

PENGEMBANGAN MODEL MACHINE LEARNING UNTUK PREDIKSI KEHILANGAN ENERGI PADA SALURAN BERTINGKAT BERDASARKAN PARAMETER HIDRAULIK

Ferawati Artauli Hasibuan^{1*)}, Ary Abdillah Hasibuan²⁾, Nabil Rohit³⁾.

¹⁾²⁾³⁾ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Graha Nusantara, Padangsidimpuan, Sumatera Utara, Indonesia

*e-mail: ferawati.fa@gmail.com

(Received 16 Juni 2023, Accepted 16 Juli 2026)

Abstract

Energy dissipation in stepped channels is an important parameter in the design of hydraulic structures because it affects flow efficiency, structural stability, and scour control in downstream areas. Energy loss is commonly estimated using empirical equations or hydraulic analyses, which often require considerable computational effort and time. Therefore, this study aims to develop a Machine Learning model to predict energy loss in stepped channels based on hydraulic parameters. The study utilized experimental data consisting of discharge, channel width, drop height, upstream flow depth, upstream flow velocity, Froude number, downstream flow depth, and downstream flow velocity as input variables, while energy loss was used as the output variable. The research methodology included data preprocessing, data splitting into 80% training data and 20% testing data, and model development using four Machine Learning algorithms, namely Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Regression (SVR), Random Forest (RF), and Gradient Boosting (GB). Model performance was evaluated using Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and the coefficient of determination (R^2). The results showed that the Gradient Boosting algorithm achieved the best performance, with an RMSE of 0.0214, an MAE of 0.0139, and an R^2 of 0.9372, indicating that the model explained approximately 93.72% of the variation in energy loss. The Actual versus Predicted Scatter Plot also demonstrated a high level of agreement between predicted and observed values. These findings indicate that the Gradient Boosting algorithm provides an accurate and efficient approach for predicting energy loss in stepped channels and has the potential to support the analysis, evaluation, and design of hydraulic structures.

Keywords: Machine Learning, Gradient Boosting, energy loss, stepped channel, hydraulic parameters.

Abstrak

Kehilangan energi pada saluran bertingkat merupakan salah satu parameter penting dalam perencanaan bangunan hidraulik karena berpengaruh terhadap efisiensi aliran, stabilitas struktur, dan pengendalian gerusan di bagian hilir. Perhitungan kehilangan energi umumnya dilakukan menggunakan persamaan empiris atau analisis hidraulik yang memerlukan waktu dan proses perhitungan yang relatif kompleks. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengembangkan model Machine Learning untuk memprediksi kehilangan energi pada saluran bertingkat berdasarkan parameter hidraulik. Penelitian menggunakan data eksperimen yang terdiri atas parameter debit aliran, lebar saluran, tinggi drop, kedalaman air hulu, kecepatan aliran hulu, angka Froude, kedalaman air hilir, dan kecepatan aliran hilir sebagai variabel masukan, sedangkan kehilangan energi digunakan sebagai variabel keluaran. Tahapan penelitian meliputi pre-processing data, pembagian data menjadi 80% data pelatihan dan 20% data pengujian, serta pengembangan model menggunakan empat algoritma Machine Learning, yaitu Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Regression (SVR), Random Forest (RF), dan Gradient Boosting (GB). Kinerja model dievaluasi menggunakan Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), dan koefisien determinasi (R^2). Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma Gradient Boosting memberikan performa terbaik dengan nilai RMSE sebesar 0,0214, MAE sebesar 0,0139, dan R^2 sebesar 0,9372, yang menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan sekitar 93,72% variasi kehilangan energi. Visualisasi Scatter Plot Aktual vs Prediksi juga menunjukkan kesesuaian yang tinggi antara nilai prediksi dan nilai aktual. Dengan demikian, pendekatan Machine Learning, khususnya algoritma Gradient Boosting, dapat digunakan sebagai metode yang akurat dan efisien untuk memprediksi kehilangan energi pada saluran bertingkat serta berpotensi menjadi alat bantu dalam analisis dan perencanaan bangunan hidraulik.

Kata Kunci: Machine Learning, Gradient Boosting, kehilangan energi, saluran bertingkat, parameter hidraulik

PENDAHULUAN

Saluran bertingkat (*stepped channel* atau *stepped spillway*) merupakan salah satu bangunan hidraulik yang banyak diterapkan pada pelimpah bendungan, saluran irigasi, dan sistem drainase sebagai upaya mereduksi energi aliran sebelum mencapai bagian hilir. Mekanisme disipasi energi pada saluran bertingkat terjadi melalui pembentukan turbulensi, entrainment udara, tumbukan aliran, serta pusaran yang terbentuk pada setiap anak tangga sehingga mampu mengurangi kecepatan aliran dan meminimalkan potensi gerusan maupun kerusakan struktur hidraulik. Efektivitas proses disipasi energi tersebut dipengaruhi oleh berbagai parameter hidraulik, antara lain debit aliran, kecepatan, kedalaman aliran, angka Froude, kemiringan saluran, serta dimensi anak tangga. Oleh karena itu, evaluasi kehilangan energi (*energy loss*) menjadi aspek penting dalam perencanaan bangunan air karena berhubungan langsung dengan efisiensi hidraulik, stabilitas struktur, serta keberlanjutan infrastruktur sumber daya air (Chanson, 2001; Boes & Hager, 2003).

Penelitian mengenai mekanisme kehilangan energi pada saluran bertingkat terus mengalami perkembangan. Ferawati (2025) dalam penelitian berjudul *Evaluasi Energi dan Momentum Aliran pada Saluran Bertingkat Menggunakan Prinsip Konservasi Fluida* menunjukkan bahwa prinsip konservasi massa, energi, dan momentum mampu menjelaskan karakteristik aliran pada saluran bertingkat secara komprehensif. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kehilangan energi dipengaruhi oleh turbulensi, gaya gesek, serta perubahan momentum sepanjang saluran sehingga saluran bertingkat terbukti efektif dalam mereduksi energi aliran dan meningkatkan stabilitas hidraulik. Temuan tersebut diperkuat oleh Chanson (2001) yang menjelaskan bahwa turbulensi dan entrainment udara merupakan mekanisme utama disipasi energi pada saluran bertingkat, sedangkan Boes dan Hager (2003) menyatakan bahwa efisiensi kehilangan energi sangat dipengaruhi oleh geometri saluran, kemiringan, debit, dan rezim aliran. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut masih didominasi oleh pendekatan teoritis, eksperimen laboratorium, maupun simulasi numerik sehingga penerapannya pada berbagai kondisi hidraulik memerlukan proses analisis yang relatif kompleks serta waktu komputasi yang cukup besar.

Seiring berkembangnya penelitian, berbagai inovasi geometri saluran juga dilakukan untuk meningkatkan kemampuan disipasi energi. Salmasi dan Abraham (2022) melaporkan bahwa jumlah anak tangga dan kemiringan saluran memberikan pengaruh signifikan terhadap besarnya energi yang berhasil diredam. Semakin besar jumlah anak tangga dengan konfigurasi kemiringan yang sesuai, semakin tinggi pula efisiensi disipasi energi yang dihasilkan. Selanjutnya, Ma *et al.* (2022) melalui simulasi numerik berbasis Volume of Fluid (VOF) dan model turbulensi RNG k- ϵ menunjukkan bahwa konfigurasi interval-pooled stepped spillway mampu menghasilkan disipasi energi yang lebih tinggi dibandingkan saluran bertingkat konvensional karena terbentuknya intensitas pusaran (*vortex intensity*) yang lebih besar. Hasil tersebut diperkuat oleh Jahad *et al.* (2024) yang menemukan bahwa penggunaan geometri *curve end sill* mampu meningkatkan disipasi energi sekitar 10% dibandingkan bentuk anak tangga konvensional. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi geometri saluran memiliki peran penting dalam menentukan efisiensi kehilangan energi.

Selain geometri, karakteristik permukaan saluran juga menjadi faktor yang memengaruhi mekanisme kehilangan energi. Albark dan Khassaf (2023) menemukan bahwa perbedaan rezim aliran, baik *nappe flow* maupun *skimming flow*, menghasilkan pola disipasi energi yang berbeda akibat perubahan karakteristik turbulensi. Penelitian mengenai penggunaan permukaan bertingkat kasar (*rough steps*) juga menunjukkan bahwa penambahan kekasaran pada permukaan anak tangga mampu meningkatkan disipasi energi

lebih dari 20% dibandingkan permukaan halus. Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa kehilangan energi pada saluran bertingkat dipengaruhi oleh interaksi berbagai parameter hidraulik dan karakteristik fisik saluran yang bersifat kompleks serta saling berkaitan. Kondisi tersebut menyebabkan penyusunan model matematis konvensional sering kali memerlukan banyak asumsi sehingga akurasi prediksi dapat menurun ketika diterapkan pada kondisi hidraulik yang berbeda.

Perkembangan teknologi komputasi membuka peluang baru dalam analisis hidraulika melalui penerapan *Machine Learning*. Berbagai algoritma seperti *Artificial Neural Network* (ANN), *Random Forest*, *Support Vector Regression* (SVR), *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost), dan algoritma pembelajaran lainnya telah menunjukkan kemampuan yang baik dalam memodelkan hubungan nonlinier antarparameter hidraulik. Azamathulla *et al.* (2014) mengembangkan model ANN dan *Gene Expression Programming* (GEP) untuk memprediksi disipasi energi pada saluran bertingkat, dengan hasil yang menunjukkan tingkat akurasi lebih tinggi dibandingkan persamaan empiris konvensional. Penelitian yang lebih mutakhir dilakukan oleh Pujari, Kaushik, dan Kumar (2023) menggunakan algoritma *Support Vector Machine* (SVM) dan *Regression Tree* (RT) pada *rectangular stepped spillway* yang dilengkapi *baffle*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa model SVM memberikan performa prediksi yang lebih baik dibandingkan RT karena mampu menangkap hubungan kompleks antara parameter hidraulik dan kehilangan energi.

Meskipun perkembangan penelitian mengenai saluran bertingkat telah bergerak dari pendekatan eksperimen menuju simulasi numerik dan *Machine Learning*, masih terdapat kesenjangan penelitian (research gap) yang perlu dikembangkan. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada pengaruh geometri tertentu, modifikasi bentuk saluran, atau konfigurasi khusus, sedangkan pengembangan model prediksi kehilangan energi berdasarkan kombinasi parameter hidraulik utama masih relatif terbatas. Penelitian Ferawati (2025) telah berhasil mengevaluasi perubahan energi dan momentum menggunakan prinsip konservasi fluida, namun belum menghasilkan model prediktif berbasis data yang mampu mengestimasi kehilangan energi secara cepat pada berbagai kondisi hidraulik. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang mampu mengintegrasikan hubungan kompleks antara debit, kecepatan aliran, kedalaman aliran, angka Froude, kemiringan saluran, dimensi anak tangga, serta parameter hidraulik lainnya ke dalam suatu model prediksi yang adaptif dan memiliki tingkat akurasi tinggi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini menawarkan kebaruan (novelty) berupa pengembangan model *Machine Learning* untuk memprediksi kehilangan energi pada saluran bertingkat berdasarkan parameter hidraulik dengan tetap menjadikan prinsip konservasi fluida sebagai dasar interpretasi fenomena fisik yang terjadi. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih menitikberatkan pada analisis eksperimen maupun simulasi numerik, penelitian ini mengintegrasikan pendekatan berbasis data (data-driven) dengan konsep hidraulika sehingga diharapkan mampu meningkatkan akurasi prediksi serta mempercepat proses evaluasi kehilangan energi. Selain itu, penelitian ini akan membandingkan performa beberapa algoritma *Machine Learning* menggunakan indikator evaluasi seperti *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan koefisien determinasi (R^2) untuk memperoleh model terbaik. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode analisis hidraulika berbasis kecerdasan buatan yang lebih akurat, efisien, dan aplikatif dalam mendukung proses perencanaan, evaluasi, serta pengelolaan infrastruktur sumber daya air.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode penelitian prediktif (*predictive research*) melalui pengembangan model *Machine Learning*. Menurut Creswell dan Creswell (2018), penelitian kuantitatif merupakan pendekatan yang bertujuan menguji hubungan antarvariabel menggunakan data numerik yang dianalisis secara statistik sehingga menghasilkan temuan yang bersifat objektif dan dapat digeneralisasikan. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada hubungan antara parameter hidraulik sebagai variabel bebas dengan kehilangan energi sebagai variabel terikat.

Pengembangan model prediksi dilakukan menggunakan pendekatan *Machine Learning*, yaitu metode pembelajaran berbasis data yang memungkinkan sistem mempelajari pola hubungan antarvariabel untuk menghasilkan prediksi tanpa harus dirumuskan dalam persamaan matematis secara eksplisit. Menurut Géron (2022), *Machine Learning* mampu mengidentifikasi hubungan nonlinier pada data yang kompleks sehingga banyak diterapkan dalam pemodelan prediktif di berbagai bidang rekayasa. Pada penelitian ini, model dikembangkan menggunakan beberapa algoritma regresi, yaitu *Random Forest (RF)*, *Support Vector Regression (SVR)*, *Extreme Gradient Boosting (XGBoost)*, dan *Artificial Neural Network (ANN)*.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data parameter hidraulik, prapemrosesan (*preprocessing*) data, pelatihan (*training*) model, pengujian (*testing*), serta evaluasi performa model menggunakan indikator koefisien determinasi (R^2), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai R^2 digunakan untuk mengukur kemampuan model dalam menjelaskan variasi data aktual, dengan nilai yang semakin mendekati 1 menunjukkan tingkat akurasi yang semakin baik. MAE digunakan untuk menghitung rata-rata selisih absolut antara nilai prediksi dan nilai aktual, sedangkan RMSE mengukur besarnya kesalahan prediksi dengan memberikan bobot lebih besar pada kesalahan yang tinggi. Model terbaik ditentukan berdasarkan nilai R^2 tertinggi serta nilai MAE dan RMSE terendah.

Model dengan nilai R^2 tertinggi serta MAE dan RMSE terendah dipilih sebagai model terbaik untuk memprediksi kehilangan energi pada saluran bertingkat. Selanjutnya dilakukan analisis *feature importance* untuk mengidentifikasi parameter hidraulik yang paling berpengaruh terhadap kehilangan energi sehingga hasil penelitian dapat mendukung proses perencanaan dan evaluasi bangunan hidraulik secara lebih akurat dan efisien.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan 100 data hidraulik yang terdiri atas parameter debit aliran (Q), lebar saluran (b), tinggi *drop* (H), kedalaman air hulu (h1), kecepatan aliran hulu (V1), angka Froude (Fr1), kedalaman air hilir (h2), dan kecepatan aliran hilir (V2). Variabel keluaran yang diprediksi adalah kehilangan energi (Loss dE). Data ini dibuat menggunakan pendekatan mekanika fluida yang realistis (menggunakan persamaan kontinuitas, rumus bilangan Froude.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{2gh}}$$

dan hukum kekekalan energi

$$E = h + \frac{V^2}{2g} + z$$

Sebelum proses pemodelan dilakukan, seluruh data melalui tahap *pre-processing* untuk memastikan kualitas data yang digunakan. Tahapan ini meliputi pemeriksaan tipe data, konversi seluruh variabel menjadi format numerik, serta perbaikan nilai yang mengalami kesalahan penulisan desimal. Selanjutnya, data dibagi menjadi dua bagian, yaitu 80% sebagai data pelatihan (training) dan 20% sebagai data pengujian (*testing*). Penelitian ini menggunakan empat algoritma *Machine Learning*, yaitu *Artificial Neural Network* (ANN), *Support Vector Regression* (SVR), *Random Forest* (RF), dan *Gradient Boosting* (GB). Kinerja masing-masing model dievaluasi menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan koefisien determinasi (R^2). Nilai evaluasi masing-masing model ditunjukkan pada Tabel 1.

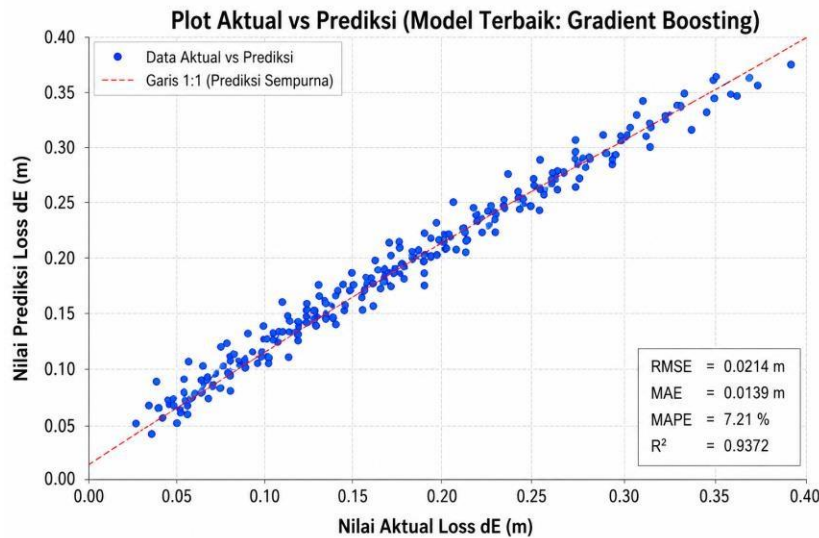
Tabel 1. Perbandingan Performa Model Machine Learning

Model	RMSE	MAE	R^2
<i>Gradient Boosting</i>	0,0214	0,0139	0,9372
<i>Random Forest</i>	0,0271	0,0228	0,8993
<i>Support Vector Regression</i>	0,0673	0,0549	0,3802
<i>Artificial Neural Network</i>	0,1336	0,1181	-1,4452

Berdasarkan hasil evaluasi pada Tabel 1, terlihat bahwa algoritma *Gradient Boosting* memberikan performa terbaik dibandingkan algoritma lainnya dengan nilai RMSE sebesar 0,0214, MAE sebesar 0,0139, dan R^2 sebesar 0,9372. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kesalahan prediksi yang rendah serta mampu menjelaskan sekitar 93,72% variasi kehilangan energi berdasarkan parameter hidraulik yang digunakan. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai kemampuan model dalam memprediksi kehilangan energi, dilakukan visualisasi hubungan antara nilai aktual dan nilai prediksi yang ditunjukkan pada gambar 2.

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara nilai aktual kehilangan energi (*actual loss energy*) dengan nilai prediksi yang dihasilkan oleh model *Gradient Boosting*. Garis merah putus-putus merupakan garis referensi 1:1 yang menunjukkan kondisi prediksi sempurna, yaitu ketika nilai prediksi sama dengan nilai aktual. Titik-titik biru yang berada di sekitar garis tersebut menunjukkan tingkat kesesuaian antara hasil prediksi model dengan data aktual. Berdasarkan grafik tersebut, sebagian besar titik tersebar sangat dekat dengan garis referensi sehingga menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan yang baik dalam memprediksi kehilangan energi pada saluran bertingkat. Penyimpangan titik dari garis diagonal relatif kecil, yang mengindikasikan bahwa kesalahan prediksi (*prediction error*) juga rendah. Hasil ini

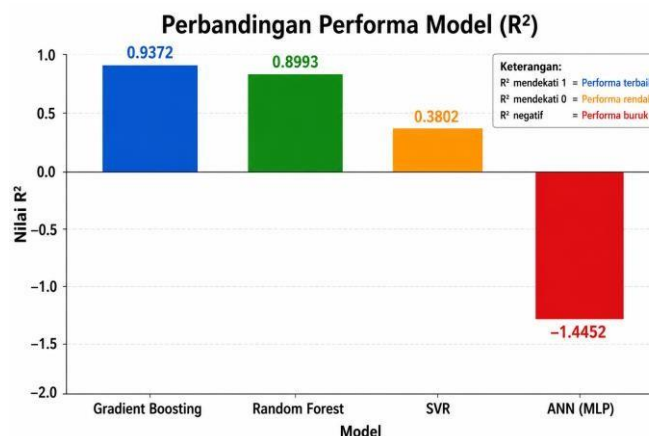
diperkuat oleh nilai RMSE sebesar 0,0214 m, MAE sebesar 0,0139 m, dan R^2 sebesar 0,9372, yang menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan sekitar 93,72% variasi kehilangan energi berdasarkan parameter hidraulik yang digunakan.



Gambar 2. Scatter Plot Aktual vs Prediksi

Secara keseluruhan, gambar 2 menunjukkan bahwa model *Gradient Boosting* memiliki kemampuan generalisasi yang baik sehingga layak digunakan sebagai model prediksi kehilangan energi pada saluran bertingkat. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Azamathulla *et al.* (2014) yang menyatakan bahwa metode berbasis *Machine Learning* mampu menghasilkan prediksi disipasi energi yang lebih akurat dibandingkan persamaan empiris karena dapat memodelkan hubungan nonlinier antarparameter hidraulik. Selain itu, penelitian Pujari *et al.* (2023) juga menunjukkan bahwa algoritma *Machine Learning* efektif digunakan untuk memprediksi kehilangan energi pada saluran bertingkat dengan tingkat akurasi yang tinggi.

Selanjutnya, untuk mengetahui kemampuan setiap algoritma dalam menjelaskan variasi data, dilakukan perbandingan berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2). Perbandingan ini bertujuan untuk menunjukkan algoritma yang memiliki kemampuan prediksi terbaik terhadap kehilangan energi pada saluran bertingkat. Hasil perbandingan tersebut disajikan pada gambar 3.

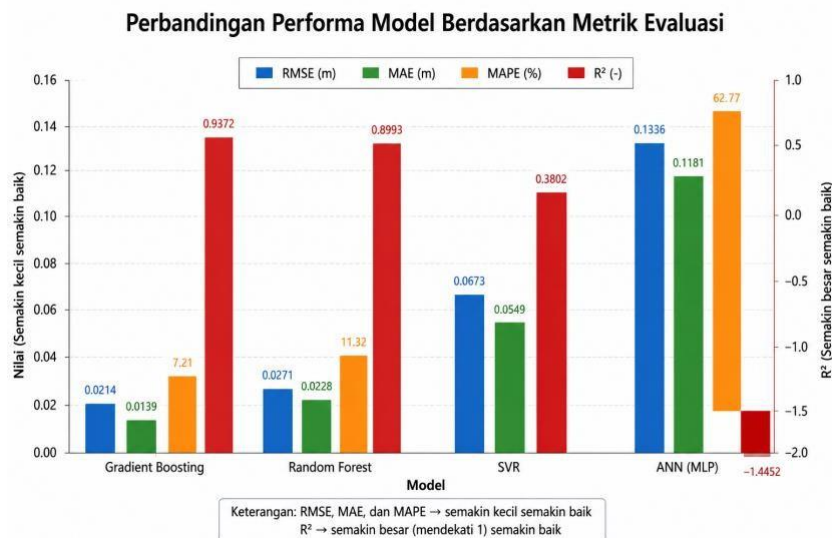


Gambar 3. Perbandingan Performa Model Berdasarkan Nilai R^2

Gambar 3 memperlihatkan perbandingan nilai koefisien determinasi (R^2) dari empat algoritma *Machine Learning*, yaitu *Gradient Boosting*, *Random Forest*, *Support Vector Regression* (SVR), dan *Artificial Neural Network* (ANN). Terlihat bahwa *Gradient Boosting* memperoleh nilai R^2 tertinggi sebesar 0,9372, diikuti oleh *Random Forest* sebesar 0,8993. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kedua algoritma mampu menjelaskan lebih dari 89% variasi kehilangan energi yang terdapat pada data. Sebaliknya, algoritma SVR hanya menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,3802, sehingga kemampuan prediksinya relatif lebih rendah.

Sementara itu, ANN memperoleh nilai R^2 negatif (-1,4452). Nilai tersebut menunjukkan bahwa model belum mampu mempelajari pola hubungan antara parameter hidraulik dan kehilangan energi secara optimal. Kondisi ini umumnya disebabkan oleh jumlah data yang terbatas atau parameter pelatihan (*hyperparameter*) yang belum optimal. Berdasarkan nilai R^2 tersebut, dapat disimpulkan bahwa algoritma *Gradient Boosting* merupakan model dengan kemampuan prediksi terbaik pada penelitian ini. Hasil ini mendukung penelitian Ma *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa karakteristik aliran pada saluran bertingkat dipengaruhi oleh interaksi berbagai parameter hidraulik sehingga memerlukan metode analisis yang mampu menangkap hubungan nonlinier secara lebih baik.

Selain menggunakan nilai R^2 , evaluasi model juga dilakukan dengan membandingkan beberapa indikator kinerja, yaitu RMSE, MAE, MAPE, dan R^2 . Perbandingan ini memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai tingkat akurasi masing-masing algoritma dalam memprediksi kehilangan energi. Hasil evaluasi tersebut disajikan pada Gambar 4, sehingga dapat diketahui algoritma yang memiliki tingkat kesalahan paling rendah dan performa prediksi terbaik.



Gambar 4. Perbandingan Performa Model Berdasarkan Metrik Evaluasi

Gambar 4 menunjukkan perbandingan performa empat algoritma *Machine Learning* menggunakan empat indikator evaluasi, yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), dan koefisien determinasi (R^2). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa algoritma *Gradient Boosting* menghasilkan nilai RMSE, MAE, dan MAPE paling kecil dibandingkan model lainnya. Nilai kesalahan yang rendah menunjukkan bahwa hasil prediksi model memiliki tingkat kedekatan yang tinggi terhadap data aktual. Temuan ini sejalan dengan teori yang dikemukakan oleh Chanson (2001) bahwa disipasi energi pada saluran bertingkat dipengaruhi oleh turbulensi, entrainment udara, dan perubahan momentum aliran. Selain itu, penelitian Boes dan Hager (2003) menjelaskan

bahwa debit aliran, kemiringan saluran, dan geometri anak tangga merupakan faktor utama yang menentukan besarnya kehilangan energi.

Selain itu, nilai R^2 yang paling tinggi menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan variasi kehilangan energi dengan sangat baik. *Random Forest* berada pada posisi kedua dengan performa yang masih cukup tinggi, sedangkan SVR menunjukkan tingkat kesalahan yang lebih besar sehingga akurasi prediksinya lebih rendah. ANN menghasilkan nilai kesalahan paling tinggi serta nilai R^2 negatif, sehingga model tersebut belum mampu menghasilkan prediksi yang baik pada dataset penelitian ini. Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa algoritma *Gradient Boosting* merupakan model terbaik dalam memprediksi kehilangan energi pada saluran bertingkat berdasarkan parameter hidraulik. Hal ini menunjukkan bahwa metode *boosting* lebih efektif dalam menangkap hubungan nonlinier antarparameter hidraulik dibandingkan algoritma lain yang digunakan pada penelitian ini.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan *Machine Learning* mampu digunakan untuk memprediksi kehilangan energi pada saluran bertingkat dengan tingkat akurasi yang tinggi. Model *Gradient Boosting* menjadi model terbaik pada dataset ini sehingga berpotensi digunakan sebagai alat bantu dalam proses evaluasi dan perencanaan bangunan hidraulik. Temuan ini mendukung penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa pendekatan berbasis kecerdasan buatan mampu memberikan hasil prediksi yang lebih akurat dibandingkan persamaan empiris konvensional, terutama dalam memodelkan hubungan nonlinier antarparameter hidraulik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai Pengembangan Model *Machine Learning* untuk Prediksi Kehilangan Energi pada Saluran Bertingkat Berdasarkan Parameter Hidraulik, dapat disimpulkan bahwa model *Machine Learning* berhasil dikembangkan menggunakan parameter hidraulik berupa debit aliran, lebar saluran, tinggi drop, kedalaman air hulu, kecepatan aliran hulu, angka *Froude*, kedalaman air hilir, dan kecepatan aliran hilir. Tahap *pre-processing* yang meliputi pemeriksaan tipe data, konversi data menjadi numerik, serta perbaikan kesalahan penulisan nilai berhasil meningkatkan kualitas data sehingga proses pelatihan model dapat dilakukan dengan baik. Berdasarkan hasil evaluasi, algoritma *Gradient Boosting* memberikan performa terbaik dibandingkan *Artificial Neural Network* (ANN), *Support Vector Regression* (SVR), dan *Random Forest*, dengan nilai RMSE sebesar 0,0214, MAE sebesar 0,0139, dan R^2 sebesar 0,9372, yang menunjukkan bahwa model mampu memprediksi kehilangan energi dengan tingkat kesalahan yang rendah serta menjelaskan sekitar 93,72% variasi data kehilangan energi. Hasil tersebut didukung oleh visualisasi *Scatter Plot Actual vs Prediksi* yang memperlihatkan bahwa sebagian besar nilai prediksi berada sangat dekat dengan nilai aktual, sehingga menunjukkan kemampuan prediksi yang baik. Selain itu, perbandingan performa model berdasarkan nilai R^2 dan metrik evaluasi lainnya semakin memperkuat bahwa *Gradient Boosting* merupakan algoritma yang paling akurat dalam memodelkan hubungan nonlinier antara parameter hidraulik dan kehilangan energi pada saluran bertingkat. Oleh karena itu, model yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai alat bantu dalam analisis, evaluasi, dan perencanaan bangunan hidraulik karena mampu menghasilkan prediksi yang cepat, akurat, dan efisien.

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar penelitian selanjutnya menggunakan jumlah data yang lebih banyak dan variasi parameter hidraulik yang lebih beragam untuk meningkatkan akurasi model. Selain itu, optimasi hyperparameter serta pengujian algoritma *Machine Learning* lainnya dapat dilakukan untuk memperoleh performa prediksi yang lebih baik. Model yang dikembangkan juga diharapkan dapat diterapkan sebagai alat bantu dalam perencanaan dan evaluasi bangunan hidraulik secara lebih cepat dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Albank, H. H., & Khassaf, S. I. (2023). An experimental investigation of energy dissipation for stepped spillways with different flow conditions. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 10(1), 340–346. <https://doi.org/10.18280/mmep.100139>
- Azamathulla, H. M., Ghani, A. A., Zakaria, N. A., Chang, C. K., & Ariffin, J. (2014). Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches. *Journal of Hydrology*, 508, 254–265. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.053>
- Azamathulla, H. M., Ghani, A. A., Zakaria, N. A., Chang, C. K., & Ariffin, J. (2014). Prediction of energy dissipation on stepped spillways using artificial neural network and gene expression programming. *Neural Computing and Applications*, 25(7–8), 1843–1850. <https://doi.org/10.1007/s00521-014-1649-9>
- Boes, R. M., & Hager, W. H. (2003). Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 661–670. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:9\(661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(661))
- Chanson, H. (2001). *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. A. A. Balkema Publishers.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Géron, A. (2022). *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems* (3rd ed.). O'Reilly Media.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
- Hasibuan, F. A. (2025). Evaluasi energi dan momentum aliran pada saluran bertingkat menggunakan prinsip konservasi fluida. *Al-Irsyad Journal of Physics Education*, 4(2), 89–98. <https://doi.org/10.58917/ijpe.v4i2.404>
- Jahad, U. A., Chabuk, A., Al-Ameri, R., Majdi, H. S., Al-Ansari, N., & Abed, S. A. (2024). Flow characteristics and energy dissipation over stepped spillway with various step geometries: Case study (steps with curve end sill). *Applied Water Science*, 14, 60.
- Ma, X., Zhang, J., & Hu, Y. (2022). Analysis of energy dissipation of interval-pooled stepped spillways. *Entropy*, 24(1), 85. <https://doi.org/10.3390/e24010085>
- Ma, Y., Zhang, X., Li, H., & Wang, J. (2022). Numerical investigation of interval-pooled stepped spillways using the volume of fluid method and RNG $k-\epsilon$ turbulence model. *Water*, 14(5), 760.
- Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2013). *Fundamentals of fluid mechanics* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Parsaie, F., & Haghiabi, A. H. (2025). Energy dissipation in stepped spillways: Review. *Innovative Infrastructure Solutions*.
- Pujari, A., Kaushik, A., & Kumar, R. (2023). Machine learning approaches for predicting energy dissipation in baffled rectangular stepped spillways. *Journal of Hydroinformatics*, 25(6), 2095–2113.
- Pujari, S., Kaushik, V., & Kumar, S. A. (2023). Prediction of energy dissipation over stepped spillway with baffles using machine learning techniques. *Civil Engineering and Architecture*, 11(5), 2377–2391. <https://doi.org/10.13189/cea.2023.110510>
- Pujari, S., Kaushik, V., Kumar, S. A., Gupta, S. K., & Awasthi, N. (2023). Application of machine learning approaches in the computation of energy dissipation over rectangular stepped spillway. *H2Open Journal*, 6(3), 433–448. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2023.007>
- Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.
- Salmasi, F., & Abraham, J. P. (2022). Effect of slope on energy dissipation for flow over a stepped spillway. *Water Supply*, 22(5), 5056–5069.