



PENERAPAN *ARTIFICIAL INTELLIGENCE* PADA KAJIAN WADUK: *SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW*

Ibnu Adzan Subakti^{1*}, Hastuti¹

¹Program Studi Pendidikan Geografi, Fakultas Ilmu Sosial dan Politik, Universitas Negeri Yogyakarta
Jl. Colombo No.1, Caturtunggal, Kec. Depok, Kab. Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281, Indonesia

* Korespondensi penulis: ibnuadzan.2025@student.uny.ac.id

ABSTRAK

Waduk merupakan infrastruktur sumber daya air yang berperan penting dalam penyediaan air, pengendalian banjir, irigasi, dan pembangkit listrik. Kompleksitas pengelolaan waduk mendorong berkembangnya pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) untuk meningkatkan akurasi prediksi dan mendukung pengambilan keputusan. Penelitian ini bertujuan menganalisis perkembangan penerapan AI pada studi waduk melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR). Artikel diperoleh dari *database* Scopus menggunakan aplikasi *Publish or Perish* dan diseleksi menggunakan alur PRISMA. Sebanyak 451 artikel diidentifikasi, dan 73 artikel di antaranya memenuhi kriteria untuk dianalisis. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa jumlah publikasi mengalami peningkatan signifikan setelah tahun 2020 dan didominasi oleh negara China dan Iran. Metode AI yang paling banyak digunakan adalah *Artificial Neural Network* (ANN), *Long Short-Term Memory* (LSTM), *Support Vector Machine* (SVM), dan *Random Forest* (RF). Hasil sintesis menunjukkan bahwa AI telah dimanfaatkan pada berbagai bidang studi waduk, terutama prediksi aliran masuk, pengoperasian waduk, dan *monitoring* kualitas air. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada peningkatan akurasi prediksi berbasis data historis, sementara pengembangan sistem pengambilan keputusan, integrasi aspek keberlanjutan, dan kajian pada wilayah negara berkembang seperti Indonesia masih relatif terbatas. Temuan ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan AI pada studi waduk didominasi oleh pendekatan prediktif dan belum banyak diarahkan pada pengelolaan waduk yang adaptif dan berkelanjutan. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan model AI yang lebih terintegrasi untuk mendukung pengelolaan waduk yang efektif, adaptif, dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *Artificial Intelligence*, *Systematic Literature Review*, Waduk, Pengelolaan Waduk

1. Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur sumber daya air dalam bentuk waduk terus mengalami peningkatan sebagai respons terhadap kebutuhan air yang semakin kompleks. Terdapat sekitar 45.000 bendungan besar di seluruh dunia, dengan ribuan lainnya masih dalam tahap perencanaan dan konstruksi, terutama di negara-negara berkembang [1]. Waduk tidak lagi diposisikan semata sebagai penyedia air irigasi, tetapi sebagai sistem *multipurpose* yang berkaitan dengan stabilitas produksi pangan, pengendalian risiko hidrologis, serta keberlanjutan sumber daya air. Keberadaan waduk juga mendukung pencapaian pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDGs*), khususnya tujuan ke-6 mengenai air bersih dan sanitasi layak. Namun, pengelolaan waduk menghadapi tantangan akibat perubahan iklim, peningkatan kebutuhan air, serta perubahan penggunaan lahan [2]. Kondisi tersebut menuntut adanya pendekatan pengelolaan waduk yang lebih adaptif, akurat dan berbasis data.

Perkembangan teknologi digital dalam beberapa tahun terakhir telah mendorong pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dalam pengelolaan sumber daya air dan sistem waduk. *Artificial Intelligence* (AI) merupakan pendekatan komputasi yang memungkinkan sistem komputer meniru kemampuan manusia dalam mengenali pola, melakukan prediksi, serta mendukung pengambilan keputusan berdasarkan data. Pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dalam studi waduk banyak digunakan untuk prediksi muka air, peramalan *inflow* dan *outflow*, prediksi banjir hingga *monitoring* kualitas air [3]. Berbagai metode AI seperti *Artificial Neural Network* (ANN), *Long Short-Term Memory* (LSTM), *Random Forest*, *Support Vector Machine* (SVM), dan model *deep learning* lainnya menunjukkan kemampuan yang baik dalam menangani data hidrologi [4].



Peningkatan penggunaan *Artificial Intelligence* (AI) dalam penelitian waduk terlihat dari semakin banyaknya publikasi ilmiah yang membahas penerapan teknologi tersebut dalam sistem sumber daya air [5]. Beberapa penelitian yang dilakukan di Korea Selatan dan Irak menunjukkan bahwa model AI memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan metode statistik konvensional, terutama dalam proses hidrologi yang dipengaruhi oleh banyak variabel dinamis [6], [7]. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kemampuan AI dalam mengolah data yang kompleks dan beragam memberikan keunggulan dalam mendukung pengambilan keputusan pada sistem sumber daya air. Dengan kemampuan pemrosesan data yang cepat dan adaptif, *Artificial Intelligence* (AI) dinilai mampu meningkatkan efisiensi pengelolaan waduk.

Seiring dengan meningkatnya pemanfaatan AI pada studi waduk, penelitian yang dilakukan juga berkembang ke berbagai fokus kajian dan metode yang beragam. Sebagian besar penelitian berfokus pada prediksi hidrologi [8], sementara penelitian lainnya menitikberatkan pada optimasi pengoperasian waduk, mitigasi banjir, *monitoring* kualitas air, dan pengelolaan sumber daya air. Meskipun jumlah penelitian mengenai penerapan AI pada studi waduk terus meningkat, informasi mengenai pola perkembangan penelitian, metode AI yang dominan digunakan, bidang penerapan utama, serta kesenjangan penelitian masih tersebar pada berbagai publikasi sehingga sulit memperoleh gambaran yang komprehensif mengenai arah perkembangan kajian tersebut. Penelitian terdahulu umumnya membahas penerapan AI pada kasus atau metode tertentu sehingga masih terbatas kajian yang melakukan sintesis literatur secara sistematis untuk mengidentifikasi pola perkembangan penelitian AI pada sistem waduk secara menyeluruh.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu kajian yang mampu memetakan perkembangan penelitian terkait penerapan AI pada sistem waduk. Penelitian ini bertujuan melakukan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi pola perkembangan penelitian, metode AI yang dominan, bidang penerapan utama, serta kesenjangan penelitian dan peluang pengembangan AI pada studi waduk di masa mendatang. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan penelitian di bidang sumber daya air, hidrologi, dan pengelolaan waduk berbasis AI.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis penelitian terkait penerapan *Artificial Intelligence* (AI) pada penelitian waduk. Metode SLR dipilih karena mampu memberikan kajian literatur secara sistematis, terstruktur, dan komprehensif terhadap perkembangan penelitian. Untuk memastikan bahwa proses penelitian dilakukan secara sistematis, penelitian ini merujuk pada tahapan *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses* (PRISMA). Pencarian data dilakukan pada tanggal 08 Mei 2026 menggunakan sumber berbasis data Scopus. Pencarian dilakukan menggunakan aplikasi *Publish or Perish* dengan kombinasi kata kunci utama yang berkaitan dengan *Artificial Intelligence* dan penelitian waduk yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pencarian Kata Kunci Penelitian

Key Strings	Jumlah
<i>artificial intelligence OR machine learning OR deep learning OR neural network AND reservoir management OR water reservoir OR reservoir operation</i>	148
<i>artificial intelligence OR machine learning OR deep learning OR ANN OR LSTM AND water reservoir OR dam reservoir OR reservoir operation OR reservoir management</i>	303
Jumlah	451

Proses seleksi dan evaluasi artikel dilakukan secara terstruktur menggunakan *covidence* untuk tahap identifikasi dan penghapusan artikel duplikat. Proses *screening* dilakukan berdasarkan judul, abstrak, dan kesesuaian topik penelitian dengan fokus kajian. Artikel yang relevan selanjutnya dilakukan proses *eligibility* melalui pembacaan teks lengkap (*full-text reading*) untuk menilai kesesuaian artikel berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi penelitian. Artikel yang terpilih dilakukan analisis dengan mengklasifikasi data,



menyajikan data, dan menarik kesimpulan untuk menjawab *research question*. Tujuan studi ini diuraikan berdasarkan pertanyaan penelitian berikut:

RQ1. Apa pola-pola yang muncul dalam penerapan *Artificial Intelligence* (AI) pada studi waduk?

RQ2. Apa metode *Artificial Intelligence* (AI) yang paling umum diterapkan dalam studi waduk?

RQ3. Apa saja bidang penerapan utama *Artificial Intelligence* (AI) dalam studi waduk?

RQ4. Apa kesenjangan penelitian saat ini dan peluang penelitian masa depan dalam studi waduk?

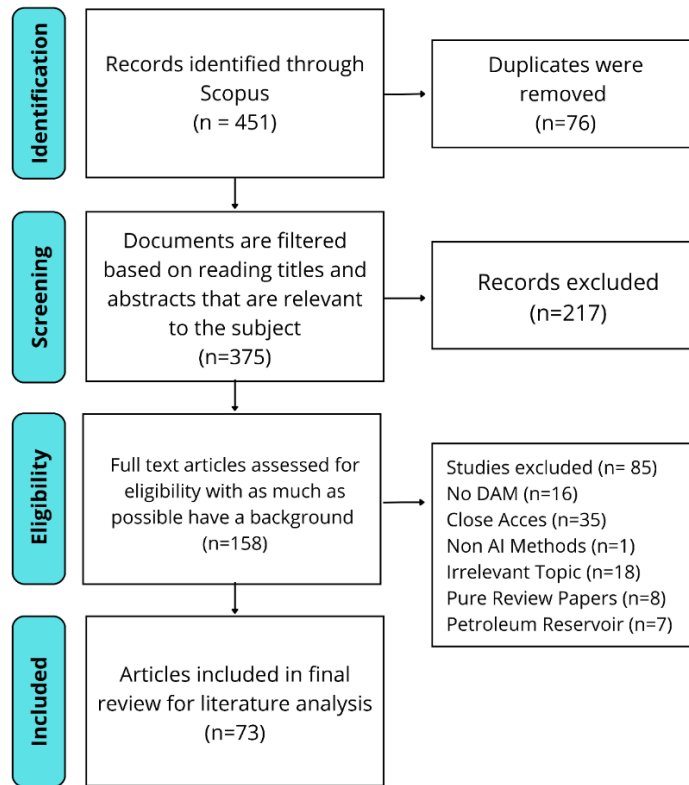
Tabel 2. Inklusi dan Eksklusi Kriteria

Inklusi Kriteria	Eksklusi Kriteria
Artikel membahas penerapan AI pada penelitian atau pengelolaan waduk.	Artikel tidak berkaitan dengan sistem waduk atau sumber daya air.
Artikel berupa jurnal ilmiah atau prosiding konferensi.	Artikel membahas reservoir minyak dan gas (<i>petroleum reservoir</i>).
Artikel tersedia dalam teks lengkap (<i>full-text</i>).	Artikel berupa editorial, book review, atau dokumen non-ilmiah
Artikel terbit pada periode 2015-2026	Artikel tidak menggunakan penerapan AI
Artikel terindeks dalam database Scopus.	Artikel tidak tersedia dalam akses penuh (<i>closed access</i>)

Kriteria inklusi dan eksklusi digunakan untuk memastikan bahwa studi yang dianalisis relevan dengan tujuan penelitian. Kriteria inklusi mencakup artikel yang membahas penerapan *Artificial Intelligence* (AI) pada penelitian atau pengelolaan waduk, baik dalam bentuk jurnal ilmiah maupun *prosiding* konferensi. Artikel yang dipilih harus tersedia dalam teks lengkap, diterbitkan pada periode 2015-2026, serta terindeks dalam basis data Scopus. Kriteria tersebut digunakan untuk mendapatkan sumber literatur yang memiliki kualitas akademik baik dan sesuai dengan perkembangan penelitian terbaru.

Kriteria eksklusi digunakan untuk menyaring artikel yang tidak relevan dengan fokus penelitian. Artikel yang tidak berkaitan dengan sistem waduk akan dikeluarkan dari proses analisis. Penelitian yang membahas *reservoir* minyak dan gas (*petroleum reservoir*) juga tidak digunakan karena memiliki karakteristik berbeda dengan pengelolaan waduk. Dokumen non ilmiah seperti editorial dan *book review* tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini dan artikel yang tidak menggunakan penerapan AI serta artikel yang tidak tersedia dalam akses penuh (*closed acces*) juga dikeluarkan agar proses analisis dapat dilakukan secara komprehensif terhadap isi penelitian.

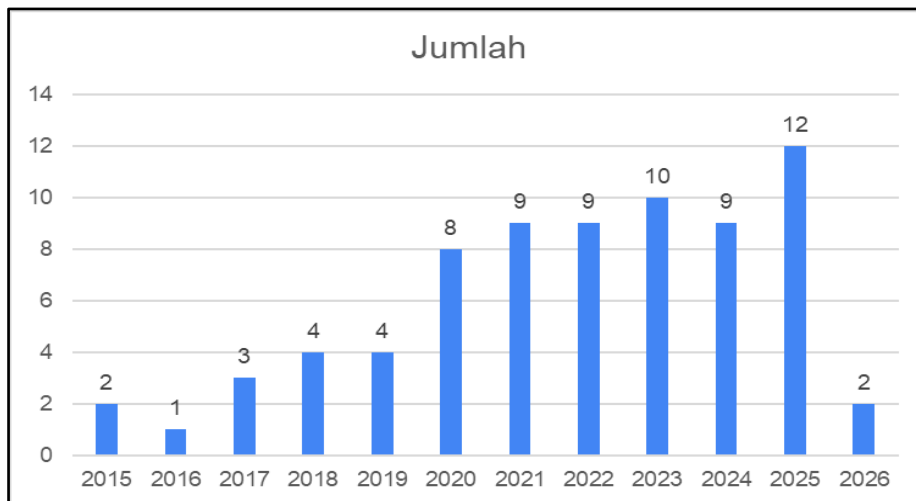
Berdasarkan pencarian awal, diperoleh 451 artikel yang selanjutnya dilakukan proses identifikasi duplikasi dan ditemukan sebanyak 76 artikel duplikat sehingga tersisa 375 artikel untuk tahap *screening*. Sebanyak 217 artikel dinyatakan tidak relevan sehingga tersisa 158 artikel untuk tahap *eligibility* melalui proses pembacaan teks lengkap untuk menilai kesesuaian artikel dengan tujuan penelitian dan kriteria inklusi. Pada tahap ini, sebanyak 85 artikel dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria penelitian. Jumlah akhir artikel yang digunakan dalam proses sintesis dan analisis adalah 73 artikel. Hasil proses seleksi artikel disajikan dalam diagram PRISMA pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Prosedur PRISMA

3. Hasil dan Pembahasan

RQ1. Apa Pola-Pola yang Muncul dalam Penerapan *Artificial Intelligence* (AI) pada Studi Waduk?

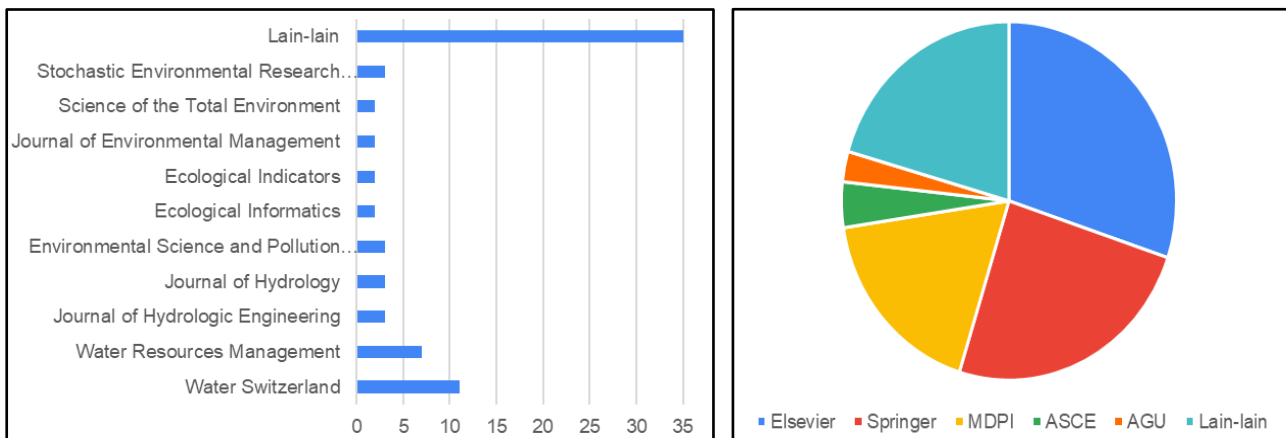


Gambar 2. Tahun Publikasi Penelitian

Berdasarkan tren publikasi yang ditunjukkan oleh Gambar 2, perkembangan penelitian penerapan *Artificial Intelligence* (AI) dalam studi waduk pada periode 2015 - 2019 menunjukkan jumlah publikasi yang relatif

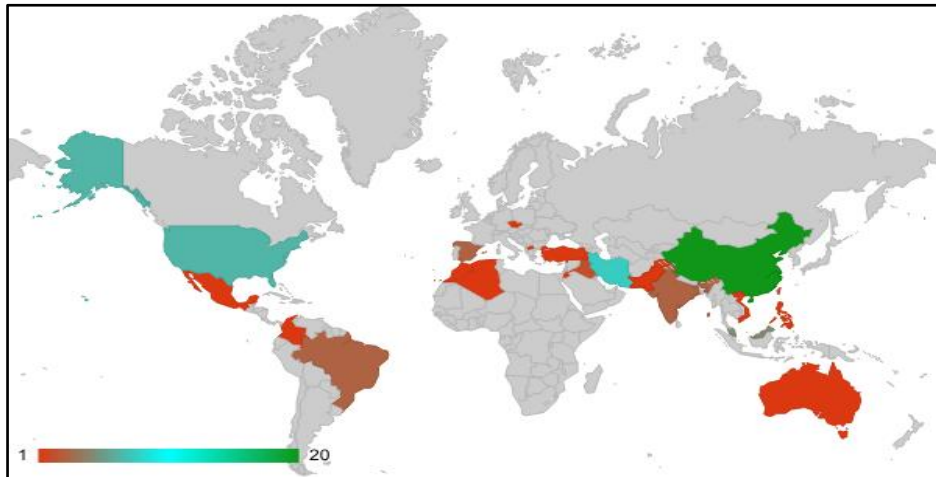
sedikit dengan publikasi terbanyak di tahun 2018 dan 2019 dengan masing-masing 4 publikasi. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian AI pada studi waduk masih belum berkembang secara luas dan penerapannya masih terbatas. Memasuki tahun 2020, jumlah publikasi mulai meningkat secara signifikan dan terus mengalami kenaikan di tahun-tahun berikutnya. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa setelah tahun 2020 penelitian AI dalam studi waduk mulai berkembang lebih masif. Kondisi ini sejalan dengan perkembangan teknologi AI yang semakin pesat dan meningkatnya perhatian AI untuk mendukung pengelolaan waduk secara lebih efektif dan efisien [9].

Jumlah publikasi penelitian terkait penerapan *Artificial Intelligence* (AI) dalam studi waduk didominasi oleh beberapa penerbit utama. *Elsevier* menjadi penerbit dengan jumlah artikel terbanyak, yaitu sebanyak 22 artikel, diikuti oleh *Springer* sebanyak 18 artikel dan MDPI sebanyak 13 artikel. Terdapat publikasi dari ASCE sebanyak 3 artikel dan ACU sebanyak 2 artikel. Sebanyak 15 penerbit lainnya masing-masing mempublikasikan satu artikel sehingga dikelompokkan ke dalam kategori “lain-lain”. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penelitian AI dalam studi waduk banyak dipublikasikan pada penerbit internasional yang berfokus pada jurnal dalam bidang hidrologi, sumber daya air, lingkungan, serta teknologi komputasi. Beberapa jurnal yang cukup sering muncul antara lain *Water Switzerland*, *Water Resources Management*, *Journal of Hydrology*, *Journal of Hydrologic Engineering*, dan *Environmental Science and Pollution Research*



Gambar 3. Distribusi Jurnal Publikasi Penelitian (a), dan Distribusi Penerbit Publikasi Penelitian (b)

Berdasarkan distribusi geografis penelitian, artikel yang dianalisis berasal dari 22 negara. China menjadi negara dengan jumlah publikasi terbanyak, yaitu sebanyak 20 artikel. Iran dan Korea Selatan masing-masing menyumbangkan 8 artikel, diikuti oleh Amerika Serikat sebanyak 7 artikel dan Malaysia sebanyak 5 artikel. Sementara itu, Brazil, India, dan Spanyol masing-masing berkontribusi sebanyak 3 artikel, sedangkan Irak dan Taiwan masing-masing sebanyak 2 artikel. Negara lainnya seperti Algeria, Australia, Filipina, Kolombia, Maroko, Mexico, Makedonia Utara, Pakistan, Republik Ceko, Turki, Vietnam, dan Yordania masing-masing memiliki 1 artikel. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penelitian terkait penerapan *Artificial Intelligence* (AI) dalam studi waduk didominasi oleh negara-negara di kawasan Asia, terutama China, Iran, dan Korea Selatan. Dominasi China dan Iran dalam studi waduk dipengaruhi oleh tantangan yang dihadapi kedua negara dalam ketahanan pangan yang dipicu oleh wilayah yang luas, perubahan iklim, dan kebutuhan sektor pertanian yang sangat besar [10].



Gambar 4. Distribusi Geografis Studi Penelitian

RQ2. Apa Saja Metode *Artificial Intelligence* (AI) yang diterapkan dalam Studi Waduk?

Berdasarkan hasil analisis terhadap 73 artikel, terdapat 89 model penggunaan *Artificial Intelligence* (AI) dalam studi waduk. Metode *Artificial Intelligence* (AI) yang paling banyak digunakan dalam penelitian waduk adalah *Artificial Neural Network* (ANN) dengan total 31 penggunaan. Dominasi ANN menunjukkan bahwa metode berbasis jaringan saraf masih menjadi pendekatan utama dalam pemodelan hidrologi dan pengelolaan waduk karena kemampuannya dalam menangani hubungan nonlinier pada data hidrologi yang kompleks [11]. Metode yang juga banyak digunakan adalah *Support Vector Machine* (SVM) sebanyak 17 penggunaan, *Random Forest* (RF) sebanyak 16 penggunaan, serta *Long Short-Term Memory* (LSTM) dan *Support Vector Regression* (SVR) yang masing-masing digunakan sebanyak 14 kali.

Tabel 3. Penggunaan Jenis *Artificial Intelligence* dalam Penelitian Waduk

Jenis AI	Jumlah
<i>Artificial Neural Network</i> (ANN)	31
<i>Support Vector Machine</i> (SVM)	17
<i>Random Forest</i> (RF)	16
<i>Long Short-Term Memory</i> (LSTM)	14
<i>Support Vector Regression</i> (SVR)	14
<i>Convolutional Neural Network</i> (CNN)	10
<i>Deep Neural Network</i> (DNN)	9
<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i> (ANFIS)	8
<i>Extreme Gradient Boosting</i> (XGBoost)	7
<i>Multilayer Perceptron</i> (MLP)	7
<i>Extreme Learning Machine</i> (ELM)	6
<i>K-Nearest Neighbors</i> (KNN)	6
<i>AdaBoost Regression</i> (ABR)	5
<i>Gated Recurrent Unit</i> (GRU)	5
<i>Machine Learning</i> (ML)	4
<i>Radial Basis Function</i> (RBF)	4
<i>Classification and Regression Tree</i> (CART)	3
<i>Genetic Algorithm</i> (GA)	3
<i>Recurrent Neural Network</i> (RNN)	3
<i>Shapley Additive Explanations</i> (SHAP)	3



Jenis AI	Jumlah
<i>Autoencoder</i>	2
<i>Bayesian Ridge Regression (BRR)</i>	2
<i>CatBoost (gradient boosting)</i>	2
<i>Decision Tree Regression (DTR)</i>	2
<i>Elastic Net (EN)</i>	2
<i>Extra Trees Regression (ETR)</i>	2
<i>Gradient Boosting Machine (GBM)</i>	2
<i>Gradient Boosting Regression (GBR)</i>	2
<i>Lasso Regression</i>	2
<i>Nonlinear Autoregressive Exogenous (NARX)</i>	2
<i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i>	2
<i>Quantum-behaved Particle Swarm Optimization (QPSO)</i>	2
<i>Shark Machine Learning Algorithm (SMLA)</i>	2
<i>Backpropagation Neural Network (BP Neural Network)</i>	1
<i>Basic Recurrent Neural Network (bRNN)</i>	1
<i>Bayesian Model Averaging (BMA)</i>	1
<i>Bayesian Neural Network (BNN)</i>	1
<i>Bidirectional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM)</i>	1
<i>Boosted Regression Trees (BT)</i>	1
<i>Boruta Feature Selection Algorithm</i>	1
<i>bRNN–CNN–GRU</i>	1
<i>Clustering-based AI (density-based clustering algorithm)</i>	1
<i>Cultural Algorithm (CA)</i>	1
<i>Decision Tree (DT)</i>	1
<i>Deep Restricted Boltzmann Machine (DRBM)</i>	1
<i>Deep Reinforcement Learning (DRL)</i>	1
<i>Deep NPTS, N-BEATS, NHITS</i>	1
<i>Edited Nearest Neighbor (ENN)</i>	1
<i>Elman Recurrent Neural Network</i>	1
<i>Encoder–Decoder LSTM</i>	1
<i>Evolutionary Algorithms</i>	1
<i>Extremely Randomized Tree (ERT)</i>	1
<i>Feed Forward Neural Network (FFNN)</i>	1
<i>Functional ANOVA</i>	1
<i>Fuzzy Model (Learning Fuzzy Model)</i>	1
<i>Gamma Test</i>	1
<i>Genetic Programming (GP)</i>	1
<i>Gneural Network (GNU)</i>	1
<i>Graph Neural Network (GNN)</i>	1
<i>GRU–LSTM</i>	1
<i>Heuristic Policy Search</i>	1
<i>Improved Extreme Learning Machine (IELM)</i>	1
<i>Improved Wasserstein Generative Adversarial Network</i>	1
<i>Improved Whale Optimization Algorithm (IWOA)</i>	1
<i>Information self-learning system (self-organizing AI)</i>	1
<i>Integrated Nested Laplace Approximation (INLA)</i>	1
<i>Linear Regression (LR)</i>	1
<i>Logistic Regression (LR)</i>	1
<i>Meta-heuristic Algorithms</i>	1
<i>Multilinear Regression (MLR)</i>	1



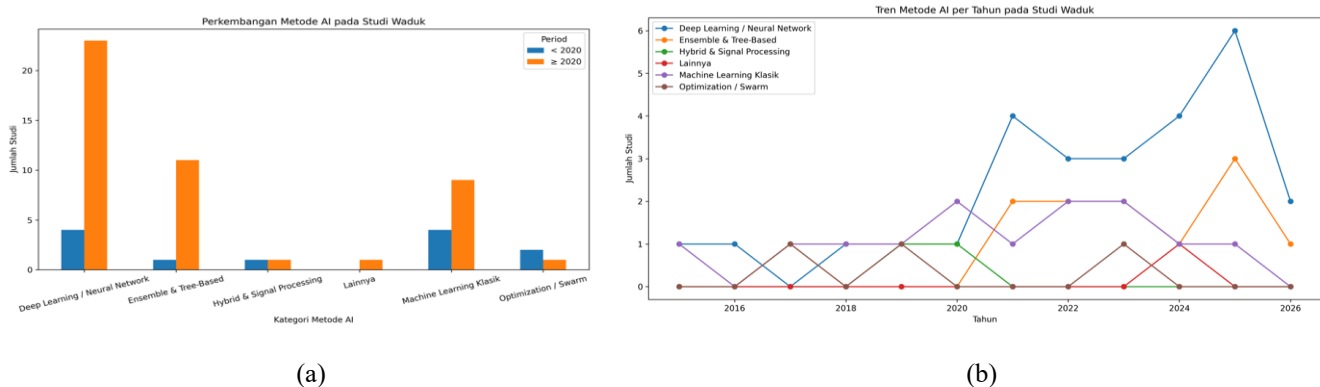
Jenis AI	Jumlah
<i>Partial Dependence Plots (PDPs)</i>	1
<i>Physics-Informed Neural Network (MF-PINN)</i>	1
<i>Polynomial Regression</i>	1
<i>Regression Tree (RT)</i>	1
<i>Regularized Extreme Learning Machine (RELM)</i>	1
<i>Residual Networks (ResNet)</i>	1
<i>Ridge Regression (RR)</i>	1
<i>Self-Organizing Map (SOM)</i>	1
<i>Shallow Neural Network (SNN)</i>	1
<i>SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique)</i>	1
<i>Stacked Autoencoder (SAE)</i>	1
<i>Swarm Intelligence (SI)</i>	1
<i>Teaching-Learning Based Optimization (TLBO)</i>	1
<i>Temporal Convolutional Network (TCN)</i>	1
<i>Temporal Fusion Transformer (TFT)</i>	1
<i>Time-series Dense Encoder</i>	1
<i>Transformer (machine learning)</i>	1
<i>Variational Mode Decomposition (VMD)</i>	1
<i>Wavelet Neural Network (WNN)</i>	1

Penelitian terkait waduk juga menunjukkan peningkatan penggunaan metode berbasis *deep learning*, seperti *Convolutional Neural Network (CNN)* sebanyak 10 penggunaan dan *Deep Neural Network (DNN)* sebanyak 9 penggunaan. Metode *hybrid* dan *fuzzy-based AI* seperti *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)* juga cukup banyak digunakan dengan total 8 penggunaan. Beberapa metode lain seperti *Extreme Gradient Boosting (XGBoost)*, *Multilayer Perceptron (MLP)*, *Extreme Learning Machine (ELM)*, dan *K-Nearest Neighbors (KNN)* turut digunakan dalam berbagai penelitian untuk meningkatkan akurasi prediksi dan optimasi sistem waduk [12].

Berbagai metode AI yang muncul dengan frekuensi rendah, seperti *Graph Neural Network (GNN)* [3], *Deep Reinforcement Learning (DRL)*, *Transformer*, *Temporal Fusion Transformer (TFT)* [4], hingga *Physics-Informed Neural Network (PINN)*. Meskipun penggunaannya masih terbatas, kemunculan metode-metode tersebut menunjukkan bahwa penelitian AI pada kajian waduk terus berkembang menuju pendekatan yang lebih kompleks dan adaptif. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode berbasis *machine learning* dan *deep learning* mendominasi penelitian waduk, khususnya untuk kebutuhan prediksi hidrologi, pengoperasian waduk, serta monitoring kondisi sedimen [13].

Perkembangan metode *Artificial Intelligence (AI)* dalam studi waduk menunjukkan perubahan antara periode sebelum tahun 2020 dan setelah tahun 2020. Pada periode sebelum tahun 2020, penelitian masih didominasi oleh metode AI konvensional atau *machine learning* klasik seperti *Artificial Neural Network (ANN)*, *Support Vector Machine (SVM)*, *Self-Organizing Map (SOM)*, *Wavelet Neural Network (WNN)*, serta beberapa metode berbasis optimasi seperti *Shark Algorithm* dan *Swarm Machine Learning Algorithm (SMLA)*. Setelah tahun 2020, terjadi peningkatan yang signifikan dalam penerapan metode *deep learning* dan *ensemble learning* pada studi waduk. Metode seperti *Long Short-Term Memory (LSTM)*, *Graph Neural Network (GNN)*, *Basic Recurrent Neural Network (bRNN)*, serta *Generative Adversarial Network (GAN)* mulai banyak digunakan, khususnya untuk prediksi berbasis *time-series* seperti prediksi banjir, debit aliran, sedimentasi [13], dan pengelolaan kualitas air waduk secara *real-time* [14]. Selain itu, metode *ensemble learning* seperti *Random Forest (RF)*, *Extreme Gradient Boosting (XGBoost)*, juga menunjukkan peningkatan penggunaan karena memiliki tingkat akurasi dan stabilitas model yang lebih baik dibanding metode konvensional [12].

Perkembangan tersebut menunjukkan adanya pergeseran tren penelitian dari penggunaan AI konvensional menuju AI yang lebih kompleks dan adaptif. Jika sebelum tahun 2020 penelitian lebih berfokus pada pemodelan statistik dan *machine learning* dasar, maka setelah tahun 2020 penelitian mulai mengarah pada integrasi *deep learning*, optimasi cerdas, serta *hybrid modeling* untuk mendukung pengelolaan waduk yang lebih presisi dan berbasis data besar (*big data*). Di antara berbagai metode yang ditemukan, LSTM menjadi salah satu metode yang paling dominan pada penelitian terbaru karena dinilai paling efektif dalam menangani pola data hidrologi yang bersifat temporal dan dinamis [15].



Gambar 5. Perkembangan Metode Artificial Intelligence (a), Tren Metode Artificial Intelligence pada Studi Waduk

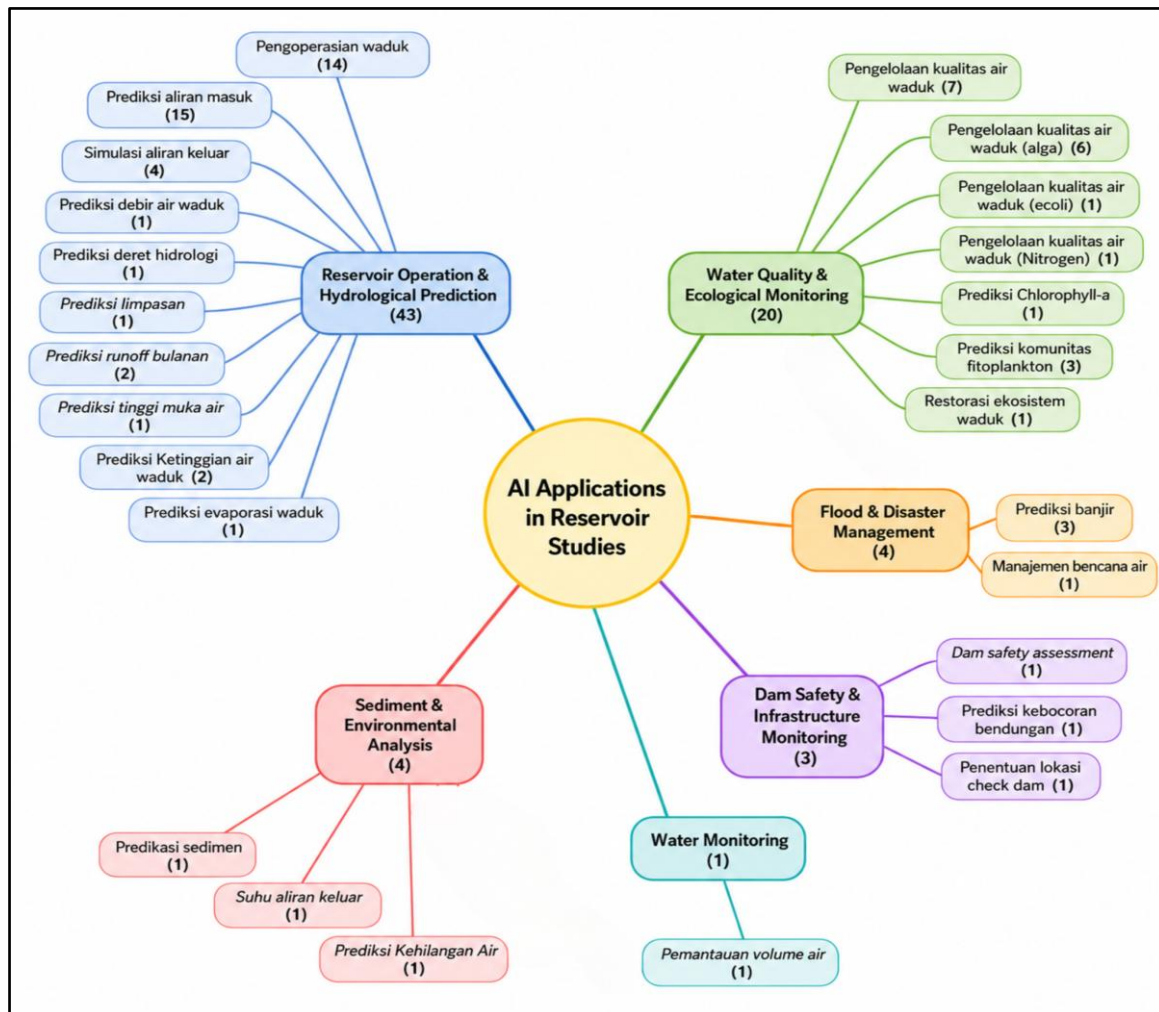
RQ3. Apa Saja Bidang Penerapan Utama Artificial Intelligence (AI) dalam Studi Waduk?

Penerapan Artificial Intelligence (AI) dalam studi waduk didominasi oleh bidang *Reservoir Operation & Hydrological Prediction*, khususnya pada prediksi aliran masuk (15) dan pengoperasian waduk (14). AI juga banyak diterapkan pada *Water Quality & Ecological Monitoring* untuk pengelolaan kualitas air (7), prediksi *chlorophyll-a* (1), dan analisis komunitas fitoplankton (3). Beberapa penelitian lainnya berfokus pada *Flood & Disaster Management*, *Dam Safety*, *Infrastructure Monitoring*, serta *Sediment & Environmental Analysis*. Visualisasi pada Gambar 6 memperlihatkan bahwa penggunaan AI dalam studi waduk berkembang secara multidisiplin, mulai dari aspek hidrologi, kualitas lingkungan, mitigasi bencana, dan keamanan infrastruktur bendungan.

Pada bidang *Reservoir Operation & Hydrological Prediction*, penerapan AI menjadi yang paling dominan dibanding bidang lainnya dengan total 43 penelitian dari total 73 studi yang dianalisis. Aktivitas penelitian pada kategori ini meliputi prediksi aliran masuk (20,5%), pengoperasian waduk (19,2%), simulasi aliran keluar (5,5%), prediksi *runoff* bulanan (2,7%), serta beberapa aplikasi prediksi deret hidrologi lainnya. Prediksi aliran masuk dan pengoperasian waduk menjadi topik yang paling dominan karena memiliki peran dalam pengelolaan sumber daya air dan pengambilan keputusan operasional waduk. Pengoperasian waduk berfokus pada optimasi distribusi dan pelepasan air, sedangkan prediksi hidrologi bertujuan untuk memperkirakan kondisi hidrologi di masa mendatang [16]. Selain itu, meningkatnya penggunaan metode AI, khususnya pendekatan *deep learning* seperti *Long Short-Term Memory* (LSTM), menunjukkan adanya perkembangan penelitian menuju model berbasis *time-series* yang mampu meningkatkan akurasi prediksi dan mendukung pengelolaan waduk secara *real-time* pada kondisi hidrologi yang dinamis [17].

Sebanyak 20 dari 73 studi yang dianalisis termasuk ke dalam bidang *Water Quality & Ecological Monitoring*. Aktivitas penelitian pada kategori ini meliputi pengelolaan kualitas air waduk (9,6%), pengelolaan kualitas air berbasis alga (8,2%), prediksi komunitas fitoplankton (4,1%), serta beberapa topik lain. Bidang ini menjadi salah satu fokus dalam studi waduk karena kualitas air dan kondisi ekologi waduk sangat mempengaruhi keberlanjutan sumber daya air, kesehatan ekosistem, serta pemanfaatan waduk untuk kebutuhan domestik, pertanian, dan energi [18]. Penerapan AI pada kategori ini digunakan untuk mendeteksi perubahan kualitas air, memprediksi pertumbuhan alga, serta memantau kondisi ekologis waduk secara lebih

cepat dan akurat. Perkembangan metode *deep learning* dan *machine learning* juga memungkinkan analisis kualitas air berbasis data sensor dan citra penginderaan jauh secara *real-time* [6].



Gambar 6. Studi Domain Penerapan Artificial Intelligence pada Penelitian Waduk

Bidang *Flood & Disaster Management* ditemukan sebanyak 4 penelitian dari total 73 studi yang dianalisis. Aktivitas penelitian pada kategori ini didominasi oleh prediksi banjir (4,1%), sementara sebagian kecil lainnya berfokus pada manajemen bencana air (1,4%). Jumlah penelitian pada bidang ini masih relatif terbatas dibanding kategori lainnya, penerapan AI pada manajemen banjir dan bencana hidrologi menunjukkan potensi yang besar dalam mendukung sistem peringatan dini dan mitigasi risiko bencana [19]. Metode AI digunakan untuk menganalisis pola hidrologi, curah hujan, debit aliran, serta kondisi lingkungan secara cepat dan adaptif guna meningkatkan akurasi prediksi kejadian banjir.

Terdapat 3 penelitian yang termasuk dalam kategori *Sediment & Environmental Analysis* dari total 73 studi yang dianalisis. Kajian pada kategori ini mencakup prediksi sedimen (1,4%), analisis suhu aliran keluar (1,4%), dan prediksi kehilangan air (1,4%). Penelitian pada kategori ini masih tergolong terbatas dibandingkan topik lainnya, tetapi penerapan AI dalam analisis sedimen dan lingkungan memberikan kontribusi terhadap pengelolaan waduk yang berkelanjutan [20]. Prediksi sedimen dimanfaatkan untuk mengidentifikasi potensi pendangkalan waduk yang dapat mempengaruhi kapasitas tampung dan operasional waduk. Analisis suhu



aliran keluar serta kehilangan air mendukung evaluasi kondisi lingkungan dan efisiensi pemanfaatan sumber daya air.

Kategori *Dam Safety & Infrastructure Monitoring* mencakup 3 penelitian dari total 73 studi yang dianalisis. Aktivitas penelitian pada kategori ini meliputi *dam safety assessment* (1,4%), prediksi kebocoran bendungan (1,4%), dan penentuan lokasi *check dam* (1,4%). Jumlah penelitian pada bidang ini masih terbatas, penerapan AI dalam keamanan bendungan dan pemantauan infrastruktur menunjukkan potensi yang penting dalam mendukung pengelolaan bendungan secara lebih aman dan efisien. Metode AI digunakan untuk mendeteksi potensi kerusakan, memprediksi risiko kebocoran, serta membantu pengambilan keputusan dalam perencanaan infrastruktur pengendali air [21]. Selain itu, kemampuan AI dalam menganalisis data secara cepat dan otomatis memungkinkan proses *monitoring* bendungan dilakukan secara lebih akurat dan berkelanjutan.

Pada bidang *Water Monitoring*, ditemukan hanya 1 penelitian dari total 73 studi yang dianalisis dengan fokus pada pemantauan volume air (1,4%). Kajian pada kategori ini menunjukkan bahwa pemanfaatan AI dalam *monitoring* air masih belum banyak dikembangkan [22], penerapan AI dalam pemantauan air menunjukkan potensi penting dalam mendukung pengelolaan sumber daya air secara *real-time*. Metode AI digunakan untuk memantau perubahan volume air secara lebih cepat dan akurat, sehingga dapat membantu proses pengambilan keputusan terkait distribusi air, pengendalian kekeringan, dan operasional waduk. Perkembangan teknologi sensor dan integrasi AI memungkinkan sistem *monitoring* air menjadi lebih adaptif terhadap perubahan kondisi hidrologi dan lingkungan.

RQ4. Apa Kesenjangan Penelitian Saat ini dan Peluang Penelitian Masa Depan dalam Studi Waduk?

Hasil sintesis menunjukkan bahwa penelitian *Artificial Intelligence* (AI) pada kajian waduk didominasi oleh pendekatan prediktif, seperti prediksi *inflow*, *outflow*, kualitas air, eutrofikasi, *harmful algal blooms*, dan evaporasi. Meskipun perkembangan model *machine learning* dan *deep learning* mengalami peningkatan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada peningkatan akurasi prediksi dan belum banyak mengembangkan sistem pengambilan keputusan otomatis berbasis AI secara *real-time* [9]. Sebagian besar model hanya digunakan pada tahap simulasi dan *forecasting*, sehingga pemanfaatannya dalam *adaptive reservoir management*, sistem kontrol otomatis, maupun rekomendasi kebijakan berbasis AI masih belum optimal [23]. Penelitian berikutnya memiliki peluang besar untuk mengembangkan *AI-driven reservoir governance*, *real-time adaptive control*, *intelligent early warning systems*, serta penerapan *reinforcement learning* untuk mendukung operasi waduk yang lebih dinamis, efisien, dan responsif terhadap perubahan kondisi hidrologi dan iklim.

Kesenjangan lain yang ditemukan adalah tingginya ketergantungan model *machine learning* dan *deep learning* terhadap data historis seperti *time series* hidrologi, data meteorologi serta *monitoring* kualitas air [11], [24], [25]. Permasalahan muncul karena tidak semua waduk memiliki ketersediaan data yang memadai, khususnya di negara berkembang yang memiliki keterbatasan data berupa *missing values*, *data imbalance*, kualitas sensor rendah, dan periode observasi yang pendek [7], [23]. Akibatnya, banyak model bersifat *site-specific* dan belum mampu digeneralisasi secara optimal pada waduk dengan karakteristik yang berbeda. Sementara itu, penelitian yang berfokus pada kualitas air, dinamika ekosistem, biodiversitas perairan, dan kesehatan lingkungan waduk masih relatif terbatas. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penerapan AI pada studi waduk belum banyak mengintegrasikan aspek ekologi dan lingkungan secara komprehensif [23]. Penelitian masa depan memiliki peluang besar untuk mengembangkan pendekatan *ecological reservoir AI*, *ecosystem monitoring*, serta analisis dampak perubahan iklim terhadap kondisi ekologis waduk melalui integrasi AI, sensor lingkungan, dan data penginderaan jauh guna mendukung pengelolaan waduk yang lebih berkelanjutan.

Sebagian besar penelitian *reservoir* berbasis *Artificial Intelligence* (AI) masih menggunakan pendekatan *black-box machine learning* seperti ANN, LSTM, RF, SVM, CNN, dan XGBoost yang berfokus pada hubungan statistik data tanpa mengintegrasikan proses fisik hidrologi dan hidrodinamika secara memadai. Kondisi ini menyebabkan model sering sulit diinterpretasikan, kurang mampu merepresentasikan mekanisme fisik sistem perairan, serta berpotensi menghasilkan prediksi yang tidak realistis pada kondisi ekstrem maupun wilayah dengan karakteristik berbeda [3]. Hasil sintesis menunjukkan bahwa integrasi antara AI dan model



fisik, seperti *Physics-Informed Neural Networks* (PINNs), *hybrid hydrological-AI models*, dan *digital twin reservoir systems*, masih sangat terbatas, padahal pendekatan tersebut berpotensi meningkatkan akurasi, interpretabilitas, dan reliabilitas model dalam pengelolaan waduk yang adaptif dan berkelanjutan [26].

Penelitian AI pada studi waduk masih berfokus pada penggunaan data hidrologi, meteorologi, dan kualitas air, sementara dinamika waduk sesungguhnya dipengaruhi oleh berbagai faktor lain seperti perubahan tata guna lahan, aktivitas manusia, kondisi sosial ekonomi, operasi bendungan, urbanisasi, dan perubahan iklim [27]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian masih menggunakan pendekatan sektoral dan belum banyak mengembangkan analisis multidisiplin yang mampu merepresentasikan kompleksitas sistem waduk secara menyeluruh. Padahal, perubahan penggunaan lahan dan urbanisasi dapat memengaruhi pola limpasan, sedimentasi, serta kualitas air waduk, sedangkan faktor sosial ekonomi dan operasional bendungan turut menentukan pola pemanfaatan dan distribusi sumber daya air [28].

Hasil sintesis menunjukkan bahwa penelitian AI pada studi waduk masih didominasi oleh negara-negara seperti China, Iran, Korea Selatan, India, dan Amerika Serikat, sedangkan kontribusi dari negara berkembang lain, termasuk Indonesia, masih relatif terbatas. Kondisi ini menyebabkan rendahnya representasi karakteristik waduk di wilayah tropis, monsun, kepulauan, serta sistem sosial-ekologis negara berkembang dalam pengembangan model AI. Padahal, Indonesia memiliki potensi penelitian yang sangat besar terkait waduk tropis, sedimentasi, eutrofikasi, bendungan multiguna, ketahanan iklim (*climate resilience*), dan *smart water governance* [29]. Kesenjangan penelitian yang perlu diisi dengan memperluas cakupan geografis studi agar pengembangan model AI menjadi lebih representatif, adaptif, dan sesuai dengan kondisi lingkungan serta tata kelola waduk di negara berkembang.

Kajian AI pada studi waduk umumnya masih menitikberatkan pada aspek teknis dan peningkatan akurasi model, sementara integrasi antara AI dan konsep keberlanjutan masih relatif terbatas. Hasil analisa menunjukkan bahwa hanya sedikit penelitian yang mengaitkan pengelolaan waduk berbasis AI dengan isu strategis seperti SDGs, ketahanan pangan, ketahanan energi, ketahanan air, maupun *socio-ecological resilience* [25]. Padahal, waduk memiliki peran penting dalam mendukung sistem lingkungan dan pembangunan berkelanjutan [30]. Pengembangan kajian AI pada studi waduk perlu diarahkan pada *sustainable reservoir intelligence*, *climate adaptation framework*, pendekatan *water-energy-food nexus*, serta pemodelan keberlanjutan ekologi untuk mendukung pengelolaan waduk yang lebih adaptif, terintegrasi, dan berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil sintesis terhadap 73 artikel, penelitian mengenai penerapan *Artificial Intelligence* (AI) pada studi waduk menunjukkan tren peningkatan yang signifikan, terutama setelah tahun 2020. Metode AI yang paling banyak digunakan adalah *Artificial Neural Network* (ANN), *Long Short-Term Memory* (LSTM), *Support Vector Machine* (SVM), dan *Random Forest* (RF). Penerapan AI didominasi pada bidang *Reservoir Operation & Hydrological Prediction*, khususnya untuk prediksi aliran masuk, pengoperasian waduk, dan *monitoring* kualitas air. Selain itu, penelitian didominasi oleh negara China dan Iran yang memiliki tantangan pengelolaan sumber daya air yang tinggi. Hasil sintesis juga menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada pendekatan prediktif berbasis data historis, sedangkan pengembangan sistem pengambilan keputusan, integrasi aspek ekologis, serta pendekatan multidisiplin berbasis spasial dan keberlanjutan masih terbatas. Di sisi lain, kontribusi penelitian dari negara berkembang, termasuk Indonesia, masih relatif rendah meskipun memiliki karakteristik waduk tropis dan permasalahan sumber daya air yang kompleks. Pengembangan model AI yang lebih adaptif, terintegrasi, dan mendukung pengelolaan waduk berkelanjutan, serta perluasan penelitian pemanfaatan AI pada waduk tropis di Indonesia, menjadi peluang penelitian yang menjanjikan di masa mendatang.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen dan rekan sejawat yang telah mendukung proses penyusunan penelitian ini, baik dalam bentuk dukungan akademik, penyediaan referensi, maupun bantuan



selama proses pengumpulan dan analisis data. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para peneliti terdahulu yang menjadi sumber utama dalam proses sintesis literatur pada penelitian ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan kajian *Artificial Intelligence* (AI) dalam studi waduk yang berkelanjutan.

Referensi

- [1] C. Zarfl, A. E. Lumsdon, J. Berlekamp, L. Tydecks, and K. Tockner, "A global boom in hydropower dam construction," *Aquat. Sci.*, vol. 77, no. 1, pp. 161–170, Jan. 2015, doi: 10.1007/s00027-014-0377-0.
- [2] A. Soria-Lopez, C. Sobrido-Pouso, J. C. Mejuto, and G. Astray, "Assessment of Different Machine Learning Methods for Reservoir Outflow Forecasting," *Water*, vol. 15, no. 19, p. 3380, Sep. 2023, doi: 10.3390/w15193380.
- [3] C. Deng and X. Li, "Towards Intelligent Water Disaster Defense: A Unified Digital Twin Framework Integrating Physics-Informed AI for Flood Prediction, Assessment, and Mitigation," in *Proceedings of the 2025 3rd International Conference on Internet of Things and Cloud Computing Technology*, Haikou China: ACM, Sep. 2025, pp. 134–142. doi: 10.1145/3776865.3776889.
- [4] R. N. Muniz *et al.*, "Time series forecasting based on multi-criteria optimization for model and filter selection applied to hydroelectric power plants," *Energy*, vol. 337, p. 138688, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.138688.
- [5] J. A. Silva, "AI Solutions for Improving Sustainability in Water Resource Management," *Sustainability*, vol. 18, no. 4, p. 2154, Feb. 2026, doi: 10.3390/su18042154.
- [6] M. Mamun, M. Hasan, and K.-G. An, "Advancing reservoirs water quality parameters estimation using Sentinel-2 and Landsat-8 satellite data with machine learning approaches," *Ecol. Inform.*, vol. 81, p. 102608, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ecoinf.2024.102608.
- [7] M. M. Hameed, M. K. AlOmar, A. A. Al-Saadi, and M. A. AlSaadi, "Inflow forecasting using regularized extreme learning machine: Haditha reservoir chosen as case study," *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 36, no. 12, pp. 4201–4221, Dec. 2022, doi: 10.1007/s00477-022-02254-7.
- [8] M. Ibrahim, Z. Mustafa, A. Balogun, and ..., "Landslide's analysis and Hazard mapping based on ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) using GIS, in Lawas, Sabah-Sarawak," ... *Ser. Earth ...*, no. Query date: 2026-04-23 21:28:41, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1064/1/012031.
- [9] S. Z. Farzana, D. R. Paudyal, S. Chadalavada, and M. J. Alam, "Decision Support Framework for Water Quality Management in Reservoirs Integrating Artificial Intelligence and Statistical Approaches," *Water*, vol. 16, no. 20, p. 2944, Oct. 2024, doi: 10.3390/w16202944.
- [10] E. Huang *et al.*, "Historical Data Set of Reservoir Construction in Arid Regions," 2024, *SSRN*. doi: 10.2139/ssrn.4890345.
- [11] E. Vasheghani Farahani, A. R. Massah Bavani, and A. Roozbahani, "Enhancing reservoir inflow forecasting precision through Bayesian Neural Network modeling and atmospheric teleconnection pattern analysis," *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 39, no. 1, pp. 205–229, Jan. 2025, doi: 10.1007/s00477-024-02858-1.
- [12] K. S. M. H. Ibrahim, Y. F. Huang, A. N. Ahmed, C. H. Koo, and A. El-Shafie, "Forecasting multi-step-ahead reservoir monthly and daily inflow using machine learning models based on different scenarios," *Appl. Intell.*, vol. 53, no. 9, pp. 10893–10916, May 2023, doi: 10.1007/s10489-022-04029-7.
- [13] M. B. Idrees, M. Jehanzaib, D. Kim, and T.-W. Kim, "Comprehensive evaluation of machine learning models for suspended sediment load inflow prediction in a reservoir," *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 35, no. 9, pp. 1805–1823, Sep. 2021, doi: 10.1007/s00477-021-01982-6.
- [14] J.-S. Chou, C.-C. Ho, and H.-S. Hoang, "Determining quality of water in reservoir using machine learning," *Ecol. Inform.*, vol. 44, pp. 57–75, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ecoinf.2018.01.005.
- [15] S. D. Latif, A. N. Ahmed, E. Sathiamurthy, Y. F. Huang, and A. El-Shafie, "Evaluation of deep learning algorithm for inflow forecasting: a case study of Durian Tunggal Reservoir, Peninsular Malaysia," *Nat. Hazards*, vol. 109, no. 1, pp. 351–369, Oct. 2021, doi: 10.1007/s11069-021-04839-x.



- [16] W. Niu, Z. Feng, C. Cheng, and J. Zhou, "Forecasting Daily Runoff by Extreme Learning Machine Based on Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 23, no. 3, p. 04018002, Mar. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001625.
- [17] J. Sung, S. Jang, T. Kim, and B. Kang, "ConvLSTM-Based Surrogate Modeling for Flood Inflow Prediction at Nangang Dam," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 31, no. 1, p. 04025056, Feb. 2026, doi: 10.1061/JHYEFF.HEENG-6608.
- [18] S. Tian *et al.*, "Remote sensing retrieval of inland water quality parameters using Sentinel-2 and multiple machine learning algorithms," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 7, pp. 18617–18630, Oct. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-23431-9.
- [19] S. Xue, J. Chen, S. Li, and H. Huang, "Research on Downstream Safety Risk Warning Model for Small Reservoirs Based on Granger Probabilistic Radial Basis Function Neural Network," *Water*, vol. 16, no. 1, p. 130, Dec. 2023, doi: 10.3390/w16010130.
- [20] Y. Lu, Y. Tuo, H. Xia, L. Zhang, M. Chen, and J. Li, "Prediction model of the outflow temperature from stratified reservoir regulated by stratified water intake facility based on machine learning algorithm," *Ecol. Indic.*, vol. 154, p. 110560, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110560.
- [21] S. S. Band *et al.*, "Using computational-intelligence algorithms and remote sensing data to optimize the locations of check dams to control sediment and runoff in Kandulus watershed, Mazandaran, Iran," *Geocarto Int.*, vol. 37, no. 26, pp. 12966–12988, Dec. 2022, doi: 10.1080/10106049.2022.2076909.
- [22] L. C. González-Márquez, I. R. Hansen-Rodríguez, R. Ahumada-Cervantes, and F. M. Torres-Bejarano, "Estimation of dam water volume in northern Sinaloa, Mexico using Landsat imagery and artificial intelligence models," *Adv. Space Res.*, vol. 77, no. 1, pp. 410–421, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.asr.2025.09.101.
- [23] D. Jovem-Azevêdo, J. F. Bezerra-Neto, J. Molozzi, and M. J. Feio, "Rehabilitation scenarios for reservoirs: Predicting their effect on invertebrate communities through machine learning," *River Res. Appl.*, vol. 36, no. 7, pp. 1109–1123, Sep. 2020, doi: 10.1002/rra.3641.
- [24] E. Abdi, M. Taghi Sattari, A. Milewski, and O. R. Ibrahim, "Advancements in Hydrological Modeling: The Role of bRNN-CNN-GRU in Predicting Dam Reservoir Inflow Patterns," *Water*, vol. 17, no. 11, p. 1660, May 2025, doi: 10.3390/w17111660.
- [25] H.-Y. Lin, S.-H. Lee, J.-H. Wang, and M.-J. Chang, "Utilizing Artificial Intelligence Techniques for a Long-Term Water Resource Assessment in the ShihMen Reservoir for Water Resource Allocation," *Water*, vol. 16, no. 16, p. 2346, Aug. 2024, doi: 10.3390/w16162346.
- [26] M. T. Sattari, E. Athari, and M. T. Aalami, "Comparison of N-BEATS with Standalone and Hybrid Deep Learning Models in Monthly Inflow Forecasting to the Aras Dam Reservoir: A Feature Selection Analysis," *J. Agric. Sci.*, vol. 31, no. 3, pp. 747–766, Jul. 2025, doi: 10.15832/ankutbd.1603391.
- [27] Y. Huang, W. Lin, S. Li, and Y. Ning, "Social Impacts of Dam-Induced Displacement and Resettlement: A Comparative Case Study in China," *Sustainability*, vol. 10, no. 11, p. 4018, Nov. 2018, doi: 10.3390/su10114018.
- [28] L. Hommes, J. Hoogesteger, and R. Boelens, "(Re)making hydrosocial territories: Materializing and contesting imaginaries and subjectivities through hydraulic infrastructure," *Polit. Geogr.*, vol. 97, p. 102698, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.polgeo.2022.102698.
- [29] C. S. R. Rahmi, L. Nitami, W. Wahdini, F. Firdus, M. Nasir, and A. Rizki, "Eutrophication in Indonesian Aquatic Systems: Causes and Ecological Consequences," *J. Biol. Trop.*, vol. 26, no. 2, pp. 617–625, May 2026, doi: 10.29303/jbt.v26i2.11841.
- [30] Z. Guo, W. J. Boeing, E. Borgomeo, Y. Xu, and Y. Weng, "Linking reservoir ecosystems research to the sustainable development goals," *Sci. Total Environ.*, vol. 781, p. 146769, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146769.