

Monitoring Pemeliharaan Prediktif Agitator Mixer pada Water Treatment Berbasis Data (IoT)

Aris Puja Widikda*, Angga Debby Frayudha

Politeknik Semen Indonesia

*E-mail:widikda@gmail.com

Abstract

Article history:

Received: 31-10-2025

Accepted: 25-11-2025

Published: 29-12-2025

Keywords:

agitator mixer;
anomaly detection;
internet of things;
predictive maintenance;
water treatment.

Clean water is a vital necessity for human life and industry, so the clarity of the water treatment system (water treatment) is a crucial factor in maintaining the continuity of clean air supply. One of the important component in this system is the agitator mixer, which functions to mix coagulant and flocculant chemicals so that the dirt particle inspection process runs optimally. Damage to the agitator such as bearing wear, blade alignment, or electric motor disruption can cause a decrease in air quality and increase maintenance costs. This research developed an Internet of Things (IoT)-based predictive maintenance monitoring system to detect the working condition of the agitator mixer in real-time through vibration, temperature, and rotational speed (RPM) sensors. The obtained data was analyzed using the Isolation Forest algorithm to detect anomalies and ANFIS to predict maintenance times. The test results showed a MAPE value of 0.518% and a correlation coefficient of 0.9997, indicating high accuracy between sensor data and actual conditions. This system is able to provide early warning of potential damage, so that maintenance can be carried out in a planned manner without stopping the water treatment process. The implementation of this system improves operational efficiency, extends equipment life, and supports the digital transformation towards a smart and sustainable water treatment industry.

1. Pendahuluan

Air bersih merupakan kebutuhan vital bagi kehidupan manusia dan industri. Seiring meningkatnya aktivitas industri dan urbanisasi, kebutuhan terhadap sistem pengolahan air (*water treatment*) yang efisien dan berkelanjutan menjadi semakin mendesak. Salah satu komponen penting dalam sistem pengolahan air adalah *agitator mixer*, yaitu perangkat yang berfungsi mencampur bahan kimia koagulan dan flokulan agar proses pemisahan partikel kotoran berlangsung optimal[1]. Namun demikian, kerusakan pada *agitator mixer* seperti keausan bantalan (*bearing*), ketidakseimbangan bilah, atau gangguan pada motor listrik, seringkali menimbulkan gangguan operasional yang signifikan, menurunkan kualitas air olahan, serta meningkatkan biaya perawatan.

Sistem *water treatment* berperan sangat penting dalam menjamin ketersediaan air bersih dan aman bagi kebutuhan industri maupun masyarakat. Proses pengolahan air ini melibatkan berbagai tahapan fisik, kimia, dan biologis yang bergantung pada kinerja optimal peralatan seperti *agitator mixer*, pompa, dan sensor kualitas air[2]. Oleh karena itu, pemeliharaan yang efisien dan terencana

menjadi krusial untuk mencegah downtime atau gangguan operasi yang dapat menghambat kontinuitas suplai air. Dengan penerapan monitoring pemeliharaan prediktif berbasis data IoT, kondisi peralatan dapat dipantau secara *real-time* melalui sensor yang mengumpulkan parameter seperti getaran, suhu, dan kecepatan putaran, sehingga potensi kerusakan dapat dideteksi lebih awal. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem *water treatment*, tetapi juga menekan biaya perawatan dan memastikan proses pengolahan air tetap berjalan secara kontinu, aman, dan sesuai standar kualitas.

Agitator mixer merupakan komponen penting dalam sistem pengolahan air (*water treatment plant*) yang berfungsi untuk mencampur bahan kimia secara merata dan memastikan proses reaksi kimia berjalan optimal. Peralatan ini digunakan pada berbagai tahap pengolahan, seperti koagulasi, flokulasi, dan netralisasi, dimana pencampuran yang homogen membantu pembentukan flok dan pemisahan kotoran dari air[3]. Kinerja *agitator* yang stabil sangat menentukan kualitas hasil pengolahan, karena pencampuran yang tidak sempurna dapat menyebabkan efisiensi penjernihan menurun dan sisa bahan kimia yang

berlebihan dalam air. Oleh sebab itu, pemantauan dan pemeliharaan *agitator* secara berkelanjutan, terutama melalui sistem pemantauan prediktif berbasis IoT, sangat penting untuk mendeteksi potensi kerusakan sejak dini, menjaga kontinuitas operasi, serta memastikan proses pengolahan air berlangsung efektif dan sesuai standar kualitas yang diharapkan.

Selama ini, metode perawatan *agitator* di instalasi pengolahan air umumnya masih bersifat reaktif atau preventif terjadwal[4]. Pendekatan ini memiliki keterbatasan karena tidak mampu memantau kondisi aktual peralatan secara *real-time*. Operator harus melakukan pemeriksaan langsung ke lapangan untuk memastikan kinerja mesin, yang tidak hanya memakan waktu, tetapi juga meningkatkan risiko *downtime* akibat keterlambatan deteksi kerusakan. Kondisi ini menunjukkan perlunya pendekatan baru berbasis data dan teknologi digital yang memungkinkan pemantauan kondisi *agitator* secara terus-menerus tanpa kehadiran fisik operator di lokasi.

Kemajuan teknologi *Internet of Things (IoT)* membuka peluang besar untuk mengatasi permasalahan tersebut. Dengan mengintegrasikan sensor getaran, suhu, dan kecepatan putaran (*RPM*) pada unit *agitator*, data kondisi mesin dapat dikirim secara nirkabel ke *dashboard* pemantauan berbasis *cloud*[5]. *Dashboard* ini memungkinkan operator untuk mendeteksi anomali sejak dini, menerima notifikasi otomatis saat terdeteksi indikasi kerusakan, serta melakukan tindakan pemeliharaan sebelum kegagalan total terjadi. Pendekatan ini dikenal sebagai pemeliharaan prediktif (*Predictive Maintenance/PdM*), yaitu strategi pemeliharaan yang memanfaatkan data sensor dan analisis cerdas untuk memperkirakan kapan mesin akan mengalami kerusakan.

Penerapan sistem *monitoring* berbasis IoT dengan metode PdM pada *agitator mixer* diharapkan dapat meningkatkan efisiensi operasional, memperpanjang umur peralatan, dan menurunkan biaya perawatan[6]. Selain itu, penggunaan *dashboard* berbasis data memberikan kemudahan bagi operator untuk melakukan pengawasan jarak jauh, sehingga frekuensi inspeksi langsung ke lapangan dapat dikurangi tanpa mengorbankan keandalan sistem.

Pemeliharaan prediktif merupakan pendekatan yang semakin penting dalam industri modern, terutama dalam konteks pengelolaan fasilitas air[7]. Dengan memanfaatkan data yang diperoleh dari kondisi nyata peralatan, pemeliharaan prediktif dapat memprediksi dan mencegah kegagalan sebelum terjadi, sehingga mengurangi waktu henti dan biaya pemeliharaan yang tidak perlu[7, 8]. Integrasi *Internet of Things (IoT)* dalam sistem pemeliharaan prediktif telah merevolusi cara industri beroperasi, memungkinkan pemantauan dan pengumpulan data secara terus-menerus melalui sensor pintar yang terpasang pada peralatan[6]. Dalam pengolahan air, *agitator mixer* memainkan peran penting dalam memastikan pencampuran bahan kimia yang tepat dan efisien, yang sangat krusial untuk proses pengolahan air yang efektif[2].

Sistem pemeliharaan prediktif berbasis IoT menawarkan solusi yang inovatif untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan *agitator mixer*[2]. Dengan memanfaatkan sensor untuk memantau parameter seperti getaran, suhu, dan tekanan, data yang dikumpulkan dapat dianalisis untuk mendeteksi anomali dan memprediksi kemungkinan kegagalan. Pendekatan ini tidak hanya membantu dalam merencanakan pemeliharaan yang lebih baik, tetapi juga meningkatkan umur peralatan dan mengurangi risiko kegagalan yang dapat mengganggu proses pengolahan air[5].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan pemeliharaan prediktif berbasis data untuk *agitator mixer* di fasilitas pengolahan air. Fokus utama dari penelitian ini adalah pada penerapan teknik analisis data dan algoritma pembelajaran mesin untuk mengoptimalkan jadwal pemeliharaan dan meningkatkan keberlanjutan operasional. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap praktik pemeliharaan di industri pengolahan air, serta meningkatkan kualitas dan keandalan layanan pengolahan air bagi masyarakat.

2. Metode

Metode penelitian ini mencakup enam tahap utama, yaitu studi pendahuluan untuk menentukan parameter pemantauan, perancangan sistem sensor mikrokontroler, *dashboard* berbasis IoT, implementasi dan pengujian prototipe, akuisisi serta analisis data

menggunakan algoritma *machine learning*, validasi dan evaluasi performa sistem di lapangan, serta diseminasi hasil penelitian melalui uji penerapan dan publikasi guna memastikan efektivitas sistem pemeliharaan prediktif *agitator mixer*[9].

Penelitian ini diawali dengan studi pendahuluan untuk memahami permasalahan sekaligus mengidentifikasi parameter yang perlu diukur agar sistem yang dikembangkan tepat sasaran. Tahap berikutnya adalah merancang sistem sensor berbasis mikrokontroler beserta dasbor pemantauannya, meliputi pemilihan sensor, perancangan rangkaian elektronik, serta pengembangan antarmuka untuk menampilkan data. Sistem yang telah dirancang diimplementasikan dalam bentuk prototipe dan diuji untuk memastikan seluruh komponen berfungsi dengan baik serta data yang dihasilkan akurat. Prototipe yang telah berfungsi digunakan untuk proses akuisisi data lapangan, dan dianalisis menggunakan metode *machine learning* untuk menemukan pola, membuat prediksi, atau menghasilkan model analitis. Model dan sistem kemudian divalidasi secara langsung di lapangan untuk mengevaluasi keakuratan, stabilitas, serta kesesuaiannya dengan kebutuhan nyata.

2.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development (R&D)* dengan pendekatan 4D (*Define, Design, Develop, Disseminate*) yang diadaptasi dari model pengembangan Thiagarajan, Semmel, dan Semmel. Model ini dipilih karena memberikan kerangka pengembangan yang sistematis dan berorientasi pada produk teknologi, dimulai dari identifikasi kebutuhan hingga tahap penerapan dan evaluasi di lapangan[9].

2.2 Tahap Define (Pendefinisian)

Tahap ini bertujuan untuk mengidentifikasi kebutuhan sistem, menentukan parameter pemantauan yang relevan, dan merumuskan tujuan pengembangan[10]. Langkah-langkah pada tahap ini meliputi analisis kebutuhan sistem yang dilakukan melalui studi literatur terkait sistem pemantauan mesin, *Predictive Maintenance (PdM)*, dan teknologi IoT[11]. Selanjutnya analisis parameter teknis, yang mencakup pengukuran getaran, suhu, dan kecepatan putaran (RPM) sebagai indikator

utama kinerja agitator. Ketiga parameter ini digunakan untuk mendeteksi gejala awal kerusakan seperti ketidakseimbangan, *misalignment*, atau *overheating*. Spesifikasi sistem, ditetapkan untuk menghasilkan prototipe yang mampu memantau kondisi agitator secara *real-time*, mendeteksi anomali, dan memberikan notifikasi dini melalui *dashboard web* berbasis IoT.

Hasil dari tahapan ini adalah dokumen spesifikasi kebutuhan sistem (*system requirement specification*), parameter pemantauan yang akan digunakan, serta rancangan konseptual fungsi utama sistem.

2.3 Tahap Design (Perancangan)

Tahap ini mencakup perancangan arsitektur sistem *Predictive Maintenance* berbasis IoT yang terdiri dari tiga komponen utama yaitu unit sensor yang terdiri dari sensor getaran (ADXL345), suhu (DS18B20), dan rotasi (*Hall Effect A3144*)[8]. Perancangan unit pemrosesan: mikrokontroler ESP32 DevKit, berfungsi sebagai pusat akuisisi dan transmisi data melalui protocol MQTT ke *server cloud*. *Dashboard* pemantauan antarmuka berbasis *webdashboard* menggunakan *ThingsBoard CE* sebagai platform visualisasi data *real-time*.

Rancangan sistem mempertimbangkan aspek modularitas, efisiensi energi dan stabilitas jaringan agar transmisi data berlangsung andal[12].

2.4 Tahap Develop (Pengembangan)

Pada tahap ini dilakukan implementasi rancangan sistem menjadi prototipe fungsional melalui langkah-langkah, pertama pembuatan perangkat keras (*hardware*) mikrokontroler ESP32 diintegrasikan dengan sensor getaran, suhu, dan RPM. Komponen tambahan meliputi *PCB board*, *power supply 5V*, dan *enclosure IP66*, tahap kedua dilakukan pemrograman perangkat lunak (*firmware*) yang dilakukan menggunakan Arduino IDE v2.1, yang memungkinkan pembacaan data sensor dan pengiriman ke *server ThingsBoard* melalui protokol MQTT, tahapan ketiga dilakukan pengembangan aplikasi antarmuka dimana *dashboard real-time* menampilkan grafik getaran, suhu, dan RPM serta memberikan peringatan visual saat parameter melampaui ambang batas, dan tahap selanjutnya dilakukan uji validasi laboratorium melalui *bench testing* dengan variasi kecepatan

agitator dan beban kerja untuk menilai akurasi sensor dan kestabilan transmisi data.

Hasil tahap ini berupa sistem pemantauan agitator berbasis IoT dengan nilai MAPE sebesar 0,518% dan koefisien korelasi 0,9997, dengan tingkat presisi tinggi terhadap data aktual.

2.5 Tahap Disseminate (Diseminasi)

Tahap ini merupakan penerapan dan penyebaran hasil penelitian melalui uji lapangan di Instalasi Pengolahan Air (WTP) PT. Semen Indonesia (Gresik, Jawa Timur) pada periode Agustus–Desember 2025. Pengujian dilakukan pada motor listrik AC penggerak pompa sentrifugal, yang merupakan aset kritis dalam sistem distribusi air, selanjutnya dilakukan evaluasi pengguna, berupa pengumpulan umpan balik dari teknisi dan operator terkait kemudahan penggunaan dan keandalan system, kemudian publikasi dan pelatihan, berupa kegiatan diseminasi hasil penelitian kepada pihak industri dan akademisi untuk mendorong adopsi sistem serupa. Tahapan ini mengacu pada model validasi lapangan Sihombing, yang menekankan difusi teknologi ke lingkungan pengguna akhir[10].

2.6 Pengumpulan dan Analisis Data

2.6.1 Akuisisi Data

Sensor dipasang pada kedudukan bantalan motor agitator. Akuisisi data berupa getaran dalam unit meter/second², suhu dalam Celcius, dan putaran dalam RPM. Data dikirim secara *real-time* ke *cloud server* melalui protokol MQTT dengan mekanisme *buffering and retry* untuk menjaga reliabilitas koneksi[13].

2.6.2 Penentuan Ambang Batas (Threshold)

Batas toleransi diadopsi dari standar internasional seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Ambang batas sensor

Parameter	Normal	Warning	Danger	Sumber
Suhu (°C)	<80	80-100	>100	IEEE/IEC
Getaran (mm/s RMS)	0-2.8	2.8-4.5	>4.5	ISO 10816
Putaran	±5% RPM	—	>5% RPM	ISO 20816

2.6.3 Analisis dan Model Prediksi

Dua algoritma digunakan dalam tahap ini yaitu *Isolation Forest (IF)* untuk klasifikasi kondisi data sensor (deteksi anomali)[14] dan

ANFIS untuk permodelan prediksi pemeliharaan mesin[15].

Keterbatasan data kerusakan aktual diatasi dengan *Generative Adversarial Networks (GAN)* untuk menghasilkan data anomali sintetis, yang terbukti meningkatkan akurasi model prediksi[16].

2.6.5 Validasi Sistem

Validasi sistem dilakukan dengan melakukan *unit testing* yaitu memastikan sensor, mikrokontroler, dan komunikasi data berjalan sesuai spesifikasi. Selanjutnya dilakukan model validation dengan *time-series split*, dievaluasi menggunakan metrik *Precision, Recall, F1-Score*, dan PR-AUC. Kemudian dilakukan *field test* dengan membandingkan hasil prediksi sistem dengan inspeksi manual teknisi selama 30 hari operasi.

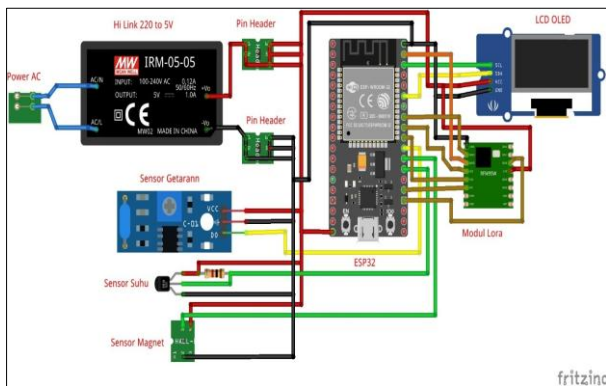
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian menjelaskan penerapan sistem pemantauan yang dirancang untuk mendeteksi kondisi kerja agitator mixer secara *real-time* melalui sensor getaran, suhu, dan arus listrik yang terintegrasi dengan *platform Internet of Things (IoT)*[17]. Data yang dikumpulkan dianalisis untuk mengidentifikasi pola operasi normal dan indikasi dini kerusakan seperti ketidakseimbangan, keausan bantalan, atau peningkatan suhu motor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan peringatan dini terhadap anomali performa sebelum terjadi gangguan serius, sehingga pemeliharaan dapat dilakukan secara terencana tanpa menghentikan proses pengolahan air. Pembahasan menekankan bahwa pendekatan ini meningkatkan efisiensi operasional, memperpanjang umur peralatan, dan menjamin kontinuitas proses pencampuran bahan kimia dalam water treatment agar kualitas air tetap terjaga sesuai standar.

3.1 Rancangan Sistem

Rancangan sistem IoT *predictive maintenance* ditunjukkan pada Gambar 1. Bagian transmitter terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu ESP32 sebagai mikrokontroler pengendali sistem, modul LoRa Ra-02 sebagai alat komunikasi nirkabel jarak jauh, sensor suhu DS18B20 yang berfungsi membaca suhu lingkungan atau media (misalnya air), serta resistor 4.7kΩ yang digunakan sebagai pull-up resistor untuk menjaga kestabilan komunikasi

data sensor[18]. Dalam proses kerjanya, sensor DS18B20 membaca nilai suhu dan mengirimkannya ke ESP32. Data tersebut kemudian diteruskan ke modul LoRa Ra-02 melalui komunikasi SPI. Modul LoRa bertugas memancarkan data suhu secara nirkabel ke bagian penerima. Pada bagian koneksi, sensor DS18B20 dihubungkan ke salah satu pin GPIO ESP32 dengan tambahan resistor 4.7kΩ, sedangkan modul LoRa dihubungkan melalui pin MISO, MOSI, SCK, dan NSS (CS), serta mendapatkan suplai daya dari 3.3V dan GND.



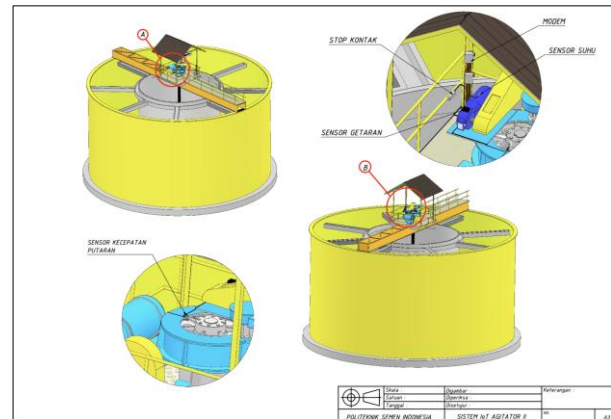
Gambar 1. Rancangan *IoT predictive maintenance*

Sementara itu, bagian receiver juga menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama yang menerima dan memproses data dari modul LoRa Ra-02. Data suhu yang diterima kemudian ditampilkan pada layar OLED (I²C) agar pengguna dapat memantau hasil pengukuran secara langsung. Dalam sistem ini, LoRa receiver menerima sinyal suhu dari transmitter, lalu ESP32 membaca dan memproses data tersebut sebelum mengirimkannya ke *OLED Display*. Koneksi antar perangkat dilakukan melalui jalur SPI untuk LoRa dan jalur I²C (SDA, SCL, VCC, GND) untuk *OLED Display*.

Secara keseluruhan, alur kerja sistem ini berjalan sebagai berikut: pertama, sensor DS18B20 mengukur suhu, lalu ESP32 transmitter mengirimkan data ke modul LoRa Ra-02. Selanjutnya, *LoRa transmitter* memancarkan data melalui gelombang radio (frekuensi 433/868/915 MHz tergantung modul yang digunakan). Data tersebut kemudian diterima oleh *LoRa receiver*, yang diteruskan ke ESP32 penerima untuk diproses, dan akhirnya hasil pembacaan suhu ditampilkan pada layar OLED. Dengan cara ini, sistem mampu melakukan pemantauan suhu secara jarak jauh,

real-time, dan efisien tanpa perlu koneksi internet.

Desain penempatan sensor IoT ditunjukkan pada Gambar 2. Gambar 2 menunjukkan penempatan sensor-sensor pada sistem *agitator* di instalasi pengolahan air (*Water Treatment*) yang dirancang untuk mengirimkan data secara otomatis ke *platform IoT* melalui MQTT.



Gambar 2. Desain penempatan sensor IoT

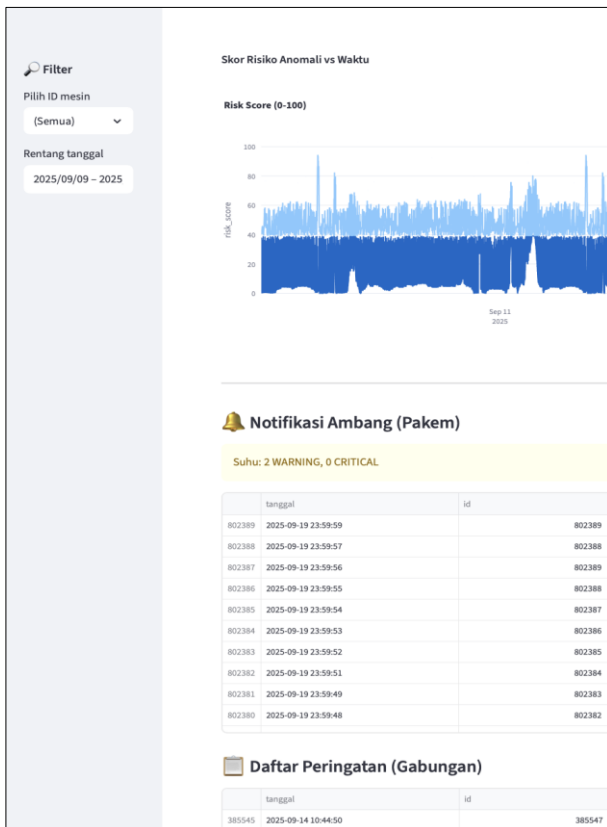
Pada sistem ini, sensor suhu dipasang di bagian motor penggerak agitator untuk memantau peningkatan suhu akibat beban berlebih atau gesekan pada komponen mekanik. Sensor getaran ditempatkan di sisi poros atau dudukan motor, berfungsi mendeteksi ketidakseimbangan, kerusakan bantalan (*bearing*), atau getaran abnormal selama operasi. Sementara itu, sensor kecepatan putaran (RPM) dipasang di bagian bawah tangki, dekat poros agitator, untuk menghitung jumlah putaran per menit menggunakan prinsip deteksi magnetik atau optik.

Ketiga sensor tersebut dihubungkan ke mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pusat pemrosesan data. ESP32 membaca sinyal dari masing-masing sensor, kemudian mengonversinya menjadi data digital. Selanjutnya, data suhu, getaran, dan kecepatan dikirimkan secara nirkabel melalui jaringan *Internet of Things (IoT)* menggunakan protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*).

Data tersebut diterima oleh aplikasi *dashboard* dan MQTTX yang berperan sebagai *client interface* untuk menampilkan informasi secara *real-time*. Dengan sistem ini, operator dapat memantau kondisi *agitator* dari jarak jauh, mendeteksi potensi kerusakan lebih awal, dan mengambil tindakan pemeliharaan sebelum terjadi kegagalan total pada sistem *agitator*.

Tampilan gambar *dashboard* pada sistem monitoring yang berfungsi untuk memantau kondisi operasional mesin secara *real-time* menampilkan hasil pengukuran cepat nilai getaran, suhu, kecepatan putaran (RPM), dan level keausan pada bagian atas *dashboard*. Sistem ini membandingkan data aktual dengan batas ambang yang ditetapkan berdasarkan standar ISO 10816, untuk menentukan apakah kondisi mesin tergolong normal, waspada, atau berpotensi rusak. Apabila nilai sensor melebihi ambang batas, indikator akan menampilkan peringatan secara otomatis agar operator segera melakukan pemeriksaan.

Desain *dashboard machine learning Isolation forest* dan ANFIS diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain *dashboard machine learning Isolation forest* dan ANFIS

Grafik *dashboard* memperlihatkan tren data sensor (vibrasi, suhu, atau arus motor) terhadap waktu, sehingga perubahan kecil sekalipun dapat terdeteksi dengan jelas. Selain itu, sistem juga mencatat riwayat pengukuran dan kejadian peringatan dalam bentuk tabel, yang memudahkan analisis performa mesin dan pelacakan sumber masalah. Semua data dikirim melalui protokol MQTT dari sensor ke server

dan divisualisasikan dalam *dashboard* berbasis *web* yang memungkinkan pemantauan jarak jauh tanpa perlu ke lokasi[19].

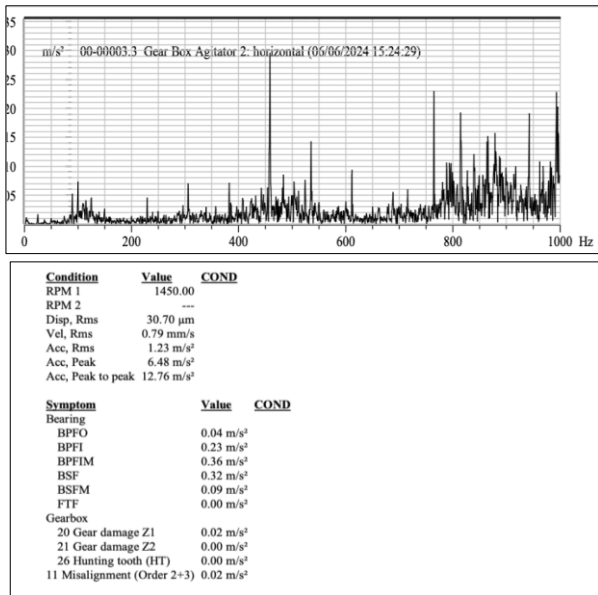
Sistem ini menggunakan metode *machine learning Isolation Forest* untuk mendeteksi anomali data sensor, seperti lonjakan getaran atau suhu yang tidak normal, sehingga potensi kerusakan dapat diidentifikasi lebih awal. Selain itu, sistem juga menerapkan metode *machine learning ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)* untuk memprediksi waktu optimal pemeliharaan *agitator*, berdasarkan pola historis data operasi mesin[15]. Dengan kombinasi kedua algoritma ini, sistem mampu memberikan peringatan dini dan prediksi waktu pemeliharaan secara cerdas, mendukung penerapan konsep *predictive maintenance* berbasis data IoT secara akurat dan efisien.

Integrasi *Isolation Forest* dan ANFIS merupakan pendekatan yang relatif baru dalam konteks *water treatment*, terutama untuk: monitoring kondisi mesin berbasis IoT, deteksi anomali sensor, prediksi waktu pemeliharaan peralatan seperti *agitator*. Pendekatan ini memiliki nilai kebaruan kuat, terutama bila diimplementasikan dalam satu alur kerja IoT *real-time* dengan *dashboard* monitoring.

3.2 Hasil Pengukuran Manual

Hasil pengukuran manual getaran menggunakan vibrasi meter diperlihatkan pada Gambar 4. Berdasarkan hasil pengukuran getaran *Gear Box Agitator 2* (arah horizontal) pada tanggal 06 Juni 2024 pukul 15:24:29, mesin beroperasi pada kecepatan 1450 rpm dengan nilai *displacement* 30,70 μm , kecepatan getaran (*velocity RMS*) 0,79 mm/s, dan percepatan getaran (*acceleration RMS*) 1,23 m/s^2 . Nilai puncak percepatan (*peak*) sebesar 6,48 m/s^2 serta *peak-to-peak* mencapai 12,76 m/s^2 , yang masih tergolong normal berdasarkan standar ISO 10816 untuk mesin industri menengah. Analisis gejala getaran menunjukkan bahwa komponen *bearing* memiliki nilai BPFO 0,04 m/s^2 , BPF1 0,23 m/s^2 , BPFIM 0,36 m/s^2 , BSF 0,32 m/s^2 , dan BSEFM 0,09 m/s^2 , yang semuanya berada pada kisaran rendah tanpa indikasi kerusakan serius. Untuk bagian *gearbox*, nilai *gear damage Z1* dan *Z2* masing-masing sebesar 0,02 m/s^2 , sedangkan *misalignment (Order 2+3)* juga hanya 0,02 m/s^2 , dan *hunting tooth (HT)* tidak terdeteksi. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa kondisi *gearbox* dan *bearing agitator* masih dalam keadaan baik dan

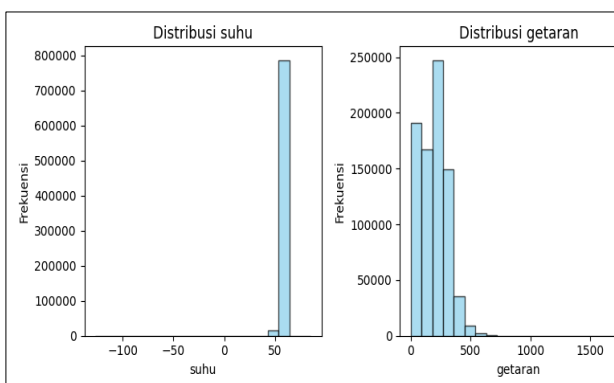
stabil, tanpa adanya indikasi ketidaksejajaran, kerusakan gigi, atau getaran abnormal yang signifikan.



Gambar 4. Pengukuran manual getaran menggunakan vibrasi meter

3.3 Hasil Pengukuran

Hasil pengukuran dengan menggubakan desain *predictive maintenance* ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar 5 menunjukkan distribusi data sensor terhadap parameter yang diukur. Hasil pengukuran ditampilkan dalam grafik histogram yang terdiri dari tiga histogram yang menggambarkan distribusi data sensor pada sistem pemantauan *agitator mixer* berbasis IoT, yaitu suhu, getaran, dan RPM (*rotation per minute*).



Gambar 5. Uji distribusi data sensor

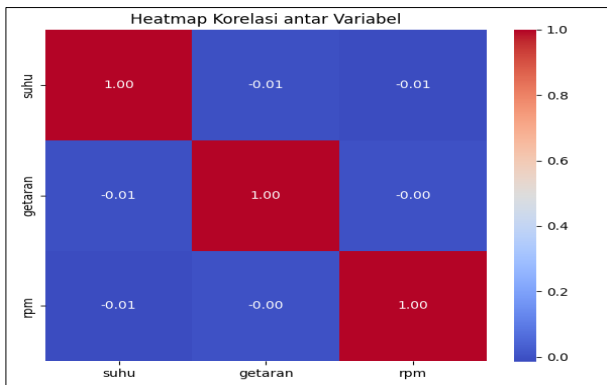
Dari Gambar 5 terlihat bahwa hampir seluruh distribusi nilai suhu terkonsentrasi pada kisaran 30–40°C yang berarti *agitator* beroperasi dalam kondisi stabil dan aman, tanpa

indikasi *overheating*. Tidak ada data di luar rentang ini, menandakan sistem pendinginan bekerja baik. Sementara distribusi getaran memperlihatkan data getaran tersebar pada rentang 0–600 mm/s^2 , dengan puncak frekuensi sekitar 200–300 mm/s^2 , yang mengindikasikan aktivitas mekanis normal, walau rentang distribusi yang lebih lebar dapat menunjukkan adanya variasi operasi atau beban *agitator* yang berubah-ubah. Jika lonjakan di atas 600 mm/s^2 , maka menandakan potensi *imbalance* atau kerusakan bantalan. Sedangkan distribusi RPM putaran motor memperlihatkan data pada putaran rendah (0–100 RPM). Hal ini menandakan *agitator* beroperasi dengan kecepatan konstan dan terkendali, tanpa fluktuasi besar. Jika distribusi meluas atau terdapat anomali (misalnya deviasi >5%), dapat menjadi tanda *slip* atau gangguan mekanik.

3.4 Interpretasi Korelasi Data

Hasil uji korelasi data IoT pada *predictive maintenance agitator mixer* diperlihatkan pada Gambar 6. Interpretasi nilai korelasi suhu dengan getaran dengan korelasi -0.01 , yang berarti tidak ada hubungan signifikan antara suhu motor dan tingkat getaran. Kenaikan suhu tidak selalu diikuti oleh perubahan getaran. Korelasi antara suhu dengan RPM sebesar -0.01 , juga menunjukkan hubungan sangat lemah. Kecepatan putaran *agitator* tidak berpengaruh langsung terhadap suhu. Sementara getaran dengan RPM juga memiliki korelasi -0.00 , yang mengindikasikan tidak ada hubungan linear antara getaran dan kecepatan putaran. Variasi getaran kemungkinan lebih dipengaruhi faktor mekanis seperti ketidakseimbangan atau kondisi bantalan, bukan RPM

Berdasarkan *heatmap* ini, ketiga parameter (suhu, getaran, rpm) bekerja secara independent satu sama lain dalam kondisi operasi normal. Hal ini berarti sistem *agitator* stabil tidak ada tanda bahwa peningkatan suhu, perubahan kecepatan, atau getaran saling memengaruhi secara signifikan. Ini juga mengindikasikan bahwa alat sensor berfungsi baik dan tidak ada anomali kuat dalam hubungan antar variabel operasional.



Gambar 6. uji korelasi data IoT PDMWT

Pengujian pada 30 uji t (10 pasang hari × 3 variabel) menunjukkan semua uji memiliki p-value < 0,05 kecuali 1 perbandingan RPM (15–16 September 2025) seperti ditunjukkan dalam Tabel 2. Berdasarkan hasil Uji t Welch antar tanggal berurutan ($\alpha = 0.05$) terhadap suhu, getaran, dan RPM selama 11 hari (9–19 September 2025), diperoleh bahwa semua variabel mengalami perubahan signifikan antar hari (> 90%). Suhu dan getaran berubah signifikan setiap hari (100%), menunjukkan fluktuasi besar yang konsisten, RPM relatif lebih stabil, namun masih mengalami perbedaan signifikan pada 9 dari 10 hari. Temuan ini menunjukkan bahwa proses atau sistem mesin tidak berada dalam kondisi operasi konstan, melainkan mengalami dinamika atau variasi performa setiap hari.

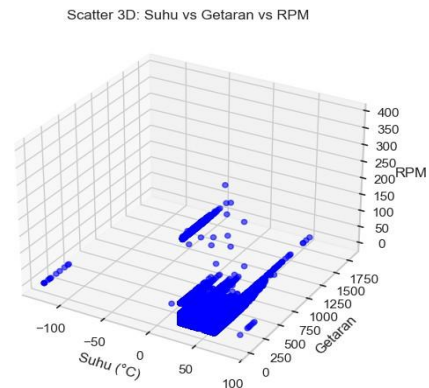
Kondisi ini bisa diakibatkan oleh variasi beban atau waktu operasi mesin, gangguan sensor atau kondisi lingkungan, atau indikasi adanya anomali operasional berulang

Tabel 2. uji signifikan data IoT PDMWT

Variabel	Jumlah Uji	Jumlah Signifikan	Persentase Signifikan
Suhu	10	10	100 %
Getaran	10	10	100 %
RPM	10	9	90 %

Uji Z Score, IQR dan Arima model ditunjukkan pada Gambar 10. Data uji ini menunjukkan Z-Score dengan nilai di luar $\pm 3\sigma$ dianggap anomali, IQR data di luar $[Q1-1.5 \times IQR, Q3+1.5 \times IQR]$ adalah anomali, dan ARIMA Residual yaitu residu peramalan yang besar (mis. $> 2.5 \times \sigma$ residu) menandakan perilaku tak terduga.

Jika hasil dari beberapa metode konsisten (misal titik sama terdeteksi anomali oleh Z-Score & ARIMA), berarti keanehan tersebut sangat kuat.



Gambar 10. Uji Z Score, IQR dan Arima model

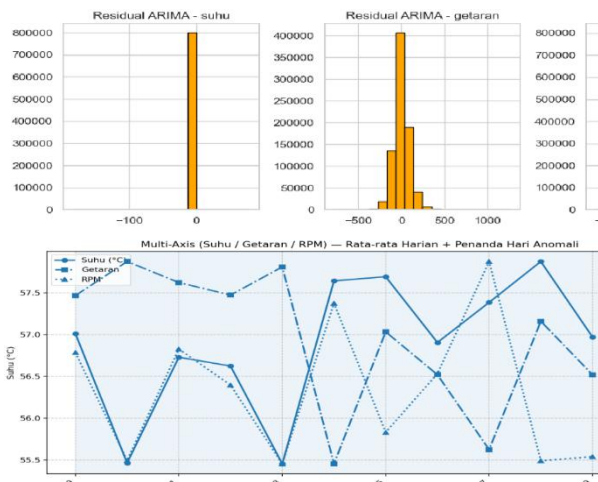
Dari Gambar 10 terlihat bahwa hasil interpretasi menunjukkan Z-Score ($\pm 3\sigma$), hanya mendeteksi sekitar 0,18 % data sebagai anomali, artinya mayoritas pengukuran berada dalam rentang normal distribusi Gaussian (-3σ s.d. $+3\sigma$), disimpulkan bahwa data IoT relatif stabil, hanya sebagian kecil pengukuran ekstrem (*outlier* tajam).

IQR (*Interquartile Range*) mendeteksi $\pm 16,8$ % titik data sebagai anomali. Ini berarti variasi antar kuartil cukup lebar bisa karena data tidak berdistribusi normal atau banyak fluktuasi alami pada sensor, sehingga metode IQR lebih sensitif; kemungkinan besar menandai *fluktuasi normal* sebagai *outlier*. Cocok untuk mendeteksi anomali pada data yang tidak simetris.

Sementara ARIMA Residual, sekitar 1 % data terdeteksi anomali dari pola waktu prediktif. ARIMA melihat perubahan perilaku berdasarkan pola historis, sehingga ada periode-periode tertentu di mana suhu/getaran/RPM melenceng signifikan dari tren harian. Hal ini menunjukkan gangguan sensor, transisi operasional mesin sebagai potensi awal kerusakan. Analisis perbandingan IQR menghasilkan jumlah anomali paling banyak dengan metode paling sensitif (potensi false positive tinggi). Z-Score dan ARIMA menghasilkan jumlah anomali kecil dimana lebih konservatif dan stabil. Kombinasi hasil menunjukkan titik yang terdeteksi oleh semua metode kemungkinan besar *anomali sejati*. Titik yang hanya ditandai IQR adalah kemungkinan *fluktuasi wajar* atau *noise*.

Berdasarkan hasil tiga metode statistik, data IoT suhu, getaran, dan RPM pada rentang 9–19 September 2025 menunjukkan bahwa kondisi sistem relatif stabil dan normal (Z-Score & ARIMA rendah). Terdapat beberapa variasi alami atau fluktuasi besar (IQR

tinggi). Periode dengan residu ARIMA besar patut diperiksa lebih lanjut karena menunjukkan potensi anomali temporal (perubahan perilaku mesin).



Gambar 11. Arima model

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) yang dikembangkan mampu melakukan deteksi dini terhadap kondisi abnormal pada agitator mixer secara real-time melalui analisis parameter getaran, suhu, dan kecepatan putaran (RPM). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini memiliki tingkat akurasi tinggi dengan nilai MAPE sebesar 0,518% dan koefisien korelasi 0,9997, yang menandakan kesesuaian sangat baik antara data sensor dan kondisi aktual mesin. Penerapan algoritma *Isolation Forest* berhasil mengidentifikasi anomali operasi seperti ketidakseimbangan, keausan bantalan, dan *overheating*, sedangkan model ANFIS efektif dalam memprediksi waktu optimal untuk pelaksanaan pemeliharaan. Analisis korelasi antar variabel menunjukkan bahwa suhu, getaran, dan RPM bekerja secara independen, menandakan stabilitas sistem selama operasi. Secara keseluruhan, implementasi sistem ini terbukti mampu meningkatkan efisiensi operasional, memperpanjang umur peralatan, menekan biaya perawatan, dan mencegah *downtime*, sekaligus mendukung transformasi digital dalam manajemen pemeliharaan di instalasi pengolahan air. Sistem ini masih memiliki potensi pengembangan yang luas, seperti integrasi dengan *platform cloud computing* untuk pemrosesan data berskala

besar serta penerapan *edge AI* agar analisis anomali dan prediksi pemeliharaan dapat dilakukan langsung di perangkat lokal secara lebih cepat, efisien, dan andal dalam lingkungan operasional *water treatment*.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi yang telah memberikan dukungan pendanaan terhadap penelitian ini. Penelitian ini dilaksanakan dengan dukungan dana hibah penelitian berdasarkan Kontrak Nomor: 004/LL7/DT.05.00/PL-BATCH II/2025 dan Nomor DIPA 139.04.1.693320/2025 (Revisi ke-6, tanggal 14 Juli 2025).

Daftar Pustaka

- [1] Akpor, O. & Muchie, M., 2011. *Challenges in meeting the mdgs: The nigerian drinking water supply and distribution sector*.
- [2] Kumar A, R., M Metwally, A. S., Ashraf, G. A., & Thamineni, B. L., 2023. *Smart iot-based water treatment with a supervisory control and data acquisition (scada) system process*. *Water reuse*, Vol. 13, No. 3, pp. 411-431.
- [3] Hallaji, S. M., Fang, Y., & Winfrey, B. K., 2021. *A digital twin framework for enhancing predictive maintenance of pumps in wastewater treatment plants*. in *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Vol. 38: IAARC Publications.
- [4] Rakholia, R., Suárez-Cetrulo, A. L., Singh, M., & Carbajo, R. S., 2025. *Integrating ai and iot for predictive maintenance in industry 4.0 manufacturing environments: A practical approach*. *Information*, Vol. 16, No. 9, p. 737.
- [5] Bhaskar, A., 2023. *Industrial iot condition monitoring using wireless iot sensor*. in *2023 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Communication (AISC)*: IEEE.
- [6] Kannammal, A., Guhanesvar, M., & Venketesz, R., 2023. *Predictive maintenance for remote field iot devices—a deep learning and cloud-based approach*, in *Mobile computing and sustainable informatics: Proceedings of icmcsi 2023*: Springer, 2023, pp. 567-585.
- [7] Bani, N. A. et al., 2022. *Development of predictive maintenance system for*

- haemodialysis reverse osmosis water purification system.* in 2022 4th International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA): IEEE.
- [8] de Moura Pereira, D. A. et al., 2025. Predictive maintenance and smart sensors aiming sustainability: A perspective from a bibliometric analysis. *Procedia Computer Science*, Vol. 252, pp. 81-89.
- [9] Aung, K. T., 2025. *Nurse empowerment through dynamic xmoocs using a 4d development model approach*, in Technological approaches to medical and pharmaceutical education: IGI Global Scientific Publishing, 2025, pp. 185-222.
- [10] Sihombing, B., 2024. *Model pengembangan 4d (define, design, develop, dan disseminate) dalam pembelajaran pendidikan islam.* *Journal of Islamic Education El Madani*, Vol. 4, No. 1, pp. 11-19.
- [11] Hamasha, M., Albedoor, Q., Hamasha, S. d., Ali, H., Qamar, A., & Barraah, F., 2025. *A comprehensive framework for iot-driven predictive maintenance: Leveraging ai and edge computing for enhanced equipment reliability.* *Journal of Applied Engineering Science*, Vol. 23, No. 3, pp. 471-486.
- [12] Asar, S., Jalalpour, S., Ayoubi, F., Rahmani, M., & Rezaeian, M., 2016. *Prisma; preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses.* *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 68-80.
- [13] Dada, M. A., Majemite, M. T., Obaigbena, A., Daraojimba, O. H., Oliha, J. S., & Nwokediegwu, Z. Q. S., 2024. *Review of smart water management: Iot and ai in water and wastewater treatment.* *World Journal of Advanced Research and Reviews*, Vol. 21, No. 1, pp. 1373-1382.
- [14] Miralam, M. S., 2025. *Towards developing an ai random forest model approach adopted for sustainable food supply chain under big data.* *Journal of Applied Data Sciences*, Vol. 6, No. 2, pp. 1252-1263.
- [15] Frayudha, A. D., 2024. *Road flood warning detection using wireless sensors and fuzzy logic to support gresik smart city.* *MATICS: Jurnal Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi (Journal of Computer Science and Information Technology)*, Vol. 16, No. 2, pp. 108-121.
- [16] Turk, N., 2021. *Metodologija priprave sistematičnih preglednih člankov.* *Slovenian Medical Journal*, Vol. 90, No. 7-8, pp. 432-442.
- [17] Sari, A. F., Panjaitan, S. D., & Sanjaya, B. W., 2024. *Optimasi pemantauan kualitas air baku dengan metode arima dan teknologi iot pada bak sedimentasi ipa iii.* *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, Vol. 12, No. 3, pp. 720-729.
- [18] Chola, A., Rastogi, R., Kaur, P., Chaudhary, A., & Biswas, D., 2024. *Predictive analytics beyond the hype: A comprehensive comparison of LSTM, XGBoost and LighTGBM with emphasis on RMSE and CPU utilization.* in 2024 Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T): IEEE.
- [19] Atavullayeva, M., 2024. *Environmental pollution monitoring: Essential strategies for mitigating ecological degradation.* in *E3S Web of Conferences*, Vol. 587: EDP Sciences.