digital benar-benar meningkatkan ketangguhan iklim dan efisiensi pengelolaan air.

Kata kunci (5): smart hydrology; Internet of Things (IoT); pemodelan hidrologi–hidraulika; GIS dan penginderaan jauh; digital twin.



PENDAHULUAN

Perubahan iklim meningkatkan intensitas dan frekuensi kejadian ekstrem, sementara urbanisasi memperbesar limpasan permukaan, menurunkan infiltrasi, dan meningkatkan paparan risiko banjir. Pada saat yang sama, kebutuhan air meningkat dan tekanan pada kualitas air makin tinggi. Dalam kondisi ini, pendekatan hidrologi konvensional yang dominan “statis” dan berbasis data terbatas sering tidak memadai untuk perencanaan adaptif dan operasi infrastruktur air secara responsif.

Konsep smart sustainable hydrology berkembang untuk menjawab kesenjangan tersebut melalui integrasi teknologi digital: sensor–IoT untuk pemantauan real-time, analitik data/AI untuk prediksi, pemodelan hidrologi–hidraulika untuk simulasi, serta GIS dan penginderaan jauh untuk analisis spasial risiko. Buku yang menjadi latar artikel ini menekankan bahwa ketangguhan iklim tidak cukup hanya membangun infrastruktur “lebih besar”, tetapi harus “lebih cerdas”—mampu membaca kondisi lapangan, memproyeksikan skenario, dan mengoptimalkan tindakan mitigasi. (

METODE

Artikel ini menggunakan sintesis literatur terstruktur (fokus penelitian 10 tahun terakhir) dengan kerangka analisis berikut:

Akuisisi data digital: sensor, IoT, telemetry, dan integrasi data multi-sumber (hidrometri, kualitas air, meteorologi). Pemodelan hidrologi–hidraulika dan skenario iklim: evaluasi praktik pemodelan drainase/banjir perkotaan dan penyesuaian proyeksi iklim pada model (misalnya dukungan penyesuaian iklim pada SWMM). GIS dan penginderaan jauh: pemetaan bahaya/kerentanan banjir, kekeringan, dan degradasi DAS, termasuk pendekatan sistematis RS–GIS untuk manajemen risiko banjir. Digital twin dan sistem pendukung keputusan: penilaian peran digital twin untuk ketahanan dan tata kelola air yang lebih responsif. Kriteria implementasi ketangguhan: reliabilitas data, interoperabilitas, validasi model, kesiapan institusional, serta verifikasi kinerja.

TEMUAN DAN PEMBAHASAN

1. **Arsitektur “Smart Hydrology”: Data → Model → Keputusan**

Smart hydrology efektif bila alurnya konsisten dari pemantauan (sensor–IoT) menuju pemodelan (hidrologi–hidraulika) lalu menjadi keputusan operasional (misalnya



pengaturan pintu air/pompa dan peringatan dini). Nilai utama tidak berada pada “real-time data” semata, tetapi pada kemampuan sistem menerjemahkan data menjadi aksi yang terukur dan tepat waktu.

2. **Pemodelan Hidrologi–Hidraulika Berbasis Skenario Iklim**

Model hidrologi–hidraulika tetap menjadi tulang punggung perencanaan drainase dan banjir perkotaan. Integrasi proyeksi iklim dalam pemodelan berkembang, misalnya melalui SWMM Climate Adjustment Tool (SWMM-CAT) untuk memasukkan faktor penyesuaian iklim. Perencanaan tangguh iklim perlu menguji rentang skenario (bukan satu desain “rata-rata”) serta mengombinasikan simulasi kejadian ekstrem dan simulasi kontinu agar perubahan musiman dan kondisi awal kelembapan terwakili.

3. **GIS dan Penginderaan Jauh untuk Pemetaan Risiko dan Prioritas Investasi**

Integrasi remote sensing–GIS memperluas cakupan observasi dan memungkinkan pemetaan bahaya/kerentanan secara spasial menggunakan data tata guna lahan, iklim, dan morfometri DAS. Secara kebijakan, GIS berfungsi sebagai jembatan antara analisis teknis dan prioritas investasi—misalnya penentuan lokasi retensi, perlindungan kawasan rawan, serta perencanaan jalur evakuasi—sehingga keputusan penanganan risiko lebih transparan dan berbasis bukti.

4. **AI/ML dan Digital Twin: Operasi Adaptif, dengan Prasyarat Validasi dan Tata Kelola**

AI/ML mempercepat prediksi variabel hidrologi (misalnya estimasi kedalaman banjir) dan deteksi dini ketika data besar tersedia, sedangkan digital twin berperan sebagai lapisan integrasi yang menggabungkan sensor, model, dan visualisasi untuk operasi yang lebih adaptif. Namun, AI/digital twin tidak menggantikan fisika proses; keduanya harus disertai desain arsitektur data (QC, metadata, sinkronisasi waktu), standar interoperabilitas, protokol kalibrasi–validasi model, serta audit kinerja sistem agar tidak menimbulkan “kepercayaan palsu” dalam pengambilan keputusan.

PENUTUP

Simpulan

Smart sustainable hydrology merupakan pendekatan integratif yang menggabungkan teknologi digital (sensor–IoT), pemodelan hidrologi–hidraulika, GIS/penginderaan jauh, dan analitik data/AI untuk memperkuat ketangguhan iklim



infrastruktur air. Bukti literatur menunjukkan efektivitas tertinggi ketika data real-time, simulasi skenario iklim, dan analisis spasial terhubung dalam sistem pendukung keputusan yang tervalidasi.

Saran

1. **Kerangka mutu data sebagai prasyarat digitalisasi**
 - o Kalibrasi sensor secara berkala dan terdokumentasi.
 - o Terapkan QC/QA (deteksi outlier, missing data, dan drift sensor).
 - o Standarkan metadata (lokasi, satuan, metode ukur, resolusi waktu).
2. **Pemodelan berbasis skenario untuk desain dan operasi**
 - o Gunakan multi-skenario iklim (baseline–moderate–ekstrem).
 - o Sertakan skenario perubahan tata guna lahan (urbanisasi, deforestasi).
 - o Uji sensitivitas parameter untuk memahami faktor pengendali risiko.
3. **Standardisasi kalibrasi–validasi dan pelaporan ketidakpastian**
 - o Tetapkan prosedur kalibrasi dan validasi yang konsisten antar model.
 - o Laporkan metrik kinerja (mis. NSE, RMSE, bias) secara seragam.
 - o Cantumkan rentang ketidakpastian, terutama untuk sistem peringatan dini.

Rekomendasi

1. **Peta jalan implementasi bertahap**
 - o **Pilot terukur:** fokus pada satu DAS/koridor drainase prioritas.
 - o **Integrasi lintas instansi:** satukan data hidrometri–BMKG–tata ruang.
 - o **Scale-up berbasis indikator kinerja:** waktu respons, akurasi prakiraan, dan penurunan kerugian.
2. **Integrasi RS–GIS untuk manajemen risiko rutin**
 - o Pemetaan bahaya/kerentanan berkala (banjir, kekeringan, longsor terkait hujan).
 - o Pembaruan cepat pascakejadian menggunakan citra satelit/drone bila tersedia.
 - o Dashboard spasial untuk prioritas intervensi dan pelaporan publik.
3. **Pengembangan digital twin untuk aset prioritas**
 - o Tetapkan tujuan jelas: operasi adaptif, optimasi energi, dan pengurangan banjir/kekeringan.
 - o Integrasikan sensor–model–visualisasi dalam satu alur keputusan.
 - o Terapkan audit kinerja (model drift, kualitas data, pembaruan parameter).



Implikasi

1. **Teknis (ScienceDirect)**
 - Meningkatkan prediksi dan operasi adaptif melalui integrasi data–model–aksi.
 - Mempercepat respon operasional berbasis informasi real-time yang tervalidasi.
2. **Kebijakan (Taylor & Francis)**
 - Memperkuat pengadaan dan prioritas investasi berbasis risiko spasial yang transparan.
 - Mendukung akuntabilitas program melalui indikator kinerja yang terukur.
3. **Sosial-ekonomi**
 - Mempercepat peringatan dini dan menekan kerugian bencana melalui keputusan lebih cepat dan tepat.
 - Meningkatkan kontinuitas layanan air saat kejadian ekstrem.
4. **Kelembagaan**
 - Menuntut tata kelola data, interoperabilitas sistem, dan kapasitas SDM lintas disiplin.
 - Mendorong kolaborasi antarlembaga melalui standar data dan prosedur operasional bersama.

Daftar Pustaka

- Aivazidou, E., Baniyas, G., Lampridi, M., Vasileiadis, G., Anagnostis, A., Papageorgiou, E., & Bochtis, D. (2021). Smart technologies for sustainable water management: An urban analysis. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su132413940>
- Aragonez, R., Duran, A., & Martin, X. (2025). Green infrastructure for reintegrating fragmented urban fabrics: Multiscale methodology using space syntax and hydrologic modeling. *Urban Science*. <https://doi.org/10.3390/urbansci9060208>
- Asfandyar, M., Bazai, N., Chen, H., Habib, M., Iqbal, J., Baig, M., & Hasan, M. (2025). Enhancing sustainable flood resilience and energy efficiency in residential structures: Integrating hydrological data, BIM, and GIS in Quetta, Pakistan. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17062496>
- Biazar, S., Golmohammadi, G., Nedhunuri, R., Shaghghi, S., & Mohammadi, K. (2025). Artificial intelligence in hydrology: Advancements in soil, water resource management, and sustainable development. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17052250>



- Benitez, V., Matamoros, O., & Escobar, J. (2025). Towards resilient cities: Systematic review of the literature on the use of AI to optimize water harvesting and mitigate scarcity. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w17131978>
- Boulos, P. (2017). Smart water network modeling for sustainable and resilient infrastructure. *Water Resources Management*, 31, 3177–3188. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1699-1>
- Chang, F., Chang, L., & Chen, J. (2023). Artificial intelligence techniques in hydrology and water resources management. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w15101846>
- Henriksen, H., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Troldborg, L., Seidenfaden, I., Kragh, S., Bøgh, E., & Stisen, S. (2022). A new digital twin for climate change adaptation, water management, and disaster risk reduction (HIP digital twin). *Water*. <https://doi.org/10.3390/w15010025>
- Lawal, I., Bertram, D., White, C., Jagaba, A., Hu, Z., Wang, G., & Hamed, M. (2023). Integrated framework for hydrologic modelling in data-sparse watersheds and climate change impact on projected green and blue water sustainability. *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1233216>
- Mengistu, T., Chang, S., & Chung, I. (2025). Modeling and prediction of climate change impacts on water resources vulnerability: A multi-model approach. *Journal of Environmental Management*, 388, 126025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126025>
- Zhao, T., Song, C., Yu, J., Xing, L., Xu, F., Li, W., & Wang, Z. (2025). Leveraging immersive digital twins and AI-driven decision support systems for sustainable water reserves management: A conceptual framework. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17083754>
- Zhu, L., Gao, C., Wu, M., & Zhu, R. (2025). Integrating blue–green infrastructure with gray infrastructure for climate-resilient surface water flood management in the plain river networks. *Land*. <https://doi.org/10.3390/land14030634>