UNIVERSITAS
GADJAH MADA
OPTIMASI SISTEM KLASIFIKASI REAL-TIME KONDISI RODA GIGI KONVEYOR PADA FPGA BERDAYA RENDAH BERBASIS SISTEM INFERENSI FUZZY INTEGER
Ahmad Sabiq, Prof. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc., Ph.D., IPU, ASEAN Eng.; Dr. Andi Dharmawan, S.Si., M.Cs.; Dr. En
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

INTISARI

Konveyor merupakan salah satu komponen kunci dalam sistem produksi industri untuk memindahkan material dari satu titik ke titik lain. Gangguan pada komponen kritis, khususnya roda gigi, dapat menyebabkan *downtime* tak terencana yang berdampak pada penurunan produktivitas dan peningkatan biaya pemeliharaan. Salah satu pendekatan yang efektif untuk menilai kondisi roda gigi adalah melalui pengukuran dan analisis sinyal getaran. Dalam konteks komputasi tepi (*edge computing*), dibutuhkan solusi pemrosesan yang berdaya rendah namun mampu melakukan klasifikasi kondisi secara waktu nyata, tanpa bergantung pada prosesor host yang bertenaga besar.

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental berbasis perancangan sistem pada FPGA berdaya rendah. Tahap penelitian meliputi pengumpulan data getaran roda gigi konveyor pada tiga kondisi, validasi akuisisi dan karakterisasi noise, ekstraksi fitur domain waktu berbasis bilangan bulat, serta pemilihan fitur menggunakan koefisien korelasi Pearson. Berdasarkan fitur terpilih, dirancang model *Fuzzy Inference System* (FIS) berbasis data dengan penentuan himpunan dan fungsi keanggotaan, perumusan aturan inferensi, serta defuzzifikasi *center-of-sum*. Model FIS selanjutnya dikuantisasi ke dalam dua konfigurasi, yaitu 8-bit dan 4-bit, kemudian dipetakan ke arsitektur FPGA Lattice iCE40 HX8K dan dievaluasi dari sisi kinerja klasifikasi, penggunaan sumber daya logika, konsumsi daya, dan latensi, dengan penetapan ambang keputusan yang memprioritaskan *Recall* pada kelas kondisi paling parah.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem inferensi fuzzy berbasis bilangan bulat yang dirancang mampu memberikan kinerja klasifikasi yang baik untuk tiga kondisi roda gigi dalam kerangka orientasi keselamatan yang memprioritaskan deteksi kondisi Rusak dan Terkikis. Konfigurasi 8-bit mencapai Recall kelas Rusak sebesar 97%, sedangkan konfigurasi 4-bit turun tipis menjadi 96%, sehingga penurunan akibat kuantisasi hanya sekitar satu poin persentase dan metrik *Recall* keseluruhan, *Precision*, serta *F1-Score* tetap relatif stabil. Di sisi lain, kuantisasi 4-bit memberikan keuntungan implementasi yang nyata dengan menurunkan penggunaan logika dari 5.105 LC (66%) menjadi 3.550 LC (46%), serta menekan konsumsi daya hingga sekitar 19% pada skenario kontinu sebagai batas atas, tanpa menghilangkan sifat keputusan yang deterministik dengan latensi komputasi *on-chip* sebesar 2,71 µs setelah akhir window fitur. Temuan ini menegaskan bahwa konfigurasi 8-bit lebih unggul untuk prioritas deteksi kerusakan paling parah, sedangkan konfigurasi FIS 4-bit merupakan hasil optimasi yang menguntungkan antara kinerja diagnosis, efisiensi sumber daya FPGA, efisiensi energi, dan pemenuhan kebutuhan waktu nyata pada perangkat tepi berdaya rendah.

Kata kunci: *FPGA berdaya rendah, perangkat tepi, Fuzzy Inference System integer, fitur domain waktu, getaran, roda gigi konveyor*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
OPTIMASI SISTEM KLASIFIKASI REAL-TIME KONDISI RODA GIGI KONVEYOR PADA FPGA BERDAYA RENDAH BERBASIS SISTEM INFERENSI FUZZY INTEGER
Ahmad Sabiq, Prof. Ir. Jazi Eko Istiyanto, M.Sc., Ph.D., IPU, ASEAN Eng.; Dr. Andi Dharmawan, S.Si., M.Cs.; Dr. En
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

Conveyor systems are key components in industrial production lines for transporting materials between processing stages. Failures in critical components, particularly gear wheels, can cause unplanned downtime, reduced productivity, and increased maintenance costs. One effective way to assess gear condition is through measurement and analysis of vibration signals. In an edge-computing context, there is a need for low-power processing solutions that can perform real-time condition classification without relying on high-performance host processors.

This study employed an experimental system-design approach on a low-power FPGA platform. The research stages included vibration data acquisition under three gear conditions, acquisition validation and noise characterization, integer-based time-domain feature extraction, and feature selection using the Pearson correlation coefficient. Based on the selected features, a data-driven Fuzzy Inference System (FIS) was designed, including the definition of fuzzy sets and membership functions, inference rule formulation, and center-of-sum defuzzification. The FIS model was then quantized into two configurations, namely 8-bit and 4-bit, mapped onto a Lattice iCE40 HX8K FPGA architecture, and evaluated in terms of classification performance, logic resource utilization, power consumption, and latency, using a decision-threshold strategy that prioritizes Recall for the most severe fault class.

The results show that the proposed integer-based fuzzy inference system achieved good classification performance for three gear conditions within a safety-oriented framework that prioritizes the detection of Damaged and Scoring states. The 8-bit configuration achieved a Recall of 97% for the Damaged class, while the 4-bit configuration decreased only slightly to 96%, indicating that quantization caused only about a one-percentage-point reduction while overall Recall, Precision, and F1-Score remained relatively stable. On the hardware side, the 4-bit quantization provided a clear implementation benefit by reducing logic utilization from 5,105 LC (66%) to 3,550 LC (46%), while also lowering power consumption by up to about 19% in the continuous-operation upper-bound scenario, without sacrificing deterministic decision behavior with a latency of approximately 2.71 µs. These findings confirm that the 8-bit configuration is superior when prioritizing the detection of the most severe fault condition, whereas the 4-bit FIS configuration represents a favorable optimization trade-off among diagnostic performance, FPGA resource efficiency, energy efficiency, and real-time requirements for low-power edge devices.

Keywords: *low-power FPGA, edge device, integer fuzzy inference system, time-domain features, vibration, conveyor gear wheels.*