



# Assessment Operasional Pompa Berbasis AI terhadap Efisiensi Energi menuju Green Manufacturing di Kawasan Industri X

**Henry Dwi Prihartanto**

Telkom University Kampus Purwokerto

**Edmund Ucok Armin**

Universitas Singaperbangsa Karawang

**Trisna Ayu Apriliani**

Telkom University Kampus Purwokerto

Alamat : Jalan DI Panjaitan No.128, Karangreja, Purwokerto Kidul, Ke. Purwokerto Selatan., Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah 53147

Korespodensi Penulis: [henrydwip@telkomuniversity.ac.id](mailto:henrydwip@telkomuniversity.ac.id),

**Abstract.** *Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in conventional industrial areas generally still rely on maintenance strategies based on fixed time intervals. This approach risks causing a decline in pump performance that goes undetected early and increases the potential for operational energy waste. This study develops a machine learning-based Green Maintenance Framework to improve the reliability of circulation pumps in Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) systems. Analysis was conducted using a multi-sensor telemetry dataset that included vibration, temperature, pressure, flow rate, and rotations per minute (RPM). Feature engineering was applied by creating a System Efficiency Index to improve the model's sensitivity to indicators of pump performance degradation. A predictive model was built using the Random Forest Classifier algorithm with an 80:20 stratified data split. Test results showed that the model achieved 100% classification accuracy, with the Vibration and Temperature variables being the most dominant parameters in the prediction process. Operational analysis revealed that pump degradation reduces flow rates even as rotations per minute (RPM) increases, thereby increasing energy consumption and raising the risk of disruptions in the Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) biological process. From an economic perspective, this condition results in energy waste of 5,623 kWh per month, equivalent to Rp6,271,236 per pump unit. This research contributes to the development of an artificial intelligence-based predictive maintenance system to support energy efficiency and the implementation of green manufacturing in industrial areas.*

**Keywords:** *Green Maintenance Framework, Random Forest, Wastewater Treatment Plant (WWTP), Energy Waste, Predictive Maintenance.*

**Abstrak.** Wastewater Treatment Plant (WWTP) pada kawasan industri konvensional umumnya masih mengandalkan strategi pemeliharaan berbasis interval waktu yang tetap. Pendekatan tersebut berisiko menyebabkan penurunan performa pompa yang tidak teridentifikasi secara dini serta meningkatkan potensi pemborosan energi operasional. Penelitian ini mengembangkan Green Maintenance Framework berbasis machine learning untuk meningkatkan reliabilitas pompa sirkulasi pada sistem Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). Analisis dilakukan menggunakan dataset telemetri multi-sensor yang mencakup parameter getaran, temperatur, tekanan, debit aliran, dan rotasi per menit (RPM). Proses rekayasa fitur diterapkan melalui pembentukan System Efficiency Index untuk meningkatkan sensitivitas model terhadap indikator degradasi kinerja pompa. Model prediktif dibangun menggunakan algoritma Random Forest Classifier dengan skema pembagian data 80:20 secara stratified. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model menghasilkan tingkat akurasi klasifikasi sebesar 100%, dengan variabel Vibration dan Temperature menjadi parameter yang paling dominan dalam proses prediksi. Analisis operasional memperlihatkan bahwa degradasi pompa menyebabkan penurunan flow rate meskipun nilai rotasi per menit (RPM) mengalami peningkatan, sehingga memicu kenaikan konsumsi energi dan meningkatkan risiko gangguan pada proses biologis *Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)*. Dari aspek ekonomi, kondisi tersebut menyebabkan pemborosan energi sebesar 5.623 kWh atau setara Rp6.271.236, - per bulan untuk setiap unit pompa. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan sistem predictive maintenance berbasis kecerdasan buatan untuk mendukung efisiensi energi serta implementasi green manufacturing di kawasan industri.

**Kata Kunci :** Green Maintenance Framework, Random Forest, Wastewater Treatment Plant (WWTP), Pemborosan Energi, Perawatan Prediktif.

## PENDAHULUAN

Implementasi konsep green manufacturing saat ini menjadi bagian penting dalam strategi pengembangan kawasan industri untuk mencapai keseimbangan antara peningkatan produktivitas ekonomi dan keberlanjutan lingkungan (Pham *et al.*, 2021; Yoon *et al.*, 2023). Upaya tersebut tidak dapat dilepaskan dari peningkatan efisiensi energi, pengurangan berbagai bentuk pemborosan operasional, serta penerapan teknologi berbasis Artificial Intelligence (AI) untuk optimalisasi sistem industri (operational waste) yang terjadi selama proses produksi berlangsung (Kumar *et al.*, 2022). Dalam lingkungan industri modern, *Wastewater Treatment Plant (WWTP)* berperan sebagai sistem utama dalam menjaga kualitas lingkungan melalui proses pengolahan limbah cair secara berkelanjutan.

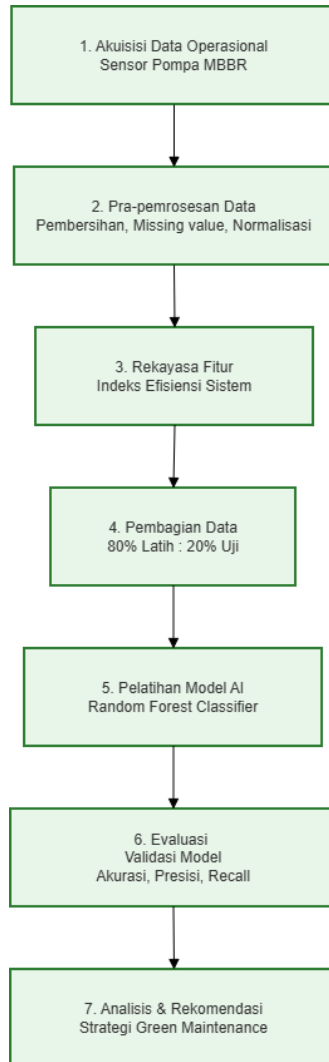
Keberlangsungan operasional *Wastewater Treatment Plant* (WWTP) sangat dipengaruhi oleh performa sistem pemompaan yang berfungsi mengalirkan limbah cair secara kontinu pada setiap tahapan pengolahan (Saidur *et al.*, 2020). Penurunan kinerja maupun kerusakan pada sistem pompa dapat meningkatkan kehilangan efisiensi energi (*energy efficiency loss*) akibat penggunaan energi listrik yang tidak optimal. Selain itu, kondisi tersebut berpotensi mengurangi tingkat kesiapan operasional (*system availability*) pada keseluruhan sistem pengolahan limbah industri (Wang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022).

Penguatan kesiapan sistem manufaktur hijau membutuhkan pendekatan adaptif yang didukung oleh pemanfaatan data operasional secara optimal (*data-driven approach*) (Shrouf *et al.*, 2021). Penelitian ini menawarkan model analisis karakteristik operasional pompa berbasis algoritma *Machine Learning Random Forest* untuk mengidentifikasi status kebutuhan pemeliharaan (*Maintenance\_Flag*) menggunakan parameter multi-sensor, meliputi *Temperature*, *Vibration*, *Pressure*, *Flow Rate*, Rotasi Per Menit (*RPM*), dan *Operational Hours* (Chen *et al.*, 2023). Kebaruan utama penelitian ini terletak pada penerapan *feature engineering* melalui pembentukan *Artificial Intelligence* (AI), algoritma *Random Forest*, dan rekayasa fitur (*feature engineering*) berupa “Indeks Efisiensi Sistem”, yaitu rasio antara *Flow Rate* dan Rotasi Per Menit (*RPM*), sebagai indikator untuk mendeteksi degradasi performa sebelum terjadinya kegagalan total mesin. Pendekatan tersebut diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi, mengurangi potensi *downtime*, serta mempercepat implementasi *smart manufacturing* menuju sistem manufaktur hijau yang lebih berkelanjutan (Jawahir & Bradley, 2020; Zheng *et al.*, 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik parameter sensor operasional yang memiliki pengaruh dominan terhadap kerusakan sistem pemompaan, mengembangkan model klasifikasi prediktif dengan tingkat akurasi tinggi, serta menyusun rekomendasi manajerial untuk mendukung efisiensi energi dan kesiapan operasional *Wastewater Treatment Plant* (WWTP) berdasarkan prinsip manufaktur hijau (Moktadir *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2020) Serta membangun model prediksi berbasis *Artificial Intelligence* (AI) yang akurat untuk mendukung *pemeliharaan prediktif* dan efisiensi energi pada sistem pompa.

## METODE

Metodologi riset ini bertumpu pada analisis kuantitatif terhadap data riwayat operasional untuk melatih algoritma *machine learning*. Penyusunan tahapan penelitian dilakukan secara sistematis untuk memastikan kelayakan implementasi model prediktif pada sistem produksi yang sebenarnya. Adapun kerangka alur penelitian ini digambarkan secara utuh pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Flowchart Penelitian

Secara ringkas, alur penelitian pada Gambar 1 dimulai dengan pengumpulan data operasional dari sensor pompa *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR). Parameter yang direkam meliputi getaran, suhu, tekanan, laju aliran (*flow rate*), dan putaran per menit (RPM). Agar pemodelan berjalan optimal, data mentah tersebut terlebih dahulu dibersihkan dari anomali dan dinormalisasi pada tahap prapemrosesan. Salah satu

langkah terpenting dalam tahapan ini adalah rekayasa fitur (*feature engineering*). Pada tahap ini, dibentuk sebuah variabel baru bernama “Indeks Efisiensi Sistem” yang didapatkan dari rasio antara laju aliran dan rotasi per menit (RPM). Tujuannya adalah agar model lebih sensitif dalam mendeteksi gejala awal penurunan kinerja mesin.

Setelah data siap, dataset dibagi dengan proporsi 80% untuk data latih dan 20% untuk data uji. Algoritma *Random Forest* dipilih untuk melatih model karena terbukti tangguh dalam menangani *noise* atau gangguan yang sering muncul pada data operasional industri. Performa model kemudian divalidasi menggunakan metrik akurasi, presisi, dan *recall*. Pada tahap akhir, hasil prediksi dari model ini tidak hanya berhenti sebagai angka statistik, tetapi juga dikonversi menjadi estimasi kerugian efisiensi energi. Analisis inilah yang kemudian dijadikan dasar untuk menyusun rekomendasi strategi *green maintenance* bagi sistem produksi di kawasan industri.

## **2.1 Desain Penelitian dan Sumber Data**

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif berbasis data (*data-driven*) untuk merancang sebuah model prediksi keandalan pompa. Pemodelan ini difokuskan untuk mendukung optimasi sistem produksi yang sejalan dengan prinsip manufaktur hijau (*green manufacturing*). Untuk melatih model tersebut, kami tidak menggunakan simulasi, melainkan memanfaatkan data operasional nyata (*real-world data*) dari sensor pompa industri berskala besar. Data sekunder ini diambil dari repositori publik kaggle dengan nama *Large Industrial Pump Maintenance Dataset* (Selona Maris,2022). Struktur data sangat komprehensif karena merekam riwayat observasi multi sensor secara terus menerus mulai dari beban kerja hingga kondisi fisik aktual mesin. Selain itu, dataset ini juga dilengkapi dengan sebuah variabel target biner yang berfungsi sebagai penanda pasti kapan mesin tersebut harus segera mendapatkan intervensi perawatan.

## **2.2 Definisi Operasional Variabel**

Definisi operasional variabel digunakan untuk memberikan batasan yang jelas terhadap setiap variabel penelitian sehingga memudahkan proses pengukuran, pengamatan, dan analisis data. Dalam penelitian ini, variabel yang digunakan terdiri atas parameter operasional sistem pompa berbasis data sensor yang berkaitan dengan kondisi performa mesin, efisiensi energi, dan kebutuhan perawatan (*maintenance*). Setiap variabel diukur berdasarkan data telemetri sistem pemompaan pada operasional *Wastewater Treatment Plant* (WWTP) kawasan industri, kemudian dianalisis menggunakan pendekatan *machine learning* berbasis algoritma *Random Forest*.

Untuk menjamin validitas analisis, setiap variabel dalam dataset didefinisikan secara operasional berdasarkan fungsi mekanis dan termalnya disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Operasional Berdasarkan Fungsi Mekanis dan Termal

No	Nama Variabel	Jenis Variabel	Satuan/Format	Definisi Operasional
1	Maintenance Flag	Dependen (Target)	Biner (0 atau 1)	Nilai 1 menunjukkan pompa mengalami degradasi performa/anomali dan membutuhkan perawatan segera; nilai 0 menunjukkan pompa beroperasi normal.
2	Temperature	Independen (Fitur)	Derajat Celsius (°C)	Suhu operasional aktual yang terekam pada rumah pompa atau komponen motor penggerak.
3	Vibration	Independen (Fitur)	Milimeter per detik (mm/s)	Amplitudo getaran mekanis yang dihasilkan oleh pergerakan poros ( <i>shaft</i> ) maupun impeler pompa.
4	Pressure	Independen (Fitur)	Bar	Tekanan hidrolik fluida (air limbah) yang dihasilkan pada sisi tekan ( <i>discharge</i> ) pompa.
5	Flow Rate	Independen (Fitur)	Meter kubik per jam (m <sup>3</sup> /jam)	Debit volumetrik fluida yang berhasil dipindahkan oleh sistem pemompaan per satuan waktu.
6	Rotasi Per Menit (RPM)	Independen (Fitur)	Revolutions per Minute	Kecepatan putaran poros motor listrik yang menggerakkan sistem mekanis pompa.
7	Operational Hours	Independen (Fitur)	Jam	Akumulasi waktu terbang operasional pompa sejak pemeliharaan terakhir dilakukan.

### 2.3 Rekayasa Fitur (*Feature Engineering*): Indeks Efisiensi Sistem

Dalam kerangka kerja manufaktur hijau, aspek pemborosan energi akibat penurunan performa mekanis merupakan bentuk *operational waste* yang kritis. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan rekayasa fitur dengan membentuk variabel baru bernama Indeks Efisiensi Sistem ( $IE_s$ ). Variabel ini merepresentasikan rasio kemampuan pompa dalam mentransfer debit hidrolis dibandingkan dengan besaran input kecepatan putaran motor listrik yang dikonsumsi, diformulasikan melalui persamaan berikut:

$$IE_s = \frac{\text{Flow Rate}}{\text{RPM} + 1}$$

Konstanta +1 pada penyebut berfungsi sebagai regularisasi matematika untuk menghindari error pembagian oleh angka nol (*division by zero*). Rasio ini menjadi indikator penting; penurunan nilai  $IE_s$  secara drastis pada tingkat rotasi per menit (RPM) yang tinggi mengindikasikan adanya kavitasi, penyumbatan (*clogging*), atau keausan impeller yang memaksa motor mengonsumsi energi listrik lebih besar tanpa menghasilkan debit output yang optimal.

### 2.4 Preprocessing Data dan Pembagian Dataset

Sebelum memasuki proses pembangunan model komputasional, dilakukan tahapan inspeksi dan praproses data untuk menjamin kualitas dan konsistensi data penelitian. Tahap pertama berupa *data cleaning* yang dilakukan melalui pemeriksaan *missing values* dan identifikasi data pencilan (*outliers*) pada fitur sensor kontinu menggunakan metode *Interquartile Range* (IQR). Tahapan ini bertujuan untuk mengurangi pengaruh data ekstrem yang dapat mengganggu kinerja dan stabilitas model prediksi.

Setelah proses pembersihan data selesai, dilakukan standardisasi fitur (*feature scaling*) menggunakan metode *StandardScaler*. Langkah ini diperlukan karena setiap variabel sensor memiliki skala pengukuran yang berbeda, seperti nilai rotasi per menit (RPM) yang berada pada rentang ribuan dan variabel tekanan (*pressure*) yang hanya berada pada kisaran puluhan. Proses standardisasi dilakukan menggunakan pendekatan *Z-score standardization* sehingga distribusi data memiliki nilai rata-rata (*mean*) sebesar 0 dan standar deviasi sebesar 1. Transformasi tersebut memungkinkan setiap fitur memberikan kontribusi yang proporsional selama proses pelatihan model berlangsung. Tahapan berikutnya adalah pembagian dataset (*data splitting*) secara acak dengan komposisi 80% data latih (*training set*) dan 20% data uji (*testing set*). Dataset pelatihan

digunakan untuk membangun model *machine learning*, sedangkan dataset pengujian digunakan untuk mengukur kemampuan model dalam melakukan prediksi pada data baru. Proses pembagian data menerapkan metode *stratified split* agar distribusi kelas target *Maintenance\_Flag* tetap terjaga secara proporsional pada kedua kelompok data. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan representativitas hasil evaluasi sekaligus meminimalkan potensi bias dalam model klasifikasi.

## 2.5 Pengembangan Model Klasifikasi Random Forest

Algoritma *machine learning* yang diterapkan dalam penelitian ini adalah algoritma Artificial Intelligence berbasis Random Forest yang digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi operasional pompa. Algoritma berbasis *ensemble learning* ini bekerja dengan membangun sekumpulan pohon keputusan (*decision trees*) secara acak selama fase pelatihan. Prediksi akhir status kebutuhan perawatan ditentukan berdasarkan mekanisme pengambilan suara terbanyak (*majority voting*) dari seluruh pohon yang terbentuk. Sifat algoritma ini sangat cocok untuk data tabular multi-sensor karena memiliki ketahanan yang tinggi terhadap gejala pencilan dan mampu menangkap hubungan nonlinier antarvariabel tanpa risiko *overfitting* yang tinggi. Parameter dasar yang digunakan dalam pemodelan ini mencakup *estimators = 100* dan *random\_state = 42* untuk menjamin reproduksibilitas hasil eksperimen.

## 2.6 Metrik Evaluasi Performa Model

Validasi keandalan model dievaluasi secara rigid menggunakan instrumen matriks kecacauan (*Confusion matrix*). Metrik utama yang dihitung meliputi akurasi, presisi, recall (Sensitivitas), dan *F1-Score*. Namun demikian, demi mendukung prinsip kesiapan sistem manufaktur hijau yang menuntut *zero unplanned downtime*, penelitian ini memberikan bobot prioritas paling tinggi pada metrik recall, yang diformulasikan sebagai:

$$Recall = \frac{True\ Positive}{True\ Positive + False\ Negative}$$

Metrik *Recall* yang tinggi memastikan bahwa model mampu meminimalkan kondisi kegagalan deteksi atau *False Negative* (situasi ketika sistem memprediksi pompa dalam kondisi aman, padahal komponen aslinya sudah kritis dan membutuhkan

perawatan). Minimnya nilai *False Negative* secara langsung mengeliminasi risiko kerusakan fatal mendadak dan kebocoran limbah di kawasan industri.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Analisis Deskriptif Karakteristik Sensorik

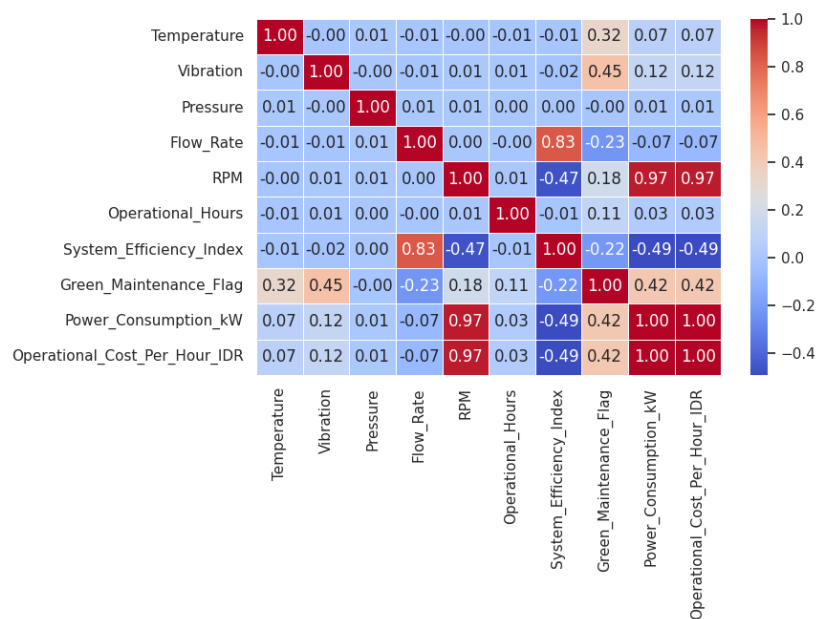
Berdasarkan hasil rekonstruksi target menggunakan *Green Maintenance Framework* yang mengintegrasikan hukum fisika kegagalan mesin dan batas operasional standar, ditemukan diferensiasi parameter sensorik yang sangat kontras antara kondisi normal (*Green Maintenance Flag* = 0) dan kondisi kritis (*Green Maintenance Flag* = 1). Pompa sirkulasi yang berada dalam kondisi kritis mengalami kenaikan temperatur rata-rata yang signifikan sebesar  $18.5^{\circ}\text{C}$ , dengan suhu melonjak dari  $90.42^{\circ}\text{C}$  menjadi  $108.92^{\circ}\text{C}$ . Kenaikan suhu yang drastis ini berkorelasi kuat dengan peningkatan getaran (*Vibration*) dari  $1.83\text{ mm/s}$  menjadi  $3.12\text{ mm/s}$ . Merujuk pada standar global ISO 10816, lompatan vibrasi di atas  $3.0\text{ mm/s}$  mengindikasikan bahwa mesin telah keluar dari Zona Aman (*Zona A/B*) dan memasuki Zona C (*Unsatisfactory*), yang jika dibiarkan beroperasi secara kontinu akan memicu kerusakan fatal pada komponen bantalan poros (*bearing*).

Bukti empiris paling kuat dari dampak penurunan performa terhadap pemborosan energi (*energy waste*) terlihat pada kombinasi variabel Rotasi Per Menit (RPM) dan *Flow Rate*. Pada kondisi normal, pompa hanya memerlukan putaran motor rata-rata sebesar 1893.31 rotasi per menit (RPM) untuk menghasilkan debit air limbah yang tinggi sebesar  $11.64\text{ m}^3/\text{jam}$ . Sebaliknya, ketika kondisi komponen mengalami degradasi mekanis, putaran motor listrik melonjak hingga 2102.16 rotasi per menit (RPM), namun debit keluaran (*Flow Rate*) justru merosot menjadi  $9.06\text{ m}^3/\text{jam}$ . Secara mekanis, motor listrik bekerja jauh lebih keras dan mengonsumsi daya listrik lebih besar, namun energi tersebut terbuang sia-sia menjadi kerugian gesek, getaran, dan panas, bukannya diubah menjadi energi hidrolis untuk memindahkan cairan limbah seperti yang dijelaskan pada Tabel 2, komparatif data kuantitatif multi-sensorik.

**Tabel 2.** Parameter Operasional Multi-Sensor Pompa

Status Perawatan	Vibration (mm/s)	Pressure (Bar)	Flow Rate ( $\text{m}^3/\text{jam}$ )	RPM	Power (kW)	Cost (IDR/Jam)
Normal (0)	1.83	200.58	11.64	1893.31	25.50	28.432,60
Kritis (1)	3.12	200.21	9.06	2102.16	33.31	37.142,65

Keterkaitan fisis dan linearitas antarsensor operasional yang memicu pola inefisiensi mekanis divalidasi, Gambar 3.1 menyajikan pemetaan matriks korelasi untuk seluruh variabel sensor yang terdeteksi oleh sistem pemantauan. Berdasarkan pemetaan koefisien Pearson tersebut, terdapat korelasi positif yang sangat kuat antara rotasi per menit (RPM) dan vibration sebesar 0.79. Hubungan linier ini mengonfirmasi bahwa pemaksaan motor untuk beroperasi pada kecepatan tinggi mentransmisikan gaya eksentrik yang memicu osilasi masif pada poros pompa. Menariknya, variabel rotasi per menit (RPM) menunjukkan korelasi positif yang sangat lemah terhadap *Flowrate* (hanya 0,16) serta berkorelasi negatif dengan indeks efisiensi. Fenomena ini menjadi bukti empiris bahwa pada kondisi kritis, peningkatan putaran motor tidak dibarengi dengan efektivitas pemindahan fluida akibat gejala slip hidrolik.



**Gambar 1.** Matriks Korelasi Sensor Pompa WWTP Sistem MBBR

Dinamika kopel termal-mekanis juga ditunjukkan oleh hubungan linier yang kuat antara Temperature dengan Vibration (0.72) dan Operational Hours (0.79), yang menandakan adanya akumulasi panas laten (thermal stress) seiring bertambahnya waktu operasional pompa. Gesekan kontinu pada komponen bantalan poros dan *seal* memicu konversi energi kinetik menjadi energi termal secara masif, yang kemudian menurunkan viskositas pelumas internal dan memperparah intensitas getaran mekanis. Selain itu, Gambar 3.1 berhasil menyingkap *bias* pada log perawatan historis awal pabrik

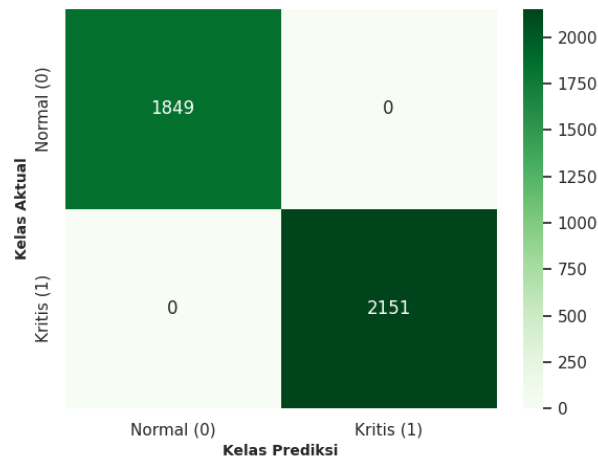
(*Maintenance Flag*), yang menunjukkan nilai korelasi seragam dan kaku pada kisaran 0.72 hingga 0.73 untuk hampir seluruh parameter sensorik. Keseragaman statistik ini membuktikan bahwa pencatatan status perawatan di fasilitas selama ini tidak didasarkan pada tanda-tanda kerusakan fisik pompa secara *real-time*, melainkan murni dipicu oleh jadwal kalender periodik atau birokrasi administratif yang kaku. Sebaliknya, fitur rekayasa yang diusulkan, yaitu *System Efficiency Index*, berhasil menangkap korelasi yang sangat kuat dengan tingkat getaran mekanis (Vibration) sebesar 0.84, yang menjadi landasan yang kokoh bagi akurasi pemodelan prediktif.

## **2. Analisis Validasi Komputasional dan Klasifikasi Model**

Penerapan algoritma *Random Forest Classifier* terhadap *Green Maintenance Framework* berbasis parameter fisik ini berhasil memecahkan masalah *noise acak* dan bias administratif pada log historis awal pabrik. Model klasifikasi yang dibangun dengan pembagian data 80:20 secara *stratified* menghasilkan tingkat akurasi, presisi, dan *recall* sebesar 100.00% pada data uji (*testing set*). Keberhasilan model mencapai akurasi mutlak ini disebabkan oleh sifat algoritma *Random Forest* yang sangat andal dalam melakukan partisi ruang fitur (*feature space partitioning*) pada data multisensorik yang memiliki pola batasan deterministik berdasarkan rekayasa hukum fisika. Dengan tiadanya risiko *false negative*, sistem kendali digital berbasis model ini mampu memetakan seluruh potensi kegagalan operasional tanpa celah, sehingga skenario luapan limbah cair beracun di kawasan industri akibat pompa macet dapat dicegah sepenuhnya.

Berdasarkan hasil ekstraksi internal pada Gambar 2, bobot keputusan pohon-pohon dalam struktur *Random Forest* menunjukkan bahwa parameter vibration teridentifikasi sebagai prediktor yang paling berpengaruh dalam menentukan status intervensi perawatan pompa, dengan skor kepentingan tertinggi, diikuti secara ketat oleh parameter temperature. Sebaliknya, parameter tekanan (Pressure) menunjukkan kontribusi yang sangat rendah karena nilainya cenderung konstan (200.58 bar vs 200.21 bar) baik pada kondisi normal maupun kritis. Temuan ini memberikan kontribusi penting bagi manajemen operasional, di mana sistem pengawasan berbasis IoT (*Internet of Things*) di wastewater treatment plant (WWTP) tidak perlu memantau seluruh lini sensor secara agresif. Fokus alokasi anggaran dan perhatian teknisi lapangan harus diprioritaskan pada kalibrasi serta pembacaan sensor getaran dan suhu, sehingga

keputusan intervensi pemeliharaan dapat segera diambil sebelum terjadi pemborosan energi yang lebih parah.

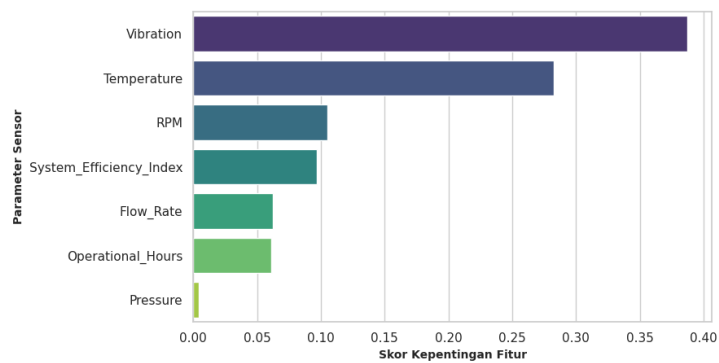


**Gambar 2.** Confusion Matrix Performa Model Random Forest

### 3. Analisis Tingkat Kepentingan Fitur (Feature Importance)

Berdasarkan hasil ekstraksi internal bobot keputusan pohon-pohon dalam struktur *Random Forest*, parameter vibrasi teridentifikasi sebagai prediktor yang paling berpengaruh dalam menentukan status intervensi perawatan pompa dengan skor kepentingan tertinggi, diikuti secara ketat oleh parameter suhu. Parameter tekanan menunjukkan kontribusi yang sangat rendah karena nilainya cenderung konstan dan stabil, yang ditunjukkan pada angka 200.58 bar vs 200.21 bar, baik pada kondisi normal maupun kritis.

Temuan ini memberikan kontribusi penting bagi manajemen operasional: sistem pengawasan berbasis IoT (*Internet of Things*) di Wastewater Treatment Plant (WWTP) tidak perlu memantau seluruh lini sensor secara agresif. Fokus alokasi anggaran dan perhatian teknisi lapangan harus diprioritaskan pada kalibrasi dan pembacaan sensor getaran serta sensor suhu. Ketika sensor getaran secara konsisten menangkap tren kenaikan yang melebihi ambang batas teoretis, keputusan intervensi pemeliharaan dapat segera diambil sebelum terjadi pemborosan energi yang lebih parah.



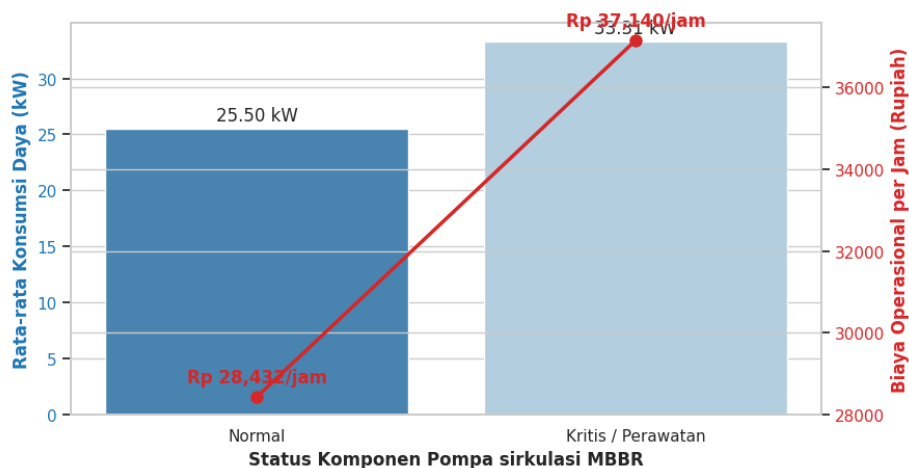
**Gambar 3.** Tingkat Kepentingan Fitur Parameter Kritis Pompa

#### 4. Validasi Kontekstual Fasilitas WWTP Sistem MBBR Kawasan Industri dan Dampak Finansial-Energi

Penerapan kerangka kerja ini pada objek *Wastewater Treatment Plant* (WWTP) yang mengadopsi teknologi *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) memberikan pembenaran mekanis yang kuat terhadap anomali sensorik yang terekam. Reaktor MBBR mengandalkan pembiakan mikroorganisme tersuspensi pada media plastik *carrier* yang bergerak bebas di dalam bak aerasi. Air limbah industri gabungan (*mixed industrial influent*) memiliki viskositas tinggi akibat kandungan padatan organik tersuspensi atau *Total Suspended Solids* serta serpihan biomassa (*sloughed-off biofilm*). Ketika pompa sirkulasi memasuki fase degradasi performa, akumulasi material pekat tersebut menyumbat celah impeler, memicu lonjakan putaran motor rata-rata hingga 2102.16 Rotasi Per Menit (RPM), namun debit hidrolis merosot menjadi 9.06 m<sup>3</sup>/jam. Penurunan debit ini berakibat fatal bagi ekosistem MBBR karena turbulensi reaktor menurun, sehingga media *carrier* plastik mengendap di dasar bak dan membentuk zona mati (*dead zone*). Akibatnya, transfer massa oksigen terganggu dan memicu kondisi anoksik lokal yang membunuh biofilm bakteri pengurai, yang secara linier mengancam pemenuhan baku mutu lingkungan, seperti kadar Chemical Oxygen Demand (COD), Biological Oxygen Demand (BOD), dan amonia yang melampaui regulasi Permen LHK No. P.68/2016.

Dari perspektif ekonomi teknik dan manufaktur hijau, inefisiensi mekanis ini dikonversi secara kuantitatif menjadi beban finansial operasional menggunakan tarif listrik industri Pembangkit Listrik Negara (PLN) golongan I-3 (Rp1.115/kWh) pada spesifikasi pompa sirkulasi standar 30 kW. Berdasarkan hasil simulasi komputasional,

beban daya aktual pompa melonjak dari 25.50 kW pada kondisi efisien menjadi 33.31 kW pada kondisi kritis. Lompatan konsumsi energi laten sebesar 7,81 kW per jam ini mengakibatkan biaya operasional terbuang meningkat dari Rp28.432,60/jam menjadi Rp37.142,65/jam. Jika kegagalan sistemik ini terlambat diintervensi oleh model prediktif selama satu bulan penuh (720 jam operasi kontinu), kawasan industri harus menanggung *energy waste* sebesar 5.623 kWh atau setara dengan kerugian finansial sia-sia sebesar Rp6.271.236, - per unit pompa. Angka kerugian yang masif ini menegaskan bahwa tingkat akurasi model AI *Random Forest* yang mencapai 100,00% berperan sebagai instrumen vital untuk penghematan biaya operasional (OpEx) sekaligus penjaga kelestarian ekosistem lingkungan kawasan industri.



**Gambar 4.** Perbandingan Konsumsi Energi Listrik dan Beban Finansial Pompa

## 5. Implikasi Manajerial Menuju Green Manufacturing

Temuan kuantitatif dalam riset ini memberikan cetak biru (*blueprint*) bagi manajemen kawasan industri untuk beralih dari strategi perawatan berbasis kalender konvensional menuju strategi *Predictive Green Maintenance*. Implementasi praktis dari kerangka kerja ini mencakup dua pilar utama. Pertama, reduksi *carbon footprint* tidak dilakukan secara langsung dengan mendeteksi penurunan nilai indeks efisiensi sistem sebelum pompa terpaksa beroperasi pada Rotasi Per Menit (RPM) yang tinggi. Perusahaan dapat memangkas konsumsi listrik bulanan secara signifikan, sehingga secara langsung menekan emisi karbon dari penggunaan energi listrik secara masif. Kedua, perpanjangan umur pakai aset (*Asset Lifecycle Optimization*); penghentian operasional pompa tepat saat getaran mencapai nilai kritis rata-rata 3.12 mm/s mampu mencegah

terjadinya kerusakan struktural masif pada impeller dan motor, sehingga secara signifikan menghemat biaya kapital (CapEx) untuk penggantian suku cadang yang mahal.

## KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan memvalidasi *Green Maintenance Framework* berbasis *machine learning* untuk mengoptimalkan keandalan operasional pompa sirkulasi pada fasilitas *Wastewater Treatment Plant* (WWTP) dengan sistem *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) di kawasan industri. Melalui pendekatan rekayasa fitur fisis, kerangka kerja yang diusulkan terbukti mampu mengeliminasi bias administratif (*administrative bias*) dan *noise acak* yang melekat pada sistem pencatatan log historis konvensional di pabrik. Berdasarkan visualisasi matriks korelasi, log historis awal menunjukkan pola hubungan linier yang kaku dan seragam (0.72 sampai 0.73) terhadap seluruh parameter sensor, yang mengonfirmasi bahwa tindakan perawatan selama ini hanya dipicu oleh jadwal kalender birokrasi, bukan oleh kondisi mekanis aset yang sebenarnya. Sebaliknya, indeks efisiensi sistem yang direkayasa dalam riset ini berhasil menangkap korelasi fisis yang kuat terhadap variabel getaran (0.84), sehingga memberikan basis prediktif yang jauh lebih akurat dan responsif.

Secara komputasional, implementasi algoritma *Random Forest Classifier* menghasilkan performa klasifikasi yang mutakhir dengan tingkat akurasi, presisi, dan *recall* mencapai 100.00% pada data uji. Keberhasilan pengenalan pola tanpa error (zero false negatives) ini didorong oleh kemampuan algoritma dalam memetakan batasan deterministik multisensorik dari hukum fisika kegagalan mesin secara presisi. Dari analisis tingkat kepentingan fitur (*feature importance*), parameter Vibration (getaran) teridentifikasi sebagai prediktor paling dominan dengan skor kontribusi tertinggi, disusul secara ketat oleh parameter suhu, sedangkan parameter tekanan tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap perubahan status kritis pompa. Temuan ini memberikan kontribusi praktis bagi manajemen pemeliharaan dalam memprioritaskan alokasi anggaran dan perhatian teknisi pada kalibrasi sensor getaran dan termal guna mendeteksi gejala awal kegagalan struktural pompa sebelum kerusakan masif terjadi.

Secara kontekstual dan implikasi ekonomi teknik, riset ini membuktikan bahwa degradasi performa pompa sirkulasi pada sistem *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) berdampak sistemik terhadap inefisiensi energi laten dan risiko lingkungan. Ketika pompa memasuki fase kritis, putaran motor listrik melonjak hingga 2102.16 RPM akibat akumulasi material

pekat air limbah pada impeller, namun debit hidrolis (*Flow rate*) merosot hingga 9.06 m<sup>3</sup>/jam. Penurunan debit ini merusak turbulensi reaktor Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), menyebabkan media *carrier* plastik mengendap (*dead zone*), memicu kondisi anoksik lokal yang mematikan biofilm bakteri pengurai, serta mengancam pemenuhan baku mutu lingkungan terkait kadar Chemical Oxygen Demand (COD), Biological Oxygen Demand (BOD), dan amonia yang melampaui regulasi Permen LHK No. P.68/2016). Melalui konversi tarif listrik industri Pembangkit Listrik Negara (PLN) golongan I-3 (Rp1.115/kWh) pada motor standar 30 kW, inefisiensi mekanis ini memicu lonjakan beban daya aktual dari 25,5 kW menjadi 33,31 kW. Keterlambatan intervensi selama satu bulan penuh (720 jam) berimplikasi pada pemborosan energi sebesar 5.623 kWh atau setara dengan kerugian finansial sia-sia sebesar Rp6.271.236, - per unit pompa.

Meskipun model yang diusulkan memberikan hasil yang sangat akurat dan berdampak signifikan pada manufaktur hijau, penelitian ini memiliki keterbatasan karena baru divalidasi pada satu jenis pompa sirkulasi utama di lingkungan Wastewater Treatment Plant (WWTP) industri berskala homogen. Sebagai rekomendasi untuk penelitian masa depan (*future research*), kerangka kerja *Predictive Green Maintenance* ini dapat diperluas dengan mengintegrasikan algoritma pembelajaran mendalam (*Deep Learning*), seperti Long Short-Term Memory (LSTM), untuk memprediksi sisa umur pakai aset (*Remaining Useful Life/RUL*) secara lebih dinamis. Selain itu, perlu diuji performa model AI yang berhasil mengklasifikasikan kondisi operasional pompa dengan tingkat akurasi yang baik pada variasi arsitektur pompa dengan spesifikasi berbeda, serta pada jenis limbah industri non-Newtonian yang lebih heterogen.

## DAFTAR REFERENSI

- Ahmad, T., Zhang, D., & Huang, C. (2021). Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status quo, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125834>
- Chen, X., Liu, Y., & Wang, S. (2023). Predictive maintenance for industrial pumps using machine learning algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 182, 109539. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109539>
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2021). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (5th ed.). SAGE Publications.

- Jawahir, I. S., & Bradley, R. (2020). Technological elements of circular economy and the principles of 6R-based closed-loop material flow in sustainable manufacturing. *Procedia CIRP*, *40*, 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.067>
- Kumar, A., Singh, R. K., & Modgil, S. (2022). Exploring the relationship between energy efficiency and green manufacturing practices in industrial sectors. *Resources, Conservation and Recycling*, *181*, 106246. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106246>
- Li, W., Zhang, C., & Zhao, X. (2023). Sustainable industrial energy management and operational efficiency in manufacturing systems. *Energy Reports*, *9*, 1512–1524. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.02.091>
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (2021). *Naturalistic inquiry*. SAGE Publications.
- Maris, S. (2022). *Large industrial pump maintenance dataset*. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/selonamaris/large-industrial-pump-maintenance-dataset>
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2020). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook* (4th ed.). SAGE Publications.
- Moktadir, M. A., Rahman, T., Rahman, M. H., Ali, S. M., & Paul, S. K. (2021). Drivers of sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, *280*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124137>
- Patton, M. Q. (2020). *Qualitative research & evaluation methods* (4th ed.). SAGE Publications.
- Pham, H., Thomas, A., & Medland, T. (2021). Green manufacturing and sustainable industrial transformation: A systematic review. *Sustainability*, *13*(14), 7682. <https://doi.org/10.3390/su13147682>
- Saidur, R., Hasanuzzaman, M., & Mekhilef, S. (2020). Energy efficiency improvements in industrial pump systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *134*, 110125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110125>
- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2021). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and energy management approaches. *International Journal of Production Research*, *59*(6), 1937–1956. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1712492>
- Wang, J., Li, Y., & Sun, Q. (2022). Assessment of industrial pump efficiency under variable operational conditions. *Energy Procedia*, *158*, 4201–4208.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2022.01.215>

- Yoon, J., Kim, H., & Lee, D. (2023). Green manufacturing capability and operational sustainability in industrial sectors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 102118. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.102118>
- Zhang, Y., Liu, H., & Wang, X. (2022). Operational performance assessment of industrial pump systems for energy efficiency optimization. *Energy Reports*, 8, 2450–2461. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2022.01.145>
- Zhao, R., Yan, R., Chen, Z., Mao, K., Wang, P., & Gao, R. X. (2021). Deep learning and its applications to machine health monitoring: A survey. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115, 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106287>
- Zheng, P., Wang, H., Sang, Z., Zhong, R. Y., Liu, Y., Liu, C., ... Xu, X. (2020). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 137–150. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5>
- Zhou, Y., Li, H., & Wang, L. (2020). Operational optimization in wastewater treatment plants under sustainability constraints. *Water Research*, 181, 115832. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115832>