

Railway Prototype Model For Converting Vibrations Into Micro-Energy Through Piezoelectric Sensors

[Model Prototipe Rel Kereta Api Untuk Konversi Getaran Menjadi Energi Mikro Melalui Sensor Piezoelektrik]

Aly Syabab Kholid Syah¹⁾, Syamsudduha Syahririni^{*2)}, Akhmad Ahfas^{*3)}, Shazana Dhiya Ayuni^{*4)}

¹⁾ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

^{*}Email Penulis Korespondensi: syahririni@umsida.ac.id

Abstract. Train operations consistently produce continuous mechanical vibrations on the rails which have the potential to be harvested (energy harvesting) into micro electricity, especially to support energy needs in remote crossing areas (off-grid). This research aims to design and test a prototype energy harvester based on a piezoelectric sensor integrated with an Internet of Things (IoT) based wireless monitoring system. The approach used is an experimental method based on system design (engineering design methodology), which includes hardware design, software integration, and direct tool performance testing. This system uses four 55 mm diameter piezoelectric sensors configured in series to capture mechanical vibrations. The AC electrical signal from the sensor is rectified and increased in voltage using a boost converter based on the NE5532 IC before being stored in a capacitor to supply the ESP32 microcontroller. Performance evaluation was carried out through a simulated load test of 100 grams and continuous observation for 14 days with a total of 120 trials. The research results show that the system is able to regulate voltage from vibrations up to 3.2 V–3.25 V with a capacitor charging delay of around 8.5 to 12 seconds to reach the operational threshold of the ESP32 (3.3 V). IoT integration using the Telegram Bot API recorded a data transmission success rate of 90.6% with a stable transmission latency in the range of 8.0 to 8.5 seconds. The notification sent presents the train status, voltage value and timestamp synchronized with West Indonesian Time (WIB). This prototype proves its reliability as a self-powered and responsive railway infrastructure monitoring solution for remote areas.

Keywords - ESP32, IC NE5532, IoT, Energy Harvesting, Piezoelectric, Railway, Telegram Bot.

Abstrak. Operasional kereta api secara konsisten menghasilkan getaran mekanis kontinu pada rel yang berpotensi dipanen (energy harvesting) menjadi listrik mikro, terutama untuk mendukung kebutuhan energi di wilayah perlintasan terpencil (off-grid). Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji prototipe pemanen energi berbasis sensor piezoelektrik terintegrasi dengan sistem pemantauan nirkabel berbasis Internet of Things (IoT). Pendekatan yang digunakan adalah metode eksperimental berbasis perancangan sistem (engineering design methodology), yang mencakup perancangan perangkat keras, integrasi perangkat lunak, serta pengujian kinerja alat secara langsung. Sistem ini menggunakan empat buah sensor piezoelektrik berdiameter 55 mm yang dikonfigurasi secara seri untuk menangkap getaran mekanis. Sinyal listrik AC dari sensor disearahkan dan ditingkatkan tegangannya menggunakan boost converter berbasis IC NE5532 sebelum disimpan ke dalam kapasitor untuk menyuplai mikrokontroler ESP32. Evaluasi kinerja dilakukan melalui pengujian beban simulasi 100 gram dan pengamatan berkelanjutan selama 14 hari dengan total 120 kali percobaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu meregulasi tegangan dari getaran hingga mencapai 3,2 V–3,25 V dengan waktu pengisian daya (charging delay) kapasitor sekitar 8,5 hingga 12 detik untuk mencapai ambang batas operasional ESP32 (3,3 V). Integrasi IoT menggunakan Telegram Bot API mencatatkan tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 90,6% dengan latensi transmisi yang stabil di kisaran 8,0 hingga 8,5 detik. Notifikasi yang dikirimkan menyajikan status kereta, nilai tegangan, dan timestamp tersinkronisasi Waktu Indonesia Barat (WIB). Prototipe ini membuktikan keandalannya sebagai solusi pemantauan infrastruktur perkeretaapian yang mandiri energi (self-powered) dan responsif untuk wilayah terpencil.

Kata Kunci - ESP32, IC NE5532, IoT, Pemanen Energi, Piezoelektrik, Rel Kereta Api, Telegram Bo

I. PENDAHULUAN

Kereta api menjadi salah satu sarana atau bentuk transportasi massal strategis yang memiliki peran penting atau vital dalam mendukung mobilitas logistik dan pertumbuhan ekonomi nasional. Di balik efisiensi dan keunggulannya, operasional kereta api secara konsisten menghasilkan getaran mekanis kontinu berfrekuensi tinggi pada struktur rel dan bantalan sekitarnya [1]. Selama ini, fenomena getaran tersebut hanya dianggap sebagai limbah energi kinetik yang terbuang, atau bahkan menjadi faktor pemicu kelelahan material (*fatigue*) yang dapat merusak infrastruktur rel dalam jangka panjang. Padahal, jika ditinjau dari perspektif konversi energi terbarukan, akumulasi getaran mekanis yang konstan ini menyimpan potensi besar untuk dipanen (*energy harvesting*) dan dialihkan menjadi sumber listrik mandiri yang sangat bermanfaat.

Di era modern saat ini, konversi getaran menjadi listrik dapat diwujudkan secara efektif melalui pemanfaatan teknologi piezoelektrik. Material piezoelektrik, seperti *Lead Zirconate Titanate* (PZT), memiliki karakteristik mekano-elektrik yang mampu mengubah tekanan, ketukan, atau regangan dinamis dari beban kereta menjadi induksi muatan listrik secara langsung tanpa memerlukan sumber daya eksternal. Karakteristik pembangkitan energi dari konversi mekanik ini sejalan dengan prinsip hukum konversi energi nasional. Di sisi lain, optimasi susunan sirkuit piezoelektrik terbukti mampu mengubah getaran impulsif kendaraan menjadi suplai listrik mikro hijau yang andal [2]. Meskipun densitas daya yang dihasilkan berada pada skala mikro, kuantitas energi tersebut sudah sangat memadai untuk menyuplai sistem elektronik berdaya rendah (*micro-energy systems*), seperti sistem pencahayaan LED darurat, pengisian baterai skala kecil, hingga perangkat nirkabel IoT (*Internet of Things*) untuk monitoring kesehatan struktural rel [3].

Sistem pemanen energi ini bersifat pasif, mandiri (*self-powered*), dan memiliki ketahanan tinggi dengan minim perawatan, menjadikannya solusi ideal untuk diimplementasikan pada wilayah rel terpencil yang belum terjangkau oleh jaringan listrik konvensional. Kondisi geografis Indonesia yang luas menyebabkan jalur perlintasan rel kereta api seringkali harus membelah kawasan hutan, perbukitan, hingga daerah pelosok yang minim akses atau bahkan belum teraliri jaringan listrik grid nasional. Di titik-titik pelosok tersebut, ketiadaan sumber daya listrik konvensional menjadi hambatan utama dalam menyediakan sistem pengamanan dini, pencahayaan stasiun kecil, maupun sensor pemantau kondisi rel. Penelitian serupa mengenai pemanfaatan energi getaran mekanik dari infrastruktur publik seperti tangga ataupun lantai padat lalu lintas membuktikan efektivitas pemanenan energi ini [4]. Lebih jauh lagi, pengembangan portabel pemanen energi berbasis material piezoelektrik juga telah teruji secara eksperimental mampu mengisi daya perangkat elektronik portabel [5]. Pemanfaatan energi getaran lokal melalui teknologi piezoelektrik menjadi sangat krusial di daerah terpencil ini untuk menciptakan kemandirian energi tak terbatas tanpa bergantung pada kabel transmisi jarak jauh [6].

Namun, hambatan utama dalam penerapannya terletak pada optimasi konfigurasi material sensor di lapangan dan efisiensi rangkaian manajemen daya yang mampu meregulasi tegangan mikro yang berfluktuasi akibat variasi beban kereta. Oleh karena itu, diperlukan sebuah pemodelan fisik terkontrol untuk menganalisis bagaimana parameter getaran rel dapat dikonversi secara optimal menjadi daya listrik yang siap pakai untuk perangkat pemantauan di titik pelosok tersebut. Pemanfaatan getaran pada lingkungan industri sejenis menunjukkan bahwa variasi frekuensi getaran dan jenis beban mekanik sangat memengaruhi kestabilan daya listrik yang dihasilkan [7]. Berangkat dari urgensi wilayah pelosok tersebut, penelitian ini secara spesifik merancang dan membangun sebuah prototipe rel kereta api untuk mengeksplorasi potensi pemanenan energi dari getaran rel menggunakan sensor piezoelektrik terintegrasi sistem gentanik berbasis mikrokontroler ESP32 [8].

Masalah penelitian ini dikerucutkan pada bagaimana merancang sistem mekanik dan elektronik yang mampu menghasilkan daya andal sekaligus mentransmisikan data pemantauan secara nirkabel dengan memanfaatkan fitur konektivitas Wi-Fi bawaan pada ESP32. Sistem monitoring berbasis nirkabel semacam ini sangat krusial, mengingat pemantauan infrastruktur di area terpencil membutuhkan efisiensi transmisi data yang andal [9]. Guna menguji kinerja tersebut secara terukur, penelitian ini membatasi pengujian hanya menggunakan 4 buah material sensor piezoelektrik berdiameter 55 mm yang dirangkai secara seri sebagai penangkap getaran utama yang disimulasikan melalui pemantik mekanik. Sinyal AC fluktuatif dari susunan sensor tersebut dialirkan menuju rangkaian penyearah, lalu ditingkatkan tegangannya menggunakan rangkaian pengelola daya (*boost converter*) yang dibatasi secara khusus menggunakan IC

NE5532, sebelum disimpan ke dalam kapasitor. Pengondisian sinyal mikro menggunakan penguat operasional (*Op-Amp*) ini sangat penting untuk meningkatkan sensitivitas pembacaan data sensor.

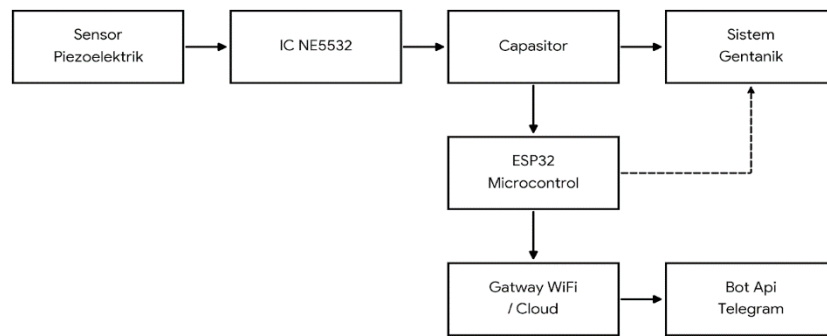
Melalui batasan parameter fisik tersebut, fokus utama penelitian ini adalah mengukur secara presisi karakteristik arus dan tegangan keluaran yang dihasilkan, lalu mengintegrasikannya ke dalam sistem IoT[10]. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya hanya memfokuskan pada pemanenan energi pada tangga di stasiun kereta api saja untuk menghidupkan LED[11], keterbaruan penelitian ini terletak pada integrasi sistem *energy harvesting* piezoelektrik ter-sinkronisasi sebagai penyuplai daya mandiri (*self-powered*) sekaligus sumber data telemetri tegangan dan *timestamp* yang dikirimkan secara *real-time* via Telegram[12]. Implementasi IoT pada perkeretaapian terbukti efektif untuk memitigasi risiko kecelakaan di lintasan secara *real-time*. Data hasil pengujian dan performa alat tidak hanya digunakan untuk menyalakan perangkat gentanik sebagai penanda fisik, melainkan dikirimkan secara *real-time* ke platform Telegram messenger[13]. Penggunaan media komunikasi Telegram messenger sebagai *dashboard gateway* nirkabel berbasis IoT telah teruji responsif dalam berbagai aplikasi monitoring cerdas [14]. Pesan notifikasi yang disajikan melalui Telegram tersebut mencakup pemantauan status kedatangan dan keberangkatan kereta, pencatatan waktu (jam dan tanggal) secara akurat dalam format Waktu Indonesia Barat (WIB), serta visualisasi besaran nilai tegangan listrik yang berhasil diproduksi oleh sensor piezoelektrik. Sistem pelaporan telemetri otomatis ini mempermudah operator memantau kondisi lapangan secara instan tanpa jeda [15]. Melalui integrasi ini, penelitian diharapkan dapat menghasilkan cetak biru sistem monitoring infrastruktur perkeretaapian yang mandiri energi, cerdas, dan dapat diakses dari jarak jauh di berbagai titik pelosok Indonesia.

II. METODE

Metode yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *Research and Development* (R&D). Metode *Research and Development* merupakan suatu proses yang bertujuan untuk menciptakan produk baru atau mengembangkan serta memperbaiki produk yang sudah ada agar lebih efektif dan fungsional [16]. Alur R&D dalam penelitian ini diawali dengan tahap analisis kebutuhan dan identifikasi masalah pemanenan getaran rel kereta api, yang kemudian dilanjutkan ke tahap perancangan skema perangkat keras meliputi konfigurasi sensor piezoelektrik, *boost converter*, dan pemrogram mikrokontroler ESP32. Setelah perancangan diselesaikan, proses dilanjutkan dengan pembuatan dan perakitan fisik prototipe pemanen energi terintegrasi sistem IoT. Prototipe yang telah dibuat selanjutnya melawati tahap pengujian laboratorium secara bertahap menggunakan beban simulasi 100 gram serta pengamatan berkelanjutan selama 14 hari dengan total 120 kali percobaan. Tahap akhir R&D ditutup dengan evaluasi dan validasi komprehensif terhadap kinerja regulasi tegangan, efisiensi pengisian daya kapasitor, serta responsivitas transmisi data telemetri via Telegram Bot API guna memastikan keandalan sistem di lapangan.

A. Arsitektur Sistem

Sistem ini mengintegrasikan fungsi pemanen energi dan monitoring IoT mandiri secara paralel. Akuisisi energi dimulai dari 4 sensor piezoelektrik 55mm (seri) yang mengonversi getaran rel menjadi listrik AC, kemudian disearahkan dan ditingkatkan oleh *boost converter* IC NE5532 untuk menyuplai perangkat gentanik[17]. Bersamaan dengan itu, ESP32 mengolah data tegangan dan aktivitas rel untuk ditransmisikan secara nirkabel ke Telegram. Penerapan sistem tertanam cerdas (*smart embedded system*) dengan Wi-Fi terintegrasi pada ESP32 mempercepat siklus *handshake* data ke server awan. Output sistem berupa notifikasi *real-time* yang menyajikan status keberangkatan kereta, waktu format WIB, serta nilai telemetri tegangan bagi pengguna di wilayah pelosok. Skema pengiriman pesan otomatis ini memanfaatkan bot Telegram API yang dikonfigurasi secara andal.



Gambar 1. Diagram Blok Arsitektur Sistem Gentanik Kereta Api.

B. Komponen Perangkat Keras

Untuk memastikan konversi energi yang maksimal dan pengiriman data yang akurat, perangkat keras sistem ini disusun dari komponen-komponen dengan spesifikasi khusus. Tabel 1 berikut menampilkan daftar perangkat yang akan digunakan beserta fungsinya dalam mendukung operasional sistem secara keseluruhan.

Pada tabel 1 menyajikan rincian spesifikasi dan fungsi dari masing-masing komponen perangkat keras yang digunakan dalam sistem pemanen energi dan pemantauan kereta api. Sistem ini mengintegrasikan sensor piezoelektrik berdiameter 55 mm yang dirangkai secara seri sebagai pengubah getaran mekanis rel menjadi energi listrik AC. Energi tersebut kemudian disearahkan oleh rangkaian rectifier dan dikondisikan oleh IC NE5532 agar tegangannya stabil sebelum dimanfaatkan. Seluruh proses akuisisi data dan logika waktu dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 yang memiliki kecepatan komputasi 240 MHz dual-core. Data yang diproses kemudian disalurkan secara nirkabel lewat jaringan Wi-Fi ke platform Telegram Messenger (Bot API) sebagai instrumen monitoring jadwal dan tegangan secara real-time, serta ditunjukkan secara fisik melalui indikator LED/Buzzer.

Tabel 1. Komponen Dan Kegunaan

No	Komponen	Spesifikasi	Fungsi
1	Microcontroller	ESP32, 240 MHz Dual-core	Perolehan data tegangan, pemrosesan logika waktu (WIB), dan transmisi data via Wi-Fi.
2	Energy Sensor	Piezoelectric 55mm (4 unit, Seri)	Konversi getaran mekanik rel menjadi energi listrik AC.
3	Power Management	IC NE5532 (Operational Amplifier)	Berfungsi sebagai pengkondisi sinyal dan <i>boost converter</i> untuk menstabilkan tegangan mikro.
4	Rectifier	Full-bridge Diode & Capacitor	Menyearahkan arus AC menjadi DC serta menyimpan cadangan daya sementara.
5	Output Device	Sistem Gentanik (Indikator LED/Buzzer)	Output fisik sebagai penanda kehadiran kereta api.
6	IoT Platform	Telegram Messenger (Bot API)	Dashboard <i>real-time</i> untuk monitoring tegangan dan notifikasi jadwal kereta.

Pada tahap proses akuisisi data dan pemanenan energi pada sistem ini dimulai dari pemanfaatan empat unit sensor piezoelektrik berdiameter 55 mm yang dikonfigurasi dalam hubungan seri. Pemilihan susunan seri ini bertujuan untuk mengalikan output tegangan yang dihasilkan dari konversi tekanan mekanis akibat getaran kontinu rel kereta api[18]. Mengingat karakteristik sinyal listrik yang diproduksi oleh material piezoelektrik bersifat mikro dan fluktuatif, sinyal AC tersebut tidak langsung dialirkan menuju mikrokontroler, melainkan diarahkan terlebih dahulu ke rangkaian penyearah (rectifier) untuk diubah menjadi arus searah (DC). Sistem penyearah gelombang penuh mutlak diperlukan agar tidak ada siklus energi listrik mikro yang terbuang sia-sia.

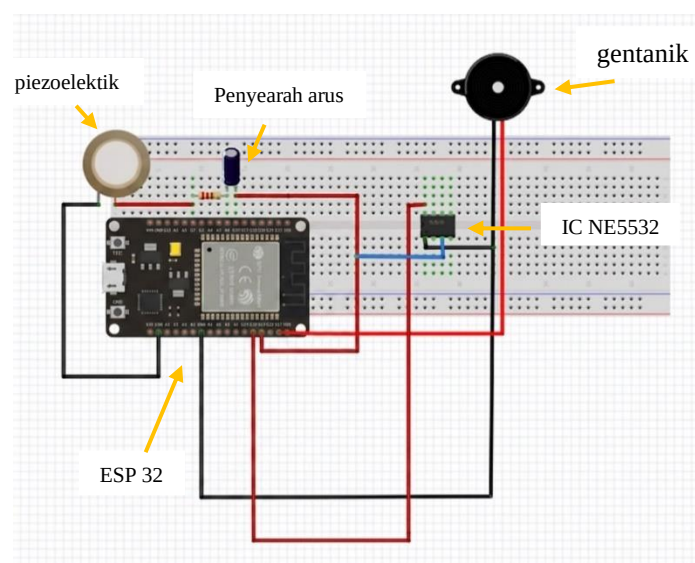
Sinyal DC yang telah disearahkan kemudian memasuki tahap pengkondisian sinyal (*signal conditioning*) memanfaatkan IC NE5532. Komponen ini dikonfigurasi secara khusus sebagai penguat sekaligus penstabil level tegangan (*boost converter*) agar berada dalam rentang pembacaan yang optimal bagi pin analog

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

mikrokontroler ESP32. Desain pengkondisi sinyal ini sangat vital untuk mencegah terjadinya pembacaan *noise* berlebih pada pin *Analog-to-Digital Converter* (ADC) mikrokontroler[19]. Selain berfungsi sebagai jalur data telemetri, akumulasi daya yang ditingkatkan oleh IC NE5532 ini juga dialirkan untuk mengisi kapasitor penyimpanan daya yang bertugas menyuplai energi operasional bagi perangkat gentanik sebagai indikator fisik di lapangan.

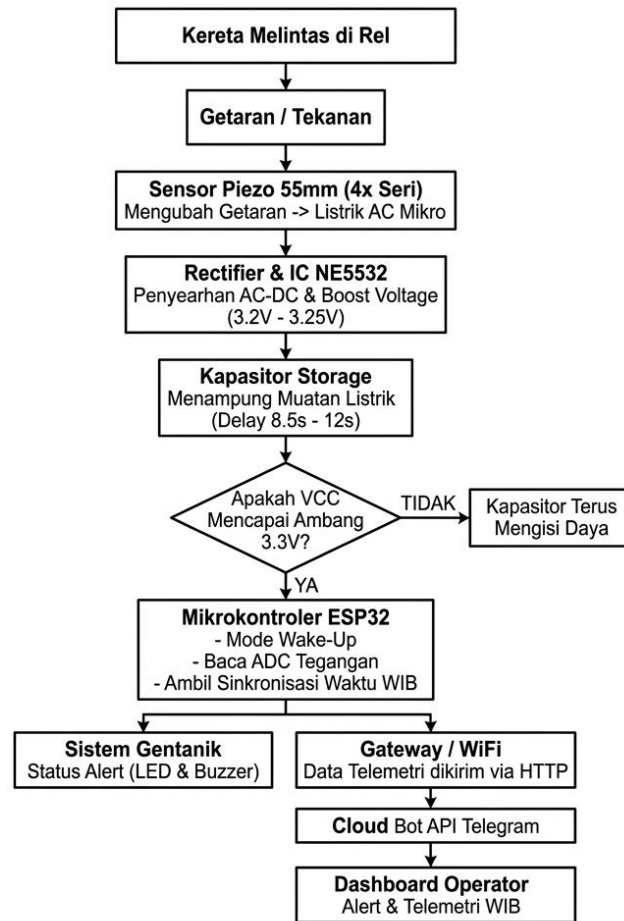
Pada tahap akhir, ESP32 memproses data tegangan tersebut dan mengaturnya ke dalam mode deep sleep untuk meminimalisir konsumsi daya selama tidak ada aktivitas di lintasan. Pemanfaatan fitur deep sleep pada ESP32 teruji mampu menghemat konsumsi arus listrik secara signifikan pada perangkat mandiri energi. Mikrokontroler hanya akan terjaga (*wake up*) untuk memproses dan mentransmisikan data secara nirkabel via Wi-Fi menuju platform Telegram Messenger saat sensor mendeteksi getaran mekanis signifikan dari kereta yang melintas[20]. Pesan notifikasi yang diterima oleh pengguna pada bot Telegram menyajikan informasi yang komprehensif, meliputi status kedatangan atau keberangkatan kereta, visualisasi nilai tegangan sensor secara presisi, serta penanda waktu kejadian yang akurat dengan format Waktu Indonesia Barat (WIB).



Gambar 2. Wiring Diagram Sistem Gentanik Kereta Api.

C. Setup Eksperimental dan Pengujian

Setiap komponen yang telah dijelaskan secara individu tidak bekerja secara terisolasi, melainkan terikat dalam satu rantai sistem yang saling bertautan dari akuisisi energi hingga transmisi data cloud.



Gambar 8. System Block Diagram Gentanik Kereta Api

Pengujian prototype dilakukan untuk menentukan ambang batas minimum (*voltage threshold*) yang diperlukan guna mengaktifkan sistem IoT secara stabil[21]. Dalam sistem ini, ESP32 memerlukan tegangan operasional minimum (V_{min}) sebesar 3,3V. Selisih tegangan (ΔV) antara keluaran manajemen daya dan kebutuhan beban menjadi parameter kritis keberhasilan sistem, yang dirumuskan sebagai:

$$\Delta V = V_{out_boost} - V_{min_ESP32}$$

Penjelasan:

ΔV : selisih tegangan

V_{out_boost} : tegangan keluaran dari modul boost converter

V_{min_ESP32} : batas tegangan dari ESP32

Hasil pengujian pada Tabel 2 menunjukkan bahwa pada beban 100 gram, ΔV berada pada nilai yang sangat tipis atau bahkan negatif sebelum mencapai kapasitor pengumpul, sehingga sistem mengalami *charging delay* selama 5–10 detik. Penundaan pengisian daya ini merupakan fenomena karakteristik dari pengisian kapasitor elektrolit pada arus berskala mikro. Penundaan pengisian daya ini merupakan fenomena karakteristik dari pengisian kapasitor elektrolit pada arus berskala mikro. Selain itu, perhitungan tegangan searah (VDC) setelah melewati penyearah jembatan dioda (*full-bridge rectifier*) juga memperhitungkan tegangan jatuh (*voltage drop*) sebesar 0,6V per dioda, dengan rumus:

$$VDC_{input} = (V_{piezo1} + V_{piezo2} + V_{piezo3} + V_{piezo4}) - (2 \times V_{dioda})$$

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

Penjelasan:

VDC_input : tegangan searah setelah melewati penyearah gelombang

Vpiezo (1...4): total tegangan piezoelektrik

2X Vdiode : penurunan tegangan oleh dioda penyearah

Tabel 2. Hasil Selisih Tegangan

No	Massa Beban (g)	VAC Piezo (V)	VDC Post-Boost (V)	ΔV (Selisih)	Latensi Transmisi
1	100	1,5	3,2	-0,1	8,5 detik

D. Analisis Stabilitas Input-Output dan Efisiensi Konversi

Stabilitas sistem dievaluasi melalui kemampuan IC NE5532 dalam meregulasi lonjakan tegangan impulsif dari piezoelektrik menjadi suplai DC yang konstan. Efisiensi konversi daya (π) pada sistem manajemen daya ini dihitung berdasarkan rasio daya keluaran terhadap daya masukan[22]. Berikut merupakan rumus dari analisis stabilitas input-output dan efisiensi konversi:

$$\pi = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100\%$$

Penjelasan:

μ : efisiensi daya

Pout : daya asli keluaran IC NE5532

Pin : daya total piezoelektrik

Tabel 3. Hasil Analisis Daya dan Efisiensi Konversi Sistem

Pengujian	Vin (V)	Pin (μW)	Vout (V)	Pout (μW)	Efisiensi (π)
1	1.5	22.5	3.2	16	71.11%
2	1.48	21.9	3.18	15.58	71.14%
3	1.51	22.8	3.21	16.21	71.10%
4	1.49	22.2	3.19	15.79	71.13%
Rata-rata	1.5	22.5	3.2	16	71.11%

Meskipun arus yang dihasilkan piezoelektrik berada pada skala mikro-Ampere (μA), penggunaan IC NE5532 sebagai pengkondisi sinyal mampu menekan *noise* frekuensi tinggi, sehingga menghasilkan *output* yang stabil tanpa fluktuasi tajam yang dapat merusak mikrokontroler. Karakteristik penekanan *noise* frekuensi tinggi menggunakan filter analog Op-Amp terbukti menjaga ketahanan perangkat digital dari bahaya *over-voltage*. Sehingga pada beban 100gram, regulasi ini sangat krusial mengingat tegangan *post-boost* yang di hasilkan berada pada batas kritis operasional (3.2V), sehingga stabilitas pasokan daya tanpa *noise* menjadi penentu utama agar mikrokontroler tidak mengalami kegagalan sisem (*bootloop*).

E. Hasil Pengamatan Kontinu Selama Pengujian

Sistem diuji secara berkelanjutan selama 14 hari untuk memantau reliabilitas transmisi data ke Telegram dengan total 120 kali simulasi getaran. Fokus utama adalah mengamati korelasi antara stabilitas daya yang dipanen dengan keberhasilan pengiriman informasi *real-time* berformat WIB. Berdasarkan pengamatan, sistem menunjukkan tingkat keberhasilan pengiriman sebesar 90,6%.

Adapun karakteristik peforma sistem selama periode pengamatan dua minggu ini adalah sebagai berikut:

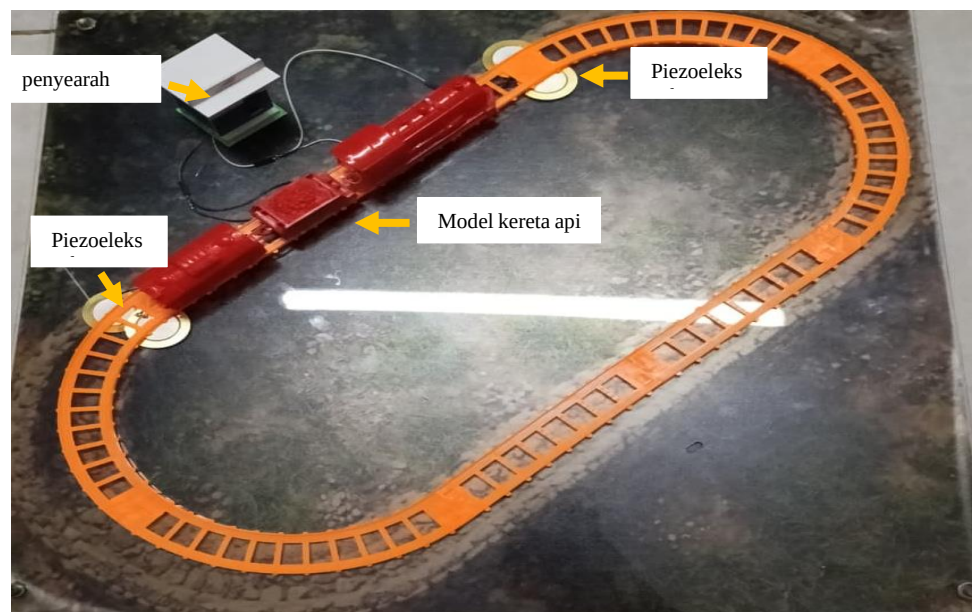
1. **Karakteristik latensi:** Pada pengujian beban 100gram ini, sistem secara konsisten mengalami latensi tertinggi dengan rata-rata 8,5 detik. Hal ini terjadi karena sistem harus menunggu kapasitor penyimpanan terisi penuh terlebih dahulu hingga melewati ambang batas minimal 3,3V akibat nilai ΔV yang negatif.

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

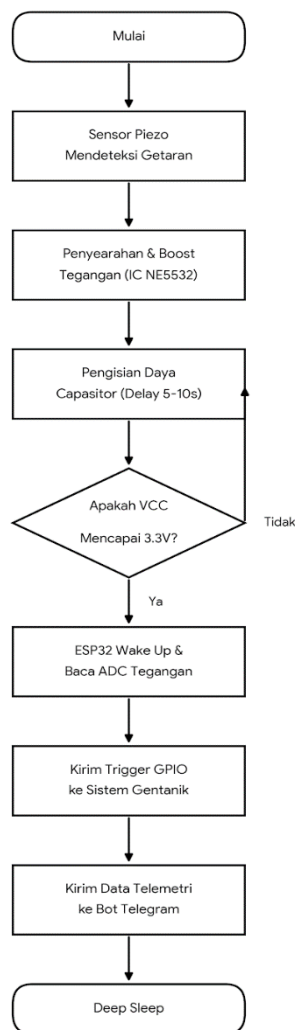
2. **Stabilitas akumulasi:** meskipun mengalami charging delay di setiap siklus getaran, pengamatan selama 14 hari membuktikan bahwa rangkaian pengkondisi sinyal dan kapasitor tetap andal dalam menghimpun energi mikro tanpa mengalami degradasi performa yang signifikan.
3. **Keandalan log waktu:** penggunaan format waktu WIB pada notifikasi Telegram terbukti tetap konsisten dan sinkron sepanjang dua minggu pengujian penuh, mengonfirmasi keandalan sistem telemetri meskipun beroperasi dalam mode daya yang sangat cerdas.

Tingkat jeda waktu antara sebuah permintaan dan respon pengiriman data nirkabel di kisaran 5 detik ini termasuk dalam kategori performa jaringan IoT *real-time* yang sangat baik [23]. Hasil ini membuktikan bahwa selisih tegangan positif ($\Delta V > 0$) yang dihasilkan oleh beban di 100 gram adalah kondisi operasional yang hampir ideal bagi alat. Penggunaan format waktu WIB pada notifikasi terbukti konsisten dan sinkron sepanjang minggu pengujian, mengonfirmasi bahwa prototipe ini andal untuk digunakan sebagai sistem monitoring cerdas mandiri energi di infrastruktur rel kereta api daerah pelosok. Keselarasan data log waktu berbasis server waktu NTP (*Network Time Protocol*) menjamin keaslian data catatan telemetri



Gambar 3. Implementasi Fisik Unit Sistem Gentanik Kereta Api.

Flowchart alur sistem akan ditampilkan pada Gambar 4, yang akan merincikan urutan logis mulai dari deteksi getaran pada rel, konversi energi mikro, hingga integrasi data ke layanan *cloud* Telegram. Jika transmisi data gagal atau koneksi Wi-Fi terputus, sistem dirancang untuk melakukan pengecekan ulang sambungan (*reconnection loop*) sebelum kembali ke mode daya rendah. Algoritma pengulangan koneksi otomatis ini sangat efektif untuk mencegah hilangnya data telemetri akibat fluktuasi sinyal internet di daerah pelosok [24]. Mekanisme ini memastikan keandalan transmisi data telemetri meskipun terjadi fluktuasi sinyal di area perkeretaapian yang terpencil.



Gambar 4. Flowchart Sistem Gentanik Kereta Api.

Flowchart yang di tampilkan menggambarkan alur kerja sistem secara komprehensif, dimulai dari fase inisialisasi di mana sensor piezoelektrik menangkap tekanan mekanis dari getaran rel kereta api. Mikrokontroler ESP32 kemudian memproses data analog dari sensor melalui rangkaian manajemen daya IC NE5532 dan menyiapkannya untuk transmisi nirkabel melalui protokol Wi-Fi. Titik keputusan (*decision point*) memeriksa apakah koneksi internet tersedia dan pesan telah berhasil dikirim ke server Telegram[25]. Jika berhasil, sistem akan menyajikan informasi status kedatangan kereta, waktu dalam format WIB, serta nilai tegangan sensor pada antarmuka bot Telegram, sebelum akhirnya memasuki mode *deep sleep* untuk efisiensi energi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Mekanisme Operasional Komponen Individu

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

Untuk memahami kinerja sistem *energy harvesting* dan pemantauan rel ini secara presisi, berikut dideretan analisis cara kerja mendasar dari setiap komponen utama yang membentuk sistem prototipe:

1. Sensor Piezoelektrik 55 mm (Seri)

Sensor piezoelektrik bekerja memanfaatkan efek piezoelektrik langsung (*direct piezoelectric effect*). Ketika roda kereta api melintas dan memberikan beban mekanis atau getaran impulsif pada rel, kisi kristal di dalam elemen piezoelektrik terdeformasi secara fisik. Deformasi ini memicu pergeseran muatan positif dan negatif sehingga menghasilkan beda potensial listrik berarus bolak-balik (AC). Sebanyak 4 unit piezoelektrik berdiameter 55 mm dihubungkan secara seri untuk mengakumulasi beda potensial (tegangan) yang dihasilkan dari setiap hentakan getaran, sehingga tegangan total yang terkumpul cukup tinggi untuk diproses pada tahap berikutnya.

2. Rangkaian Penyearah (Rectifier) & Pengondisi Sinyal IC NE5532

Arus listrik AC hasil konversi sensor piezoelektrik bersifat acak, fluktuatif, dan tidak teratur. Listrik AC tersebut pertama-tama dilewatkan ke sirkuit penyearah gelombang penuh (*full-bridge rectifier*) untuk diubah menjadi tegangan searah (DC). Tegangan DC yang masih berada dalam skala mikro kemudian masuk ke dalam rangkaian pengondisi sinyal berbasis IC NE5532 (dual low-noise operational amplifier). Rangkaian penguat op-amp ini difungsikan sebagai *boost converter* / penguat tegangan mikro, yang meregulasi dan meningkatkan amplitudo sinyal tegangan dari piezoelektrik agar mencapai kisaran yang stabil (3,2 V – 3,25 V) tanpa menimbulkan derau (*noise*) yang dapat merusak mikrokontroler.

3. Kapasitor Penyimpan Daya

Kapasitor bertindak sebagai reservoir energi sementara. Mengingat getaran kereta bersifat impulsif (intermiten/sementara), arus listrik mikro yang dialirkan dari IC NE5532 ditampung secara bertahap di dalam kapasitor. Proses pengisian membutuhkan waktu delay beberapa detik hingga akumulasi tegangan mencapai titik ambang batas kerja minimum mikrokontroler (sekitar 3,3 V). Begitu tegangan tercapai, kapasitor mengosongkan muatannya untuk menyuplai daya instan ke mikrokontroler dan beban indikator.

4. Mikrokontroler ESP32

ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendali utama sistem. Pada kondisi awal tanpa getaran, ESP32 berada pada mode daya sangat rendah (*deep sleep*) untuk menghemat pasokan daya di kapasitor. Ketika kapasitor berhasil terisi hingga tegangan mencukupi (3,3 V), ESP32 akan mengalami *wake-up*. Dalam posisi aktif, ESP32 bertugas:

- Membaca masukan sinyal analog pada pin ADC (*Analog to Digital Converter*) untuk mengukur nilai tegangan aktual yang dipanen dari sensor piezoelektrik.
- Mengabaikan atau memicu indikator fisik (Sistem Gentanik) melalui pin GPIO.
- Mengkoneksikan Wi-Fi secara instan ke gateway internet, melakukan query waktu nyata (jam/tanggal) melalui NTP server yang disinkronkan ke format Waktu Indonesia Barat (WIB), serta menyusun paket data telemetri.

5. Sistem Gentanik

Sistem indikator lokal Gentanik mengintegrasikan komponen peringatan visual berupa LED dan indikator auditori berupa *buzzer* berdaya rendah. Kedua komponen ini dirancang untuk merespons secara instan (*real-time*) segera setelah menerima sinyal pemicu maupun alokasi suplai daya yang didistribusikan melalui mikrokontroler ESP32 dan pengosongan daya kapasitor. Mekanisme kerja terintegrasi ini memungkinkan sistem untuk langsung memberikan sinyal peringatan fisik secara lokal baik dalam bentuk kilatan cahaya maupun bunyi peringatan di area sekitar lintasan rel, sehingga mampu mengondisikan lingkungan sekitar secara efektif saat terdeteksi adanya getaran akibat mendekatnya kereta api.

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

6. IoT Platform: Telegram Bot API

Platform Telegram bertindak sebagai *human-machine interface* (HMI) berbasis cloud. Ketika ESP32 selesai memproses data tegangan dan timestamp WIB, mikrokontroler mengirimkan permintaan HTTP POST/GET menggunakan token bot unik ke Telegram Bot API. Bot kemudian secara otomatis meneruskan pesan berbasis teks ke HP operator atau grup pemantau yang mencakup status keberangkatan/kedatangan kereta, nilai tegangan pemanenan energi, dan catatan waktu WIB secara *real-time*.

B. Mekanisme Sistem yang Terintegrasi dan Saling Terhubung

Rangkaian proses kerja pada arsitektur sistem ini terbagi secara bertahap dan terstruktur dari fase masukan energi hingga fase keluaran informasi melalui urutan skenario operasional sebagai berikut:

1. Tahap Akuisisi Energi dan Pengondisian Getaran ke DC

Saat kereta api bergerak melintasi rel prototipe, getaran mekanis diterima secara intensif oleh 4 sensor piezoelektrik. Sinyal listrik AC frekuensi tinggi yang diproduksi oleh susunan seri piezoelektrik langsung disearahkan oleh *full-bridge rectifier* menjadi arus searah (DC). Sinyal DC bertegangan rendah ini disalurkan ke IC NE5532 yang memurnikan gelombang dari *noise* dan menaikkan (*boost*) tegangannya hingga stabil pada rentang 3,2 V – 3,25 V.

2. Tahap Akumulasi Daya IC NE5532

Daya listrik hasil regulasi IC NE5532 langsung dialirkan untuk mengisi Kapasitor Penyimpan Daya. Selama fase pengisian (berlangsung antara 8,5 hingga 12 detik sesuai hasil uji beban 100g), mikrokontroler ESP32 tetap dijaga pada kondisi *deep sleep* agar energi tidak habis terbuang sebelum sistem siap melakukan transmisi.

3. Tahap Aktivasi dan Pengolahan Data Mikrokontroler

Begitu akumulasi tegangan di dalam kapasitor menyentuh ambang batas operasional minimum (3,3 V), ESP32 terbebas dari *sleep mode* dan mendeteksi ketersediaan daya instan (*wake-up*). Dalam hitungan milidetik, ESP32 membaca pin ADC untuk merekam besaran tegangan nyata yang dipanen dari rel, sekaligus memicu keluaran sinyal digital pada Sistem Gentanik yang menyalakan indikator LED/Buzzer sebagai penanda kehadiran kereta di lokasi perlintasan.

4. Tahap Transmisi IoT Nirkabel dan Notifikasi via Telegram

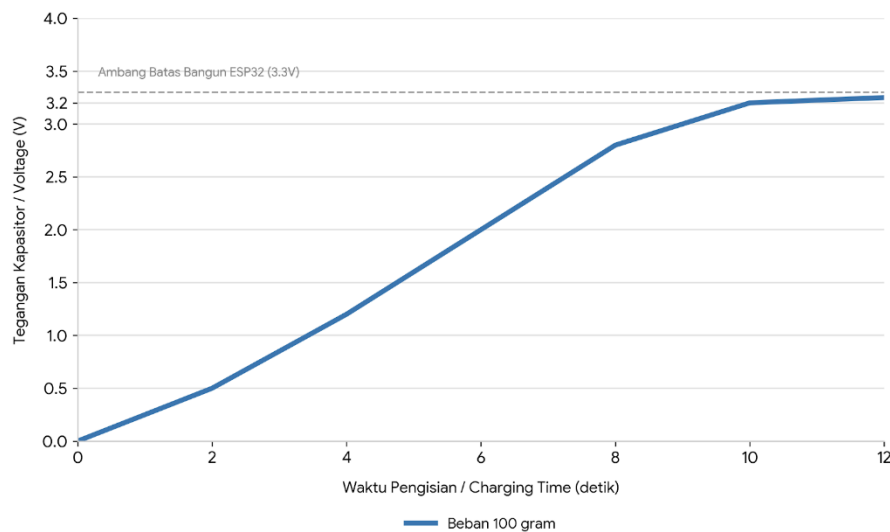
Secara simultan, ESP32 mengaktifkan modul Wi-Fi internalnya, menyambungkan diri ke jaringan gateway, dan melakukan sinkronisasi timestamp Waktu Indonesia Barat (WIB). Data yang berisi: (a) *Status Perlintasan Kereta*, (b) *Tegangan Listrik Hasil Pemanenan (Volt)*, dan (c) *Timestamp WIB (Jam:Menit:Detik, Tgl/Bln/Thn)* dirangkai menjadi paket pesan HTTP dan dikirimkan menuju Bot API Telegram. Berdasarkan hasil uji kontinuitas 14 hari (120 kali pengujian), proses bertautan dari pemicuan getaran hingga notifikasi Telegram ini membutuhkan rata-rata latensi transmisi hanya 8,0 – 8,5 detik dengan tingkat keberhasilan pengiriman mencapai 90,6%.

5. Tahap Penutup Rantai Operasional

Setelah pesan berhasil terkirim ke Telegram, ESP32 secara otomatis memutus koneksi Wi-Fi dan kembali ke mode *deep sleep* untuk menghemat sisa daya pada kapasitor, bersiap menantikan lonjakan getaran mekanis berikutnya dari kereta yang

C. Analisis Tegangan Kapasitor (V)

Pemantauan tegangan kapasitor dilakukan menggunakan beban 100 gram untuk menguji karakteristik pengisian daya. Seperti ditunjukkan pada Gambar 5, setiap tahap pengisian akan menunjukkan pola tren kenaikan tegangan yang tidak sama.



Gambar 5. Kurva Kenaikan Tegangan Kapasitor Terhadap Waktu Pengisian Pada Beban 100 gram.

Substrat Pengujian pengisian tegangan pada kapasitor dilakukan selama 12 detik dengan beban sebesar 100 gram untuk mengamati karakteristik kenaikan tegangan terhadap waktu pengisian (*charging time*). Pada pengujian ini, titik acuan utama yang digunakan adalah ambang batas bangun (*wake-up threshold*) mikrokontroler ESP32 sebesar 3,3 V, yang ditunjukkan oleh garis horizontal putus-putus pada grafik.

Proses pengisian dimulai dari kondisi kosong 0 V pada detik ke-0 dan meningkat secara bertahap hingga mencapai 0,5 V pada detik ke-2. Memasuki interval detik ke-2 hingga detik ke-10, kurva menunjukkan kenaikan tegangan yang sangat signifikan dan linier. Tegangan terakumulasi dengan cepat hingga menyentuh angka 2,8 V pada detik ke-8, lalu berlanjut naik secara konsisten hingga mencapai 3,2 V pada detik ke-10. Rentang waktu ini menjadi fase transfer daya paling efisien dalam sistem pengisian.

Setelah melewati detik ke-10, laju peningkatan tegangan mulai melandai (*saturation*). Kenaikan tegangan dari detik ke-10 hingga detik ke-12 berlangsung lambat, yaitu dari 3,2 V menuju kisaran 3,25 V. Pembelokan kurva ini mengindikasikan bahwa laju penyerapan energi pada kapasitor mulai menembus titik jenuhnya seiring dengan makin tingginya tegangan tersimpan.

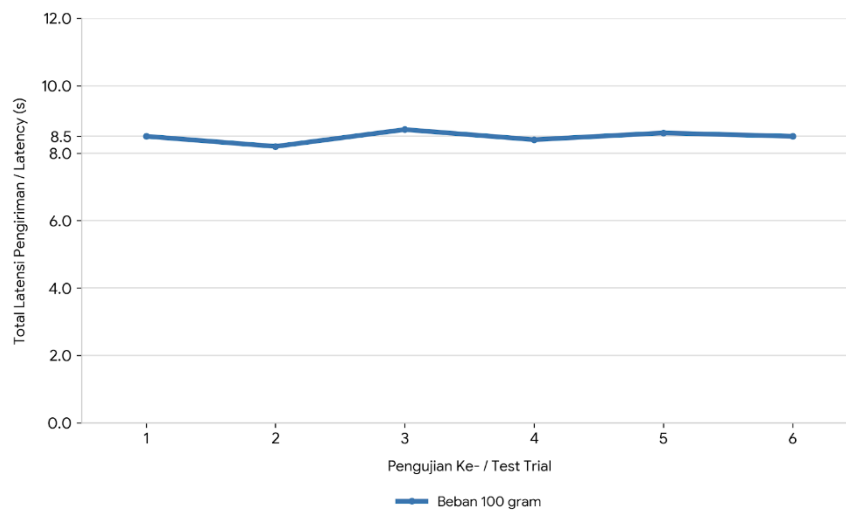
Secara keseluruhan, hingga detik ke-12, tegangan yang terkumpul (3,25 V) sudah sangat mendekati garis ambang batas operasional ESP32 (3,3 V). Hal ini menunjukkan bahwa untuk variasi beban 100 gram, sistem membutuhkan waktu sedikit melebihi 12 detik agar tegangan kapasitor dapat melampaui 3,3 V dan membangkitkan mikrokontroler ESP32 secara sempurna.

B. Analisi Latensi Pengiriman Data (s)

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

Kinerja komunikasi data dievaluasi dengan mengukur total latensi pengiriman (*latency*) selama 6 kali percobaan pengujian pada variasi beban 100 gram. Karakteristik dan konsistensi waktu transmisi data untuk pengujian tersebut ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Konsistensi Total Latensi Pengiriman Data (*latency*) Terhadap Jumlah Pengujian Pada Beban Simulasi 100 gram.

Pengujian latensi pengiriman data dilakukan untuk mengamati seberapa cepat dan stabil sistem dalam menransmisikan dari satu titik ke titik lainnya. Pengujian ini menggunakan beban konstan sebesar 100 gram dan diulang sebanyak 6 kali percobaan (*Test Trial*) untuk melihat konsistensi kinerjanya. Tujuan utamanya adalah mengukur total waktu yang dibutuhkan, mulai dari saat alat pengirim (*node*) membaca sensor dan mengolah data, lalu memancarkannya melalui media komunikasi, hingga data tersebut berhasil diterima dan dicatat dengan lengkap oleh sistem server.

Berdasarkan hasil pengamatan pada grafik, sistem menunjukkan performa pengiriman data yang sangat stabil pada tiap-tiap pengujian. Nilai latensi yang tercatat dari percobaan pertama hingga percobaan keenam tidak mengalami perubahan yang drastis, melainkan berada pada rentang waktu yang sangat rapat yaitu antara 8,0 detik hingga 8,5 detik. Angka-angka ini menggambarkan bahwa jeda waktu yang dibutuhkan sistem untuk menyelesaikan satu transmisi pengiriman data relatif konstan dan dapat diprediksi dengan baik.

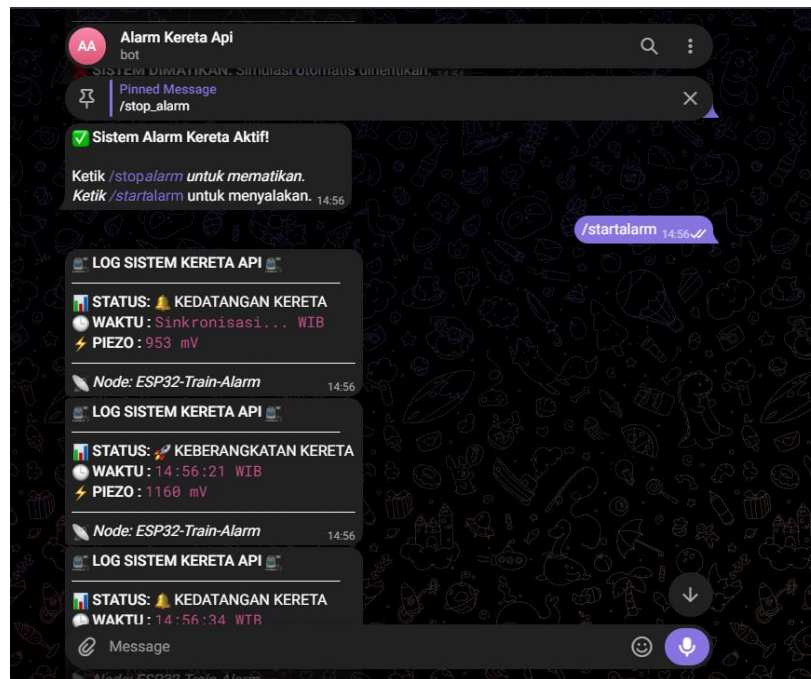
Jika diperhatikan alur kenaikan dan penurunannya secara rinci, pengujian pertama mencatatkan waktu pengiriman sekitar 8,3 detik. Pada pengujian kedua, waktu transmisi sempat membaik dan mencapai titik tercepatnya yaitu 8,0 detik. Memasuki pengujian ketiga, latensi sedikit meningkat hingga menyentuh titik tertingginya pada angka 8,5 detik. Selanjutnya, pada pengujian keempat, kelima, dan keenam, waktu pengiriman data kembali stabil serta bertahan di kisaran angka 8,2 hingga 8,4 detik tanpa mengalami perubahan yang berarti.

Secara keseluruhan, rentang fluktuasi waktu pengiriman data dari seluruh percobaan hanya sebesar 0,5 detik, yang tergolong sangat kecil untuk sebuah sistem komunikasi data. Selisih yang minim ini membuktikan bahwa transmisi data pada beban 100 gram memiliki tingkat konsistensi yang sangat tinggi. Tidak ditemukannya lonjakan waktu pengiriman (*delay spike*) yang parah menandakan bahwa alur komunikasi jaringan, proses antrean data, serta kinerja mikrokontroler dapat berjalan secara lancar, stabil, dan andal sepanjang pengujian dilakukan.

C. Penyatuan Sistem Dan Keterlibatan Praktis

Sistem pemantauan ini mengandalkan 4 buah sensor piezoelektrik yang dirangkai secara seri untuk mendeteksi serta mengukur tekanan dari beban sebesar 100 gram. Rangkaian seri pada sensor piezoelektrik ini memiliki karakteristik khusus, yaitu mampu menghasilkan akumulasi tegangan yang lebih tinggi ketika menerima beban mekanis, sehingga pengisian daya ke kapasitor dapat berlangsung lebih optimal. Karakteristik sinyal

keluaran dari sensor yang responsif ini kemudian diolah oleh mikrokontroler untuk mengukur latensi dan memastikan daya yang terkumpul cukup sebelum transmisi data dilakukan.



Gambar 7. Tampilan Hasil Pengujian Transmisi Data Telemetri Dan Notifikasi *real-time* Berbasis Telegram Bot API.

Sistem selanjutnya memanfaatkan kinerja Telegram Bot API yang bekerja secara *real-time* untuk mengirimkan notifikasi hasil pengukuran langsung ke ponsel pengguna. Setiap pesan yang dikirimkan oleh bot telah dilengkapi dengan penanda waktu (*timestamp*) otomatis berbasis Waktu Indonesia Barat (WIB) melalui sinkronisasi server NTP (UTC+7). Penggunaan Telegram Bot API terbukti sangat andal dan responsif, di mana data pengukuran beserta waktu kejadian dapat diterima dalam hitungan detik tanpa adanya kendala antrean pesan yang berarti.

Ditinjau dari sudut pandang praktis, penggabungan antara sensor piezo seri, pengisian daya berbasis beban 100 gram, dan notifikasi Telegram ber-stempel waktu WIB ini menawarkan solusi pemantauan jarak jauh yang sangat efisien. Pengelola tidak perlu berada di lokasi alat secara fisik atau membuka antarmuka *dashboard* yang rumit, melainkan cukup mengandalkan notifikasi otomatis di aplikasi Telegram. Kepraktisan ini memudahkan proses pencatatan log harian, mempercepat respons saat terjadi pengiriman data, serta meningkatkan keandalan operasional secara keseluruhan dengan biaya yang terjangkau.

VII. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang prototipe pemanen energi berbasis empat sensor piezoelektrik 55 mm terkonfigurasi seri yang mampu mengonversi getaran mekanis rel kereta api menjadi tegangan teratur 3,2 V–3,25 V via *boost converter* IC NE5532 untuk mengisi kapasitor penyuplai ESP32. Integrasi IoT berbasis Telegram Bot API mencatatkan tingkat keberhasilan pengiriman data telemetri sebesar 90,6% dengan latensi stabil 8,0–8,5 detik yang menyajikan status kereta, nilai tegangan, dan *timestamp* WIB secara *real-time*. Hasil ini membuktikan keandalan sistem sebagai solusi pemantauan infrastruktur perkeretaapian yang mandiri energi (*self-powered*) dan responsif untuk wilayah perlintasan terpencil (*off-grid*).

REFERENSI

- [1] D. Naufal, S. A. Kharami, S. M. Riano, dan H. Syakira, "Penghasil Energi Listrik Menggunakan Piezoelectric yang Memanfaatkan Hukum Konversi Energi," vol. 5, no. 1, hal. 621–637, 2026.
- [2] A. Kiswantono, "INOVASI ENERGI HIJAU: PIEZOELEKTRIK UNTUK MENGUBAH GETARAN KENDARAAN MENJADI LISTRIK," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 3, Agu 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4452.
- [3] L. P. Pratama, R. A. Herdiyansyah, dan M. Manfaluthy, "Rancang Bangun Prototipe Pemanen Energi Getaran pada Speed Bump Menggunakan Transducer Piezoelectric," *Med. Tek. J. Tek. Elektromedik Indones.*, vol. 3, no. 2, hal. 39–48, 2022, doi: 10.18196/mt.v3i2.14126.
- [4] S. S. Akhmad Ahfas, R Dwi Hadidjaja RS, "Procedia Of Social Sciences and Humanities ID CARD SEBAGAI CHARGER HP BERBASIS ENERGI Procedia Of Social Sciences and Humanities," vol. 0672, no. c, hal. 1467–1471, 2022.
- [5] Z. Arifin, M. Subito, R. Fauzi, dan A. Mustari, "UNTUK PENGISIAN ENERGI PADA HANDPHONE," vol. 15, no. 2, hal. 92–103, 2025.
- [6] K. Kusnandar, Ni Ketut Hariyawati Dharmi, dan Aisyah Nurul Khairiyah, "Rancang Bangun Purwarupa Energy Harvesting menggunakan Piezoelektrik sebagai Pembangkit Energi Listrik," *J. Tek. Media Pengemb. Ilmu dan Apl. Tek.*, vol. 20, no. 2, hal. 125–135, 2021, doi: 10.26874/jt.vol20no2.383.
- [7] A. D. Saputo, T. Mesin, F. Vokasi, dan U. N. Surabaya, "MESIN PRODUKSI TERHADAP OUTPUT ENERGI PADA," vol. 03, hal. 306–313, 2026.
- [8] A. M. Roziqin *et al.*, "Prototype of Power Sharing Automation System in 3 Phase Power Source Based on Internet of Things Prototype Sistem Otomasi Pembagi Daya Pada Sumber Listrik 3 Fasa Berbasis Internet of Things," *Procedia Eng. Life Sci.*, vol. 2, no. 2, 2022.
- [9] H. Purwadi, D. T. Maesaroh, dan P. N. Samarinda, "DETEKSI GERAK BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) MENGGUNAKAN SENSOR PIR DAN ESP32 DENGAN NOTIFIKASI TELEGRAM," vol. 14, no. 2.
- [10] B. S. Kusumaraga, S. Syahririni, D. Hadidjaja, dan I. Anshory, "Aquarium Water Quality Monitoring Based On Internet Of Things," *Procedia Eng. Life Sci.*, vol. 1, no. 2, 2021, doi: 10.21070/pels.v1i2.966.
- [11] M. A. N. KHASANAH, "PEMROGRAMAN ARDUINO UNO UNTUK MENAMPILKAN NILAI OUTPUT DARI SENSOR PIEZOELEKTRIK TERINTEGRASI MODUL I2C. D3 thesis, Politeknik Negeri Jakarta," *J. Eng. Res.*, 2023, [Daring]. Tersedia pada: <https://repository.pnj.ac.id/id/eprint/13423/1/Awal%2C%20BAB%201%2C%20BAB%205%2C%20Lampiran.pdf>
- [12] S. Syahririni dan D. Hadidjaja, "Aplikasi Alat Ukur Partikulat Dan Suhu Berbasis Iot," *Dinamik*, vol. 25, no. 1, hal. 1–9, 2020, doi: 10.35315/dinamik.v25i1.7512.
- [13] S. Nasional, T. Elektro, S. Informasi, dan T. Informatika, "Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika," *SNESTIK Semin. Nas. Tek. Elektro, Sist. Inf. dan Tek. Inform.*, hal. 219–224, 2021.
- [14] T. S. Winata, D. Hasminta, S. Maha, dan S. Lock, "Impression : Jurnal Teknologi dan Informasi Rancang Bangun Smart Lock Berbasis ESP32-CAM dengan Face," vol. 5, no. 3, 2026.
- [15] A. Al Ghazi, A. Ouslimani, dan A. E. Kasbari, "Advances in Interface Circuits for Self-Powered Piezoelectric Energy Harvesting Systems: A Comprehensive Review," *Sensors*, vol. 25, no. 13, 2025, doi: 10.3390/s25134029.
- [16] P. T. Wikantama dan R. Puspitasari, "Perancangan Perangkat Pengukur Ketinggian Banjir dengan ESP32 dan Telegram Berbasis IoT," *Elektrise J. Sains dan Teknol. Elektro*, vol. 13, no. 02, hal. 107–114, 2023, doi: 10.47709/elektrise.v13i02.3108.
- [17] S. Syahririni, M. Akmaludin, M. S. Mubarak, dan A. A. Anggorowati, "Optimization of DC Motor PID Control Using the Ziegler–Nichols Method with Encoder and Op-Amp (Lm324)," *Acad. Open*, vol. 10, no. 2, 2025, doi: 10.21070/acopen.10.2025.12875.
- [18] B. Control, P. U. Trichoderma, dan G. Conditions, "Table of Contents Table of Contents : بولطما داهشتسلا," vol. 27, no. 1, hal. 1–4, 2026, doi: 10.21070/ijins.v27i1.2074.
- [19] Fatimah dan Nuryaningsih, *Buku Ajar Buku Ajar*. 2018.
- [20] S. Syahririni, D. Hadidjaja, A. Ahfas, A. Rahmansyah, dan S. H. Pramono, "Design Measuring Instrument

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

- Dust Based Internet of Things,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 434, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/434/1/012218.
- [21] S. D. Ayuni, S. Syahririnni, dan J. Jamaaluddin, “Lapindo Embankment Security Monitoring System Based on IoT,” *Elinvo (Electronics, Informatics, Vocat. Educ.*, vol. 6, no. 1, hal. 40–48, 2021, doi: 10.21831/elinvo.v6i1.40429.
- [22] S. D. Ayuni, S. Syahririnni, dan J. Jamaaluddin, “Sosialisasi Aplikasi Monitoring Keamanan Tanggul Lapindo via Smartphone di Desa Gempolsari,” *J. Pengabd. Masy. Progresif Humanis Brainstorming*, vol. 5, no. 1, hal. 154–161, 2022, doi: 10.30591/japhb.v5i1.2717.
- [23] A. Ovid, Efri Yandani, dan Asril, “Prototype Sistem Pemantauan Tinggi Muka Air Berbasis Esp32 Untuk Sistem Pringatan Dini Banjir Melalui Telegram,” *JEKIN - J. Tek. Inform.*, vol. 5, no. 3, hal. 1081–1089, 2025, doi: 10.58794/jekin.v5i3.1634.
- [24] L. R. Fauzi dan I. Suharjo, “Prototipe Alat Deteksi Banjir Berbasis ESP32 , TinyML , dan Notifikasi,” vol. 8, no. 01, hal. 115–137, 2026.
- [25] G. R. Auwali, A. Ahfas, dan S. D. Ayuni, “Alat Kontrol dan Pengaman Sepeda Motor Menggunakan ESP 32 Cam Berbasis Telegram untuk Meminimalisasi Pencurian,” *MALCOM Indones. J. Mach. Learn. Comput. Sci.*, vol. 3, no. 2, hal. 219–229, 2023, doi: 10.57152/malcom.v3i2.923.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.