

SISTEM DATA LOGGER SHMS BERBASIS LVDT DENGAN KALMAN FILTER UNTUK PENGUKURAN DISPLACEMENT

Rika Novita Wardhani¹⁾, Sulis Setiowati¹⁾, Riandini¹⁾, Iwa Sudradjat¹⁾, Anis Rosyidah²⁾, Tohazen¹⁾, Andre Yulian Atmojo³⁾, Muhammad Fahriansyah¹⁾, Dante Gavriello Stevano¹⁾, Kessa Putra Anggalaksana¹⁾, Matheas Radian Nalendra Priwijaya¹⁾, Muhammad Syafiq Aziz¹⁾, Salsabila Sabarani¹⁾, Yulisa Betania Gultom¹⁾

¹⁾Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta

²⁾Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta

³⁾Badan Riset Inovasi Nasional

E-mail: rika.novitawardhani@elektro.pnj.ac.id

Abstract

This study presents the development of a prototype Structural Health Monitoring System (SHMS) aimed at measuring displacement in elastomeric bridge bearings using a Linear Variable Differential Transformer (LVDT) sensor integrated with a Kalman Filter. The system is designed to enable accurate, real-time, and reliable monitoring by mitigating signal noise commonly found in LVDT outputs. The prototype is composed of two primary components: a Data Acquisition Unit (DAQ) that reads displacement and transmits data via the MQTT protocol, and a Data Logger that processes the incoming signal using the Kalman Filter, stores it in CSV format, and displays real-time data through a web-based dashboard. The research methodology includes a literature review, mathematical modeling of the Kalman Filter, hardware design, and performance testing in a controlled laboratory environment. Experimental results demonstrate that a Kalman Filter configuration with parameters $Q=1e-5$ and $R=0.01$ significantly reduces measurement noise, yielding smoother displacement curves that closely align with micrometer reference data. The findings confirm the effectiveness of the system for monitoring structural displacement. The integration of LVDT sensors, IoT-based communication, and signal processing techniques in this prototype highlights its potential for practical implementation in infrastructure safety assessment.

Keyword : *Structural Health Monitoring System (SHMS), LVDT, Kalman Filter*

PENDAHULUAN

Jembatan merupakan bagian vital dari prasarana transportasi yang dirancang untuk menghubungkan dua wilayah yang terpisah oleh rintangan fisik, seperti sungai atau jurang. Berdasarkan Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan, jembatan diklasifikasikan sebagai infrastruktur strategis yang harus dijaga kondisi dan keberlanjutannya (Yoga Prima, 2025). Seiring penggunaan jangka panjang dan paparan beban dinamis seperti lalu lintas, kondisi fisik jembatan berpotensi mengalami penurunan performa. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan berkala guna menjamin keselamatan pengguna serta menjaga keberlanjutan fungsi layanan infrastruktur. Salah satu pendekatan yang kini banyak dikembangkan untuk menjawab tantangan tersebut adalah Structural Health Monitoring System (SHMS), yaitu sistem berbasis sensor yang

memungkinkan pemantauan kondisi struktur secara real-time. SHMS memberikan informasi diagnostik secara langsung sehingga tindakan korektif dapat dilakukan secara manual maupun otomatis (Juandra & Umi, 2021). Salah satu parameter penting yang dipantau dalam sistem ini adalah displacement pada bantalan elastomer. Bantalan tersebut berfungsi sebagai elemen fleksibel yang menyalurkan beban dan menahan gaya horizontal akibat pergerakan struktur. Komponen ini umumnya terbuat dari bahan karet alami, karet sintetis, atau karet vulkanisasi, dan perancangannya diatur melalui Surat Edaran Menteri PUPR No. 10/SE/M/2015. Perubahan displacement dan deformasi pada bantalan mencerminkan adanya perubahan kondisi struktur jembatan akibat pengaruh beban siklik.

Untuk mengukur displacement dengan tingkat presisi yang tinggi, digunakan sensor Linear Variable Differential Transformer (LVDT), yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik untuk mendeteksi pergeseran linier. Sensor ini terhubung langsung ke perangkat data logger yang berfungsi merekam, menyimpan, dan dalam beberapa kasus mengirimkan data secara real-time ke sistem berbasis web atau platform IoT. Sistem seperti ini memungkinkan integrasi dengan perangkat lunak analisis untuk mendukung evaluasi kondisi struktur secara menyeluruh (Salmon, 2024). Meski begitu, data yang dihasilkan sensor LVDT sangat rentan terhadap gangguan (noise) dari lingkungan sekitar maupun fluktuasi sinyal internal. Untuk itu, Kalman Filter digunakan sebagai metode penyaringan sinyal guna menghasilkan estimasi displacement yang lebih stabil dan akurat. Filter ini bekerja secara rekursif untuk memisahkan noise dari sinyal utama sehingga memberikan data yang lebih representatif terhadap kondisi aktual struktur. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe SHMS untuk memantau displacement pada bantalan elastomer jembatan secara akurat dan andal. Sistem yang dirancang memanfaatkan sensor LVDT, pemrosesan Kalman Filter, serta komunikasi protokol MQTT antara sensor dan Data Acquisition Unit (DAU). Data yang dihasilkan divisualisasikan dalam antarmuka berbasis web dan disimpan dalam format Comma Separated Values (CSV) untuk mendukung proses analisis data dan pengambilan keputusan terkait kondisi struktur jembatan.

METODE PENELITIAN

Pemantauan kondisi jembatan secara berkala menjadi kebutuhan penting mengingat banyaknya infrastruktur transportasi di Indonesia yang telah melampaui usia desain,

namun belum dilengkapi sistem monitoring otomatis. Berdasarkan data Direktorat Jenderal Bina Marga, sebagian besar jembatan di Indonesia masih dipantau secara visual dan manual, padahal potensi deformasi struktural akibat beban lalu lintas dan gempa dapat terjadi secara perlahan tanpa gejala kasat mata. Hal ini menunjukkan kebutuhan akan sistem Structural Health Monitoring System (SHMS) yang presisi, adaptif, dan real-time. Sensor Linear Variable Differential Transformer (LVDT) merupakan salah satu sensor displacement yang banyak digunakan karena sensitivitasnya yang tinggi terhadap pergeseran linier (Li, Li, & Yu, 2022). Penelitian Zhang et al. (2021) menggunakan LVDT untuk pemantauan jembatan baja dan menunjukkan akurasi tinggi dalam mendeteksi deformasi skala mikro. Namun demikian, sensor ini sangat sensitif terhadap noise eksternal seperti getaran atau fluktuasi elektromagnetik, sehingga pemrosesan sinyal tambahan menjadi penting.

Untuk mereduksi noise tersebut, Kalman Filter telah banyak diadopsi sebagai metode penyaringan sinyal berbasis estimasi linier optimal. Cai et al. (2018) membuktikan bahwa Kalman Filter mampu menurunkan fluktuasi data sensor hingga 60% dalam sistem navigasi berbasis MEMS. Dibandingkan metode lain seperti moving average atau low-pass filter, Kalman Filter unggul dalam fleksibilitas dan performa estimasi pada sistem dinamis (Pishgahi & Taghikhany, 2023). Seiring berkembangnya teknologi IoT, penelitian terkini juga mengintegrasikan modul komunikasi nirkabel seperti MQTT dalam sistem SHMS untuk mengurangi kompleksitas kabel dan meningkatkan efisiensi transmisi data. Al-Azzawi et al. (2023) merancang sistem pemantauan jembatan berbasis IoT dan berhasil mentransmisikan data displacement secara real-time dengan latensi rendah.

Namun demikian, sebagian besar studi sebelumnya hanya menguji sistem dalam konteks simulasi statis atau lingkungan laboratorium, tanpa integrasi menyeluruh antara sensor, filter, komunikasi MQTT, serta visualisasi data secara langsung. Gap ini menjadi ruang kontribusi penting dari penelitian ini, yaitu merancang dan mengevaluasi prototipe SHMS berbasis LVDT dengan Kalman Filter yang terintegrasi dengan MQTT dan antarmuka visual web untuk aplikasi pemantauan jembatan secara real-time.

1. Perancangan Sistem

Perancangan sistem pemantauan displacement dilakukan dengan pendekatan model matematis berbasis sistem keadaan konstan satu dimensi. Model ini digunakan untuk

memproses data sensor displacement dengan menerapkan algoritma Kalman Filter secara rekursif. Kalman Filter bekerja dalam tiga tahap utama, yaitu: **prediksi**, **perhitungan Kalman gain**, dan **koreksi**. Pada tahap **prediksi**, sistem memperkirakan nilai displacement berdasarkan estimasi sebelumnya dengan memperbarui kovarians error, menggunakan persamaan:

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1} P_k^- = P_{k-1} + Q$$

di mana Q merupakan kovarians noise proses. Selanjutnya, dilakukan **perhitungan Kalman gain** K_k , yang menentukan seberapa besar bobot pengaruh data sensor terhadap hasil estimasi. Kalman gain dihitung dengan rumus:

$$k_k = \frac{P_k^-}{P_k^- + R}$$

dengan R merupakan kovarians noise pengukuran. Nilai K_k akan semakin kecil jika nilai R besar, menunjukkan bahwa sistem lebih mempercayai hasil prediksi dibandingkan data sensor. Pada tahap akhir, yaitu **koreksi (update)**, nilai estimasi displacement diperbarui berdasarkan data aktual dari sensor z_k , menggunakan rumus:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + k_k (Z_k - \hat{x}_k^-) P_k = (1 - k_k) P_k^-$$

Keterangan :

\hat{x}_k : nilai estimasi hasil filter pada waktu ke- k

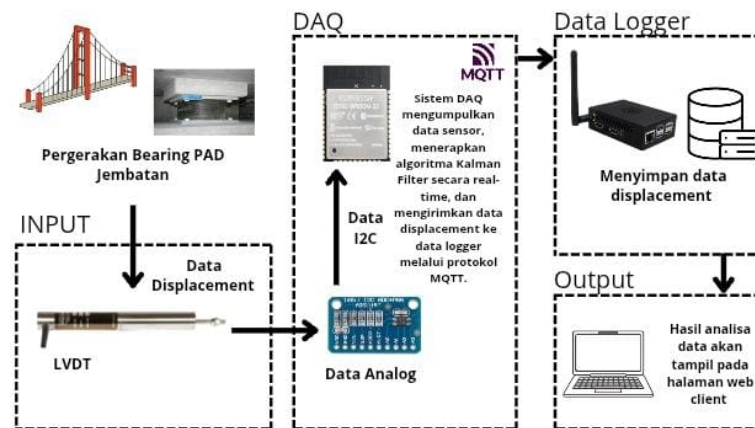
Z_k : data sensor

P_k : kovarians error

Q ; kovarians noise proses

Dengan pendekatan ini, Kalman Filter mampu mereduksi gangguan sinyal (noise) dan menghasilkan data displacement yang lebih stabil dan akurat. Model matematis tersebut diimplementasikan dalam bentuk prototipe sistem pemantauan displacement pada bantalan elastomer jembatan sebagai bagian dari Structural Health Monitoring System (SHMS). Sistem ini dirancang dengan mengintegrasikan sensor LVDT sebagai perangkat utama pengukuran displacement, modul mikrokontroler ESP32 sebagai pemroses dan pengirim data, serta modul komunikasi berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan protokol MQTT. Data displacement dikirimkan secara real-time dari unit akuisisi data ke server lokal yang menjalankan filtering Kalman, menyimpan data dalam

format CSV, serta menampilkannya melalui antarmuka web. Arsitektur ini mendukung pemantauan struktur secara kontinu dan adaptif terhadap perubahan kondisi lapangan.



Gambar 1. Arsitektur Sistem Data Logger SHMS Berbasis LVDT Dengan Kalman Filter

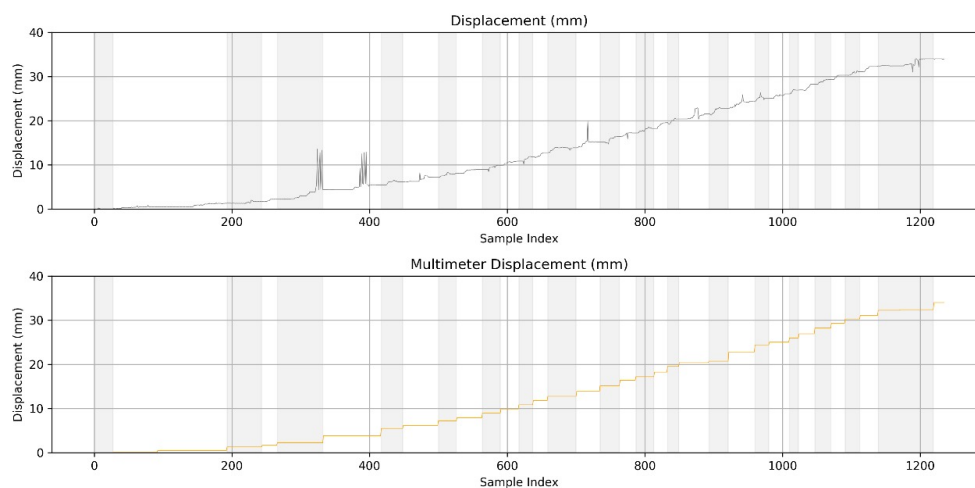
Sistem ini dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu: DAQ (Data Acquisition) dan Data logger sebagai tempat pemroses dan visualisasi data. Kedua bagian ini berkomunikasi menggunakan protokol MQTT agar ringan dan efisien. DAQ (Data Acquisition) menggunakan LVDT sebagai sensor displacement, sinyal analog LVDT dikonversi menjadi sinyal digital menggunakan ADS1115. Mikrokontroler ESP32 bertugas membaca data sensor, mencatat waktu dengan menggunakan RTC DS3231, Lalu mengirim data ke broker MQTT melalui koneksi WiFi. Selanjutnya, data dari ESP32 diterima oleh Data logger yang menjalankan MQTT broker dan pemrosesan Kalman Filter. Data kemudian disimpan dalam bentuk CSV dan divisualisasikan melalui dashboard web agar dapat dimonitor secara real-time. Dengan sistem ini, pengukuran displacement pada bantalan elastomer diharapkan dapat dilakukan secara akurat, real time, dan data tersimpan dengan baik sehingga dapat membantu pengambilan keputusan dalam pemantauan kesehatan jembatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian prototipe dilakukan di laboratorium instrumentasi dengan skenario pembacaan displacement menggunakan sensor LVDT, yang dibandingkan dengan nilai referensi dari mikrometer sekrup. Tegangan output dari sensor LVDT dikonversi ke satuan milimeter melalui proses scaling sehingga memungkinkan perbandingan

kuantitatif terhadap data referensi. Pengujian dilakukan dalam dua kondisi: tanpa filter dan dengan penerapan Kalman Filter.

Hasil akuisisi awal dari LVDT menunjukkan fluktuasi sinyal yang signifikan. Grafik displacement dari sensor LVDT memperlihatkan ketidakstabilan di sepanjang waktu pengukuran, khususnya pada awal dan pertengahan waktu akuisisi (Gambar 1). Hal ini disebabkan oleh sensitivitas tinggi LVDT terhadap gangguan eksternal seperti getaran mekanik dan noise listrik. Sebaliknya, pembacaan displacement dari mikrometer sekrup menunjukkan kurva bertingkat dan stabil, karena perangkat tersebut tidak merekam perubahan kecil atau fluktuatif secara real-time.



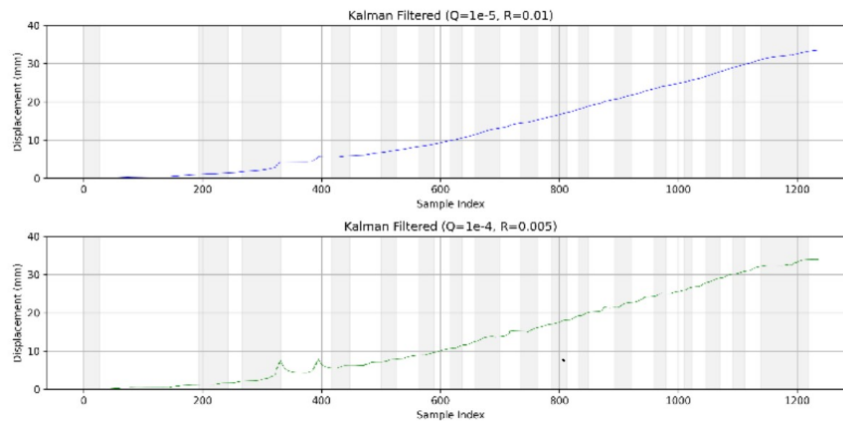
Gambar 2. Grafik Hasil Perbandingan DAQ dengan Multimeter Sekrup

Hasil ini mengonfirmasi bahwa meskipun LVDT memiliki resolusi tinggi, data mentahnya tidak dapat langsung digunakan untuk analisis struktural tanpa proses pemurnian sinyal. Ketergantungan terhadap noise inilah yang menjadi salah satu gap dalam studi-studi terdahulu, di mana sistem monitoring berbasis sensor sensitif tidak dibarengi dengan manajemen sinyal yang memadai.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, Kalman Filter diterapkan pada data LVDT dengan dua konfigurasi parameter berbeda:

- Konfigurasi 1: $Q = 1 \times 10^{-5}$, $R = 0,01$
- Konfigurasi 2: $Q = 1 \times 10^{-4}$, $R = 0,005$

Gambar 2 menunjukkan bahwa penerapan Kalman Filter dengan Konfigurasi 1 menghasilkan grafik displacement yang lebih halus dan selaras dengan tren data dari mikrometer. Penyaringan ini mampu mereduksi fluktuasi liar dari sinyal asli dan mempertahankan integritas data displacement.



Gambar 3. Data yang Sudah Diproses dengan Kalman Filter

Sementara itu, Konfigurasi 2 masih menunjukkan hasil yang cukup baik dalam peredaman noise, namun terdapat lonjakan tajam di fase awal akuisisi. Hal ini menunjukkan bahwa nilai QQ yang terlalu besar menyebabkan sistem terlalu responsif terhadap perubahan, bahkan ketika perubahan tersebut merupakan noise. Oleh karena itu, pemilihan parameter Kalman yang tepat menjadi sangat penting untuk menghasilkan data displacement yang akurat dan stabil.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem SHMS berbasis LVDT tanpa filter memiliki keterbatasan signifikan dari sisi keandalan data. Namun, ketika dipadukan dengan Kalman Filter dan konfigurasi parameter yang tepat, sistem mampu menyajikan informasi displacement yang akurat dan konsisten. Hasil ini menjawab gap yang telah diidentifikasi pada bagian state of the art, yakni belum adanya pendekatan komprehensif yang menggabungkan sensor displacement presisi tinggi dengan metode filtering adaptif dan komunikasi IoT berbasis MQTT dalam satu sistem terintegrasi. Dengan visualisasi data real-time melalui dashboard web serta penyimpanan dalam format CSV, prototipe ini tidak hanya memungkinkan pemantauan struktural secara lokal, tetapi juga siap untuk implementasi skala luas dalam konteks infrastruktur publik di Indonesia. Sistem ini memberikan kontribusi nyata terhadap upaya digitalisasi sistem pemeliharaan infrastruktur nasional, terutama jembatan.

SIMPULAN

Kalman Filter terbukti efektif dalam mengurangi noise pada pembacaan displacement sensor LVDT. Dari hasil visualisasi, konfigurasi Kalman dengan parameter $Q=1e-5$ dan $R=0.01$ menghasilkan kurva yang paling halus dan konsisten, sangat

mendekati data acuan dari multimeter. Filter dengan parameter $Q=1e-4$ dan $R=0.005$ juga mampu meredam noise, namun masih menunjukkan sedikit lonjakan dan fluktuasi yang mengindikasikan sensitivitas berlebih terhadap perubahan mendadak. Meskipun demikian, hasilnya tetap lebih baik dibandingkan pembacaan LVDT tanpa filter. Secara keseluruhan, penerapan filter seperti Kalman sangat penting dalam sistem SHMS untuk memastikan data displacement yang akurat dan andal. Data yang telah difilter membantu mendeteksi perubahan struktural dengan lebih tepat dan mengurangi risiko interpretasi yang salah akibat gangguan noise.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Azzawi, M., Al-Khafaji, F., & Hussein, H. (2023). Real-time bridge monitoring using IoT and MQTT protocol. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 13(1), 91–104. <https://doi.org/10.1007/s13349-022-00583-2>
- Cai, S., Hu, Y., Ding, H., & Chen, H. (2018). A noise reduction method for MEMS gyroscope based on direct modeling and Kalman filter. *IFAC PapersOnLine*, 51(31), 172–176. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.032>
- Hartono, J., & Khoiroh, U. (2021). Evaluasi rencana pemasangan sensor struktur monitoring untuk jembatan bentang panjang: Studi kasus Jembatan Teluk Kendari. *Jurnal Manajer Pendidikan dan Teknologi*, 16(2), 549–558.
- Li, J., Li, Y., & Yu, M. (2022). Advances in displacement sensors for structural health monitoring: A comprehensive review. *Sensors*, 22(4), 1453. <https://doi.org/10.3390/s22041453>
- Pishgahi, F., & Taghikhany, T. (2023). Mechanical model for seismic nonlinear behaviour of rubber bearings with end-rotation in highway bridges. *Structures*, 47, 875–890. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.046>
- Rumbyarso, Y. P. A. (2025). Buku referensi struktur jembatan: Analisis dan aplikasi. Bandung: Widina Media Utama.
- Salmon, S., Ahniar, N. H., & Nurdinawati, V. (2024). Design of a data logger with WEB-based storage. *Electromedic: Journal of Medical Electronic Multidisciplinary*, Published June 28, 2024. <https://doi.org/XXXX>
- Wardhani, R. N., Setiowati, S., Riandini, R., Santoso, B., Fadilla, N., Zain, A. D., Ismail, I., Hidayat, T., Mudzakir, S. P. N., & Atmojo, A. Y. (2023). Pengujian dinamis impuls awal vertikal SW23 sebagai pengukur frekuensi jembatan tol. *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV)*, Vol. 9, No. 1, 159–167. ISAS Publishing.
- Zhang, Y., Wang, X., Liu, H., & Xu, Q. (2021). Field monitoring of bridge displacement using LVDT sensors and deep signal denoising. *Smart Structures and Systems*, 28(5), 697–709. <https://doi.org/10.12989/sss.2021.28.5.697>