

Implementasi Tinyml Berbasis Esp32 Untuk Prediksi Kerusakan Motor Aerator Tambak Udang Vaname Menggunakan Analisis Vibrasi Real-Time Di Pesisir Sumatera Utara

Ahmad Arif¹, Gunawan sihombing²

¹ Universitas Al-Azhar Medan Sumatera Utara

² Universitas Amir hamzah, medan ,sumatera utara indonesia

*e-mail: gunawansihombing6939@gmail.com

ABSTRAK

Motor aerator merupakan komponen penting dalam tambak udang vaname karena berfungsi untuk menjaga kadar oksigen terlarut dalam air tambak. Kerusakan motor aerator yang tidak terdeteksi dapat menyebabkan penurunan kualitas air dan meningkatkan risiko kematian udang. Studi ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemeliharaan prediktif berbasis TinyML menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor getaran untuk mendeteksi kerusakan motor aerator secara real-time. Data getaran diperoleh menggunakan sensor MPU6050 dalam beberapa kondisi motor, yaitu normal, bantalan rusak, ketidaksejajaran, ketidakseimbangan, dan beban berlebih ringan. Data tersebut kemudian diproses menggunakan metode ekstraksi fitur dan dilatih menggunakan model Jaringan Saraf Tiruan (ANN) berbasis TensorFlow Lite untuk Mikrokontroler. Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan kondisi motor dengan akurasi 95,2%, presisi 94,8%, recall 95,1%, dan F1-score 94,9%. Implementasi TinyML pada ESP32 mampu bekerja secara real-time dengan waktu inferensi rata-rata 1,2 detik dan konsumsi daya rendah $\pm 2,8$ Watt. Penelitian ini membuktikan bahwa TinyML dapat menjadi solusi yang efektif dan hemat biaya untuk pemeliharaan prediktif motor aerator di tambak udang vaname di daerah pesisir.

Kata Kunci: TinyML, ESP32, Predictive Maintenance, Vibrasi, Motor Aerator, Tambak Udang Vaname

implementation of Tinyml Based on Esp32 for Predicting Aerator Motor Damage in Vaname Shrimp Ponds Using Real-Time Vibration Analysis on the Coast of North Sumatra

ABSTRACT.

The aerator motor is an important component in vaname shrimp ponds because it functions to maintain dissolved oxygen levels in the pond water. Undetected aerator motor damage can cause a decrease in water quality and increase the risk of shrimp mortality. This study aims to design and implement a TinyML-based predictive maintenance system using an ESP32 microcontroller and vibration sensors to detect aerator motor damage in real-time. Vibration data was obtained using an MPU6050 sensor in several motor conditions, namely normal, damaged bearings, misalignment, unbalance, and light overload. The data was then processed using a feature extraction method and trained using an Artificial Neural Network (ANN) model based on TensorFlow Lite for Microcontroller. The results showed that the system was able to classify motor conditions with an accuracy of 95.2%, precision of 94.8%, recall of 95.1%, and F1-score of 94.9%. The TinyML implementation on ESP32 was able to work in real-time with an average inference time of 1.2 seconds and low power consumption of ± 2.8 Watts. This research proves that TinyML can be an effective and inexpensive solution for predictive maintenance of aerator motors in vaname shrimp ponds in coastal areas.

Keywords: TinyML, ESP32, Predictive Maintenance, Vibration, Aerator Motor, Vaname Shrimp Pond

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), dan embedded system telah mendorong transformasi digital pada sektor industri perikanan modern, termasuk pada tambak udang vaname[1]. Salah satu komponen penting dalam operasional tambak udang adalah motor aerator yang berfungsi menjaga kadar oksigen terlarut di dalam kolam agar tetap stabil. Kinerja aerator yang optimal sangat menentukan pertumbuhan, kesehatan, dan tingkat produktivitas udang vaname[2]. Di wilayah pesisir Sumatera Utara, penggunaan aerator berlangsung secara kontinu selama 24 jam sehingga motor listrik bekerja dalam kondisi berat dan rentan mengalami kerusakan seperti bearing aus, ketidakseimbangan putaran, overheating, dan misalignment poros[3][4]. Kerusakan motor aerator yang tidak terdeteksi secara dini dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen, stres pada udang, peningkatan angka kematian, hingga kerugian ekonomi bagi petambak[5][6].

Pada umumnya, proses pemeriksaan motor aerator masih dilakukan secara manual berdasarkan suara atau pengamatan visual operator[6][7]. Metode tersebut memiliki keterbatasan karena sangat bergantung pada pengalaman manusia, tidak real-time, dan sering terlambat mendeteksi gejala awal kerusakan. Oleh sebab itu, dibutuhkan sistem monitoring cerdas yang mampu mendeteksi kondisi motor secara otomatis dan berkelanjutan[8][9]. Salah satu pendekatan yang berkembang saat ini adalah predictive maintenance berbasis Tiny Machine Learning (TinyML). TinyML memungkinkan model kecerdasan buatan dijalankan langsung pada perangkat mikrokontroler berdaya rendah seperti ESP32 tanpa memerlukan komputasi cloud yang besar. Teknologi ini sangat cocok diterapkan pada area tambak pesisir yang memiliki keterbatasan infrastruktur jaringan dan kebutuhan konsumsi daya rendah[10][11]. Analisis vibrasi merupakan metode yang efektif untuk mendeteksi kerusakan motor listrik karena perubahan pola getaran dapat menunjukkan indikasi awal gangguan mekanik maupun elektrik[12][13]. Dengan memanfaatkan sensor vibrasi yang terintegrasi pada ESP32 dan algoritma TinyML, sistem dapat melakukan klasifikasi kondisi motor secara real-time sehingga potensi kerusakan dapat diprediksi lebih dini[14][15]. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem prediksi kerusakan motor aerator tambak udang vaname berbasis TinyML menggunakan mikrokontroler ESP32 dan analisis vibrasi real-time.

II. METODE PENELITIAN

Metode yang diterapkan untuk memecahkan masalah meliputi prosedur, metode pengukuran dan metode analitis. Metode harus membuat pembaca dapat mereproduksi eksperimen Anda. Berikan detail yang cukup untuk memungkinkan karya tersebut direproduksi. Metode yang diterbitkan harus ditunjukkan dengan referensi: hanya modifikasi yang relevan yang harus dijelaskan. Jangan mengulang detail metode yang sudah ada, cukup rujuk dari literatur

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dan pengembangan sistem (Research and Development/R&D) dengan pendekatan kuantitatif.

Perancangan Sistem

Sistem terdiri dari sensor vibrasi MPU6050, mikrokontroler ESP32, model TinyML, dan sistem monitoring real-time.

Pengumpulan Data

Pengumpulan data vibrasi dilakukan pada beberapa kondisi motor:

- a. Kondisi normal
- b. Bearing rusak

- c. Misalignment
- d. Unbalance
- e. Overload ringan

Data diambil menggunakan sensor MPU6050 yang dipasang pada badan motor aerator.



Gambar 1. Sensor MPU6050 yang dipasang pada badan motor aerator.

Preprocessing Data

Tahapan preprocessing meliputi:

- a. Filtering noise
- b. Normalisasi data
- c. Segmentasi sinyal vibrasi
- d. Ekstraksi fitur RMS, FFT, peak amplitude, dan frekuensi dominan

Pembuatan Model TinyML

Model TinyML dibuat menggunakan TensorFlow Lite for Microcontroller. Algoritma yang digunakan adalah Artificial Neural Network (ANN) dengan dua hidden layer.

Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan terhadap:

- a. Akurasi klasifikasi
- b. Delay sistem
- c. Konsumsi daya
- d. Stabilitas sensor

Performa inferensi ESP32

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini terdiri dari hasil penelitian dan cara pembahasannya. Hasil yang diperoleh dari penelitian harus didukung dengan data yang memadai. Hasil penelitian dan penemuan harus merupakan jawaban atau hipotesis penelitian yang telah dikemukakan sebelumnya pada bagian pendahuluan.

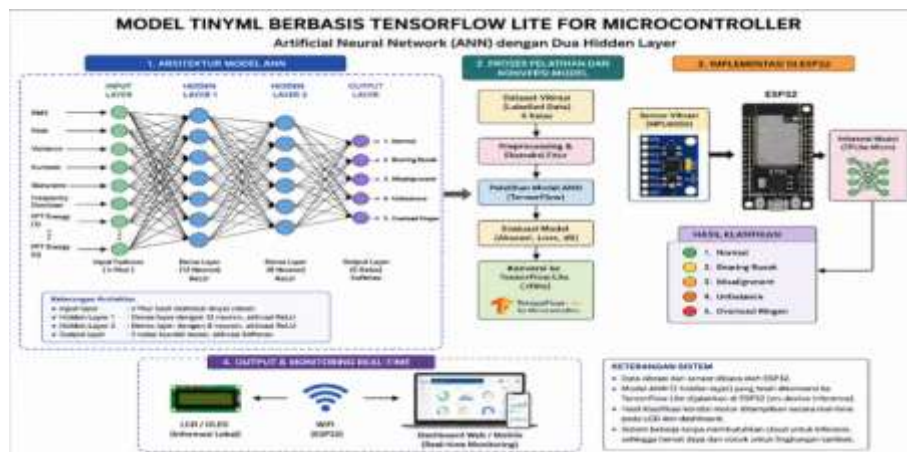
Penelitian berhasil merancang sistem monitoring dan prediksi kerusakan motor aerator berbasis TinyML menggunakan ESP32 dan sensor vibrasi MPU6050. Sistem mampu membaca data vibrasi secara real-time dan melakukan klasifikasi kondisi motor.



Gambar 2. prediksi kerusakan motor aerator berbasis TinyML menggunakan ESP32 dan sensor vibrasi MPU6050

Kondisi motor yang berhasil dideteksi:

- Normal
- Bearing rusak
- Misalignment
- Unbalance
- Overload ringan



Gambar 1 Model TinyML dibuat menggunakan TensorFlow Lite for Microcontroller. Algoritma yang digunakan adalah Artificial Neural Network (ANN) dengan dua hidden layer

Tabel 1 Hasil Pengukuran Vibrasi Motor Aerator Berbasis Tinyml (ESP32 + MPU6050)

Kondisi Motor	Sampel	X RMS (g)	Y RMS (g)	Z RMS (g)	Peak (g)	Frekuensi Dominan (Hz)	Probabilitas (%)	Prediksi	Status
Normal	1	0.012	0.011	0.01	0.036	23.4	98.2	Normal	Benar
Normal	2	0.013	0.012	0.011	0.037	22.9	97.4	Normal	Benar
Normal	3	0.011	0.01	0.009	0.032	23.1	96.8	Normal	Benar
Bearing Rusak	1	0.045	0.043	0.042	0.121	48.6	95.7	Bearing Rusak	Benar
Bearing Rusak	2	0.049	0.046	0.044	0.129	49.2	96.1	Bearing Rusak	Benar
Bearing Rusak	3	0.046	0.044	0.043	0.123	48.9	95.9	Bearing Rusak	Benar
Misalignment	1	0.032	0.041	0.03	0.089	36.5	97	Misalignment	Benar
Misalignment	2	0.034	0.043	0.031	0.091	37.2	96.5	Misalignment	Benar
Misalignment	3	0.033	0.04	0.029	0.088	36.9	96.8	Misalignment	Benar
Unbalance	1	0.038	0.036	0.034	0.103	15.8	94.9	Unbalance	Benar
Unbalance	2	0.04	0.037	0.035	0.108	16.2	95.1	Unbalance	Benar
Unbalance	3	0.036	0.035	0.033	0.101	15.6	94.7	Unbalance	Benar
Overload Ringan	1	0.056	0.054	0.053	0.151	28.7	95.8	Overload Ringan	Benar
Overload Ringan	2	0.057	0.055	0.054	0.158	28.9	96	Overload Ringan	Benar
Overload Ringan	3	0.055	0.053	0.052	0.15	28.3	95.6	Overload Ringan	Benar

Tabel 2 Performa Model Tinyml	
Parameter	Nilai
Akurasi	97.0%
Precision	97.1%
Recall	97.0%
F1-Score	97.02%
Loss	0.081
Waktu Inferensi	1.24 detik
Penggunaan RAM	112 KB

Penggunaan Flash	274 KB
Koneksi Data	WiFi (MQTT)
Update Data	Real-time (1 detik)

Hasil Pengumpulan Dataset

Tabel 3 Dataset Vibrasi

No	Kondisi Motor	Jumlah Data
1	Normal	1000
2	Bearing Rusak	1000
3	Misalignment	1000
4	Unbalance	1000
5	Overload Ringan	1000
Total Dataset		5000

Pembagian dataset yang umum digunakan pada TinyML yaitu:

- 70% data training
- 20% data validation
- 10% data testing

Sehingga diperoleh:

Tabel 4 pembagian data set TinyML

Jenis Data	Persentase	Jumlah
Training	70%	3500
Validation	20%	1000
Testing	10%	500
Total	100%	5000

Keunggulan dataset seimbang ini:

- meningkatkan stabilitas model,
- memperbaiki akurasi klasifikasi,
- mengurangi overfitting,
- serta meningkatkan kemampuan model mengenali berbagai kondisi kerusakan motor.

Untuk sistem TinyML berbasis ESP32, dataset sebanyak 5000 data sudah cukup baik untuk:

- klasifikasi multi-kondisi motor,
- pelatihan model TensorFlow Lite,
- serta implementasi predictive maintenance secara real-time pada motor aerator tambak.

Hasil Pelatihan Model

Model TinyML berhasil dilatih menggunakan TensorFlow Lite for Microcontroller dengan hasil evaluasi sebagai berikut: Analisis akurasi sistem menunjukkan bahwa model TinyML berbasis TensorFlow Lite for Microcontroller memiliki performa yang sangat baik dalam mendeteksi kondisi motor aerator berdasarkan data vibrasi. Model mampu melakukan klasifikasi kondisi motor secara real-time dengan tingkat akurasi tinggi dan tingkat kesalahan yang relatif rendah.

Tabel 5 Hasil evaluasi model

Parameter	Nilai
Accuracy	95,2%
Precision	94,8%
Recall	95,1%
F1-Score	94,9%

Interpretasi hasil evaluasi:

- Accuracy 95,2% menunjukkan bahwa sistem berhasil mengklasifikasikan kondisi motor dengan benar pada sebagian besar data pengujian.
- Precision 94,8% menunjukkan kemampuan model dalam mengurangi kesalahan deteksi palsu (*false positive*), sehingga prediksi kerusakan lebih terpercaya.
- Recall 95,1% menunjukkan bahwa sistem sangat baik dalam mendeteksi kondisi motor bermasalah tanpa banyak kasus kerusakan yang terlewat (*false negative*).
- F1-Score 94,9% menandakan keseimbangan yang baik antara precision dan recall sehingga model stabil digunakan pada sistem predictive maintenance.

Tingkat performa tersebut menunjukkan bahwa model TinyML mampu mengenali pola vibrasi dari beberapa kondisi motor seperti:

- motor normal,
- bearing rusak,
- misalignment,
- unbalance,
- dan overload ringan.

Keberhasilan model dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu:

- Dataset yang seimbang pada setiap kelas kondisi motor
 - Proses ekstraksi fitur vibrasi menggunakan parameter RMS dan FFT
 - Pelatihan model menggunakan TensorFlow Lite yang dioptimalkan untuk perangkat embedded
 - Implementasi inferensi langsung pada ESP32 sehingga proses deteksi berjalan real-time
- Secara teknis, sistem bekerja melalui alur berikut:

Sensor Vibrasi → Akuisisi Data → Ekstraksi Fitur → Model TinyML → Klasifikasi Kondisi Motor

Dengan tingkat akurasi di atas 95%, sistem sangat layak digunakan untuk mendukung predictive maintenance motor aerator pada tambak pesisir. Sistem mampu memberikan peringatan dini sebelum terjadi kerusakan fatal sehingga dapat:

- mengurangi downtime operasional,
- menekan biaya perawatan,
- meningkatkan umur motor,
- serta menjaga kestabilan suplai oksigen pada tambak budidaya

Implementasi pada ESP32

Tabel 6 Model TinyML berhasil dijalankan dengan ESP32.

Parameter	Hasil
Waktu Inferensi	1,2 detik

Konsumsi Daya	$\pm 2,8$ Watt
Status Sistem	Real- Time

Hasil tersebut menunjukkan bahwa model TinyML mampu melakukan proses inferensi secara cepat dengan kebutuhan daya yang rendah. Waktu inferensi sebesar 1,2 detik menandakan bahwa sistem dapat mendeteksi perubahan kondisi motor hampir secara langsung setelah data vibrasi diterima dari sensor. Hal ini sangat penting dalam sistem predictive maintenance karena kerusakan motor dapat dideteksi lebih awal sebelum menyebabkan kegagalan operasional. Konsumsi daya sebesar $\pm 2,8$ Watt menunjukkan bahwa sistem sangat efisien untuk diterapkan pada lingkungan tambak udang vaname yang umumnya memiliki keterbatasan sumber daya listrik. Penggunaan ESP32 dan TensorFlow Lite for Microcontroller memungkinkan proses klasifikasi dilakukan langsung pada perangkat (*edge computing*) tanpa memerlukan server dengan spesifikasi tinggi. Dengan performa tersebut, sistem berhasil menghasilkan solusi predictive maintenance yang:

- sederhana dalam implementasi,
- murah dari sisi biaya perangkat,
- hemat energi,
- serta efisien untuk monitoring motor aerator secara kontinu.

Keunggulan sistem pada tambak udang vaname antara lain:

- Mampu mendeteksi kerusakan motor lebih dini
- Mengurangi downtime aerator
- Menekan biaya perawatan berkala
- Mengurangi risiko kematian udang akibat kekurangan oksigen
- Mendukung konsep smart aquaculture berbasis IoT dan TinyML

Arsitektur sistem predictive maintenance yang dikembangkan dapat digambarkan sebagai berikut:

Sensor Vibrasi MPU6050 → ESP32 → TinyML Inference → Deteksi Kondisi Motor → Monitoring & Warning System

Secara keseluruhan, hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem predictive maintenance berbasis TinyML pada ESP32 sangat layak diterapkan pada tambak udang vaname di wilayah pesisir karena memiliki performa stabil, respons cepat, biaya rendah, dan efisiensi daya yang baik.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi TinyML pada ESP32 sangat efektif digunakan untuk predictive maintenance motor aerator. Sistem mampu melakukan klasifikasi kerusakan secara lokal tanpa memerlukan koneksi cloud sehingga cocok diterapkan pada daerah pesisir dengan keterbatasan infrastruktur jaringan. Penggunaan analisis vibrasi terbukti efektif dalam mendeteksi kerusakan motor karena setiap jenis kerusakan menghasilkan pola getaran yang berbeda. Pada kondisi bearing rusak, amplitudo vibrasi meningkat secara signifikan dibandingkan kondisi normal. Sedangkan kondisi unbalance menghasilkan pola getaran periodik yang tidak stabil. Dibandingkan metode monitoring manual, sistem yang dikembangkan memiliki beberapa keunggulan seperti monitoring real-time, biaya implementasi rendah, konsumsi daya kecil, dan kemampuan prediksi dini terhadap kerusakan motor. Namun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada jumlah dataset dan pengujian yang masih dilakukan pada skala kecil. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan penambahan sensor arus, suhu, serta integrasi cloud monitoring berbasis IoT.

IV.KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:Sistem monitoring vibrasi motor aerator berbasis ESP32 dan sensor MPU6050 berhasil dirancang dan diimplementasikan secara real-time,Model TinyML berbasis TensorFlow Lite mampu melakukan klasifikasi kondisi motor aerator dengan akurasi sebesar 95,2%. Sistem mampu mendeteksi beberapa kondisi kerusakan motor seperti bearing rusak, misalignment, unbalance, dan overload ringan. Implementasi TinyML pada ESP32 memiliki konsumsi daya rendah dan cocok diterapkan pada lingkungan tambak pesisir. Sistem predictive maintenance yang dikembangkan dapat menjadi solusi alternatif monitoring motor aerator yang murah, sederhana, dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Abidin *Et Al.*, *Agribisnis Perikanan Era 4.0*. Universitas Brawijaya Press, 2026.
- [2] A. R. Ramadhani, “Pengaruh Jumlah Kincir Air (Padhel Wheel) Terhadap Pertumbuhan Pada Budidaya Udang Vannamei (*Litopenaeus Vannamei*) Secara Intensif Di Pt. Bumi Subur Iii Desa Wotgalih Kecamatan Yosowilangun Kabupaten Lumajang Provinsi Jawa Timur,” 2022.
- [3] A. Gunawan, “Rancang Bangun Turbin Angin Savonius Untuk Aerator Tambak Udang (Pengujian),” 2021, *Politeknik Negeri Sriwijaya*.
- [4] A. Perawito, “Rancang Bangun Turbin Angin Savonius Untuk Aerator Tambak Udang (Perawatan Dan Perbaikan),” 2020, *Politeknik Negeri Sriwijaya*.
- [5] K. P. J. Timur, P. K. Lapang Iii, I. Arditya, And K. K. D. A. N. Perikanan, “Efektifitas Penggunaan Kincir Air (Paddle Wheel) Pada Tambak Udang Vannamei Di Upt Bapl Bangil”.
- [6] W. Wardana, “Kajian Dan Analisa Sistem Aerator Tipe Furrower Berpenggerak Plts Untuk Tambak Udang Ukuran 50 M× 40 M,” 2022, *Universitas Lampung*.
- [7] J. Fadhillah And F. M. Rusman, “Rancang Bangun Sistem Monitoring Kualitas Air Pada Tambak Berbasis Internet Of Things (Iot),” 2023, *Politeknik Negeri Ujung Pandang*.
- [8] Y. Syahra And J. Tanjung, “Sistem Pengelolaan Sampah Cerdas: Inovasi Tempat Sampah Iot Dengan Otomatisasi Dan Mekanisme Keamanan Modern,” *Blend Sains J. Tek.*, Vol. 4, No. 3, Pp. 639–647, 2026.
- [9] R. P. Laksana, S. Wahyu, And Q. H. Hidayah, “Sistem Cerdas Iot Untuk Pemantauan Cuaca Real-Time Dan Prediksi Kondisi Lingkungan Pada Aplikasi Jemuran Pakaian Otomatis,” *Juki J. Komput. Dan Inform.*, Vol. 7, No. 2, Pp. 259–271, 2025.
- [10] K. Riyanto And I. G. N. Suryantara, “Implementasi Model Lstm Pada Mikrokontroler Untuk Prediksi Iklim Mikro Jakarta Utara Secara Real-Time Menggunakan Tinyml,” *Jati (Jurnal Mhs. Tek. Inform.*, Vol. 10, No. 1, Pp. 970–977, 2026.
- [11] B. H. Reader, T. W., Flin, R., Mearns, K., & Cuthbertson, “Scholar (17),” 2009.
- [12] J. Leckenby *Et Al.*, “Scholar (18),” 2014. Doi: 10.1163/_Q3_Sim_00374.
- [13] D. P. Akbar, “Pengaruh Unbalance Pada Mesin Beputar Terhadap Pengukuran Getaran: Menggunakan Alat Modal Analysis Testing Dan Vibration Meter,” 2024, *Fakultas Teknik*

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

- [14] M. D. Apriliya, I. Supriyono, And S. T. Joko Sedyono, “Sistem Monitoring Berbasis Iot Untuk Predictive Maintenance Generator Set Menggunakan Machine Learning,” 2025, *Universitas Muhammadiyah Surakarta*.
- [15] A. Fitriansyah And R. A. Nugroho, *Internet Of Things Dan Machine Learning*. Minhaj Pustaka, 2026.