



ABSTRACT

Development of a Cost-Effective Digital Turbine Flowmeter with Kalman Filtering

By

Farhan Adam Assidiqi

20/457748/PA/19786

This study outlines the development of a cost-effective digital turbine flowmeter system that employs a discrete Kalman filtering algorithm to achieve accurate water flow measurements within a budget-constrained residential and industrial environment. The system integrates a YF-DN50 Hall-effect turbine sensor with a dual-core ESP32 Microcontroller to carry out real-time volumetric flow acquisition, implement embedded signal filtering, and enable cloud-synchronized monitoring, all while maintaining a total system cost of under IDR 1,000,000 (~USD 61), hence affordable and yet accurate and effective.

The system's architecture is based on an interrupt-driven pulse counting mechanism to capture turbine motor revolutions with high temporal resolution via the Hall-effect sensor. The Kalman filtering algorithm is deployed by processing the captured pulse signals with an estimation from the time-discrete Kalman framework to yield optimal state predictions of the instantaneous flow rate; minimizing Gaussian noise, correcting dynamic bias caused by hydraulic turbulence, and mitigating sensor nonlinearity and electrical interference. The data is then encoded in JSON and transmitted over HTTPS using the microcontroller's Wi-Fi feature to a Firestore backend for web-based telemetry storage, while also supporting local real-time monitoring via an LCD interface.

The system's firmware is modular by design, using an object-oriented approach in C++ that encompasses components for sensor drivers, pulse handling, timestamp synchronization, and fault-tolerant I/O routines and logging to enhance system robustness.

The result of this work is seen through a validation testing method using a reference gravimetric closed-loop water circulation rig calibrated by ISO 4185:1980 (static weighing). At 50, 100, and 150 L/min, the Kalman-filtered data stream achieved a mean absolute error within $\pm 5\%$ versus the mass reference and reduced standard deviation by up to 43.8% relative to unfiltered data. Linear regression yielded coefficients of determination exceeding $R^2 = 0.999998$, indicating negligible nonlinearity across the tested range.

Keyword: Digital Turbine Flowmeter, Kalman Filtering, ESP32 Microcontroller, IoT-Based Monitoring, Calibration, Low-Cost Real-Time Flow Measurement, Precision Instrumentation.



INTISARI

PENGEMBANGAN SISTEM FLOWMETER TURBIN DIGITAL BERBIAYA EFISIEN DENGAN IMPLEMENTASI PENYARINGAN KALMAN

By

Farhan Adam Assidiqi

20/457748/PA/19786

Penelitian ini menguraikan pengembangan sistem flowmeter turbin digital berbiaya rendah yang menerapkan algoritma penyaringan Kalman waktu-diskret untuk mencapai pengukuran laju aliran air yang akurat pada lingkungan residensial dan industri dengan keterbatasan anggaran. Sistem ini mengintegrasikan sensor turbin Hall-effect YF-DN50 dengan mikrokontroler ESP32 dual-core untuk melakukan akuisisi laju aliran volumetrik secara waktu nyata, menerapkan penyaringan sinyal tertanam, dan memungkinkan pemantauan tersinkronisasi ke cloud, dengan total biaya sistem tetap di bawah Rp1.000.000 (~USD 61), sehingga terjangkau namun tetap akurat dan efektif.

Arsitektur sistem didasarkan pada mekanisme pencacahan pulsa berbasis interupsi untuk menangkap putaran turbin dengan resolusi temporal tinggi melalui sensor Hall-effect. Algoritma penyaringan Kalman diterapkan dengan memproses sinyal pulsa yang ditangkap menggunakan kerangka Kalman waktu-diskret untuk menghasilkan prediksi keadaan optimal atas laju aliran sesaat; meminimalkan noise Gaussian, mengoreksi bias dinamis akibat turbulensi hidraulik, dan mengurangi pengaruh nonlinieritas sensor serta interferensi listrik. Data kemudian dikodekan dalam JSON dan dikirim melalui HTTPS menggunakan fitur Wi-Fi mikrokontroler ke backend Firestore untuk penyimpanan telemetri berbasis web, sekaligus mendukung pemantauan lokal waktu nyata melalui antarmuka LCD.

Perangkat tegar (firmware) sistem dirancang modular dengan pendekatan berorientasi objek dalam C++ yang mencakup komponen untuk driver sensor, penanganan pulsa, sinkronisasi penanda waktu (timestamp), serta rutin I/O tahan-galat dan pencatatan (logging) guna meningkatkan ketangguhan sistem.

Hasil karya ini divalidasi melalui pengujian menggunakan rig sirkulasi air loop tertutup berbasis gravimetri sebagai referensi yang dikalibrasi menurut ISO 4185:1980 (penimbangan statis). Pada 50, 100, dan 150 L/menit, aliran data yang telah difilter Kalman mencapai galat absolut rata-rata dalam $\pm 5\%$ terhadap referensi massa dan menurunkan simpangan baku hingga 43,8% dibanding data tanpa filter. Regresi linier menghasilkan koefisien determinasi melebihi $R^2 = 0,999998$, yang menunjukkan nonlinieritas dapat diabaikan pada seluruh rentang pengujian.

Kata Kunci: Flowmeter Turbin Digital, Penyaringan Kalman, Mikrokontroler ESP32, Pemantauan Berbasis IoT, Kalibrasi, Pengukuran Laju Aliran Waktu Nyata Berbiaya Rendah, Instrumentasi Presisi.