



PERANCANGAN SISTEM IDENTIFIKASI JENIS PASIR (HALUS-KASAR) BERBASIS SENSOR MPU6050 DENGAN FAST FOURIER TRANSFORM (FFT) DAN RULE-BASED THRESHOLD SERTA DASHBOARD IOT

Yuni Sarah Siregar¹, Fatma Sari Hutagalung²

Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi,
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

E-mail: luhutan17@gmail.com

ABSTRAK

Pasir merupakan salah satu material dasar yang sangat penting dalam industri konstruksi, karena menempati sekitar 70% volume campuran mortar atau beton dan berpengaruh langsung terhadap workabilitas, kepadatan, serta kekuatan tekan struktur. Namun, proses identifikasi jenis pasir (halus dan kasar) yang umum digunakan saat ini, yaitu analisis saringan (sieve analysis), masih bersifat manual, memerlukan waktu lama, dan rentan terhadap subjektivitas operator. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji sebuah sistem identifikasi jenis pasir secara otomatis berbasis sensor getaran MPU6050 yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32. Sinyal getaran yang dihasilkan dari interaksi butiran pasir diolah menggunakan metode Fast Fourier Transform (FFT) untuk mengekstraksi fitur frekuensi puncak (f_{peak}) dan energi spektral total (E_{total}), yang selanjutnya diklasifikasikan menggunakan algoritma Rule-Based Threshold ke dalam kategori pasir halus dan pasir kasar. Hasil klasifikasi serta data pengukuran ditampilkan secara real-time melalui dashboard Internet of Things (IoT) berbasis Grafana yang terhubung dengan basis data MySQL. Pengujian sistem terhadap 60 sampel pasir menunjukkan tingkat accuracy sebesar 91,7%, precision sebesar 90,3%, dan recall sebesar 93,3%, dengan rata-rata waktu respons sistem sebesar 1,42 detik per siklus identifikasi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu melakukan identifikasi jenis pasir secara otomatis, cepat, dan akurat, sehingga berpotensi digunakan sebagai alternatif metode sieve analysis konvensional.

Kata kunci: MPU6050, Fast Fourier Transform, Rule-Based Threshold, identifikasi jenis pasir, dashboard IoT

ABSTRACT

Article History

Received: September 2026

Reviewed: September 2026

Published: September 2026

Plagiarism Checker

No

237.u873247.fh8374

Copyright :

Author Publish

by : Kohesi



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Sand is a fundamental material in the construction industry, accounting for approximately 70% of the volume in mortar or concrete mixtures and directly affecting the workability, density, and compressive strength of the resulting structure. However, the conventional method commonly used to identify sand type (fine or coarse), namely sieve analysis, remains manual, time-consuming, and prone to operator subjectivity. This study aims to design, implement, and test an automatic sand-type identification system based on an MPU6050 vibration sensor integrated with an ESP32 microcontroller. The vibration signal generated by the interaction of sand particles is processed using the Fast Fourier Transform (FFT) method to extract peak frequency (f_{peak}) and total spectral energy (E_{total}) features, which are then classified into fine and coarse sand categories using a Rule-Based Threshold algorithm. The classification results and measurement data are displayed in real time through a Grafana-based Internet of Things (IoT) dashboard connected to a MySQL database. System testing on 60 sand samples achieved an accuracy of 91.7%, a precision of 90.3%, and a recall of 93.3%, with an average system response time of 1.42 seconds per identification cycle. These results indicate that the developed system is capable of performing sand-type identification automatically, quickly, and accurately, making it a potential alternative to the conventional sieve analysis method.

Keywords: MPU6050, Fast Fourier Transform, Rule-Based Threshold, sand type identification, IoT dashboard

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur fisik yang masif di Indonesia menuntut standar kualitas material yang ketat untuk menjamin keamanan dan ketahanan struktur dalam jangka panjang. Salah satu komponen paling fundamental dalam konstruksi adalah pasir atau agregat halus, yang menempati sekitar 70% volume dari campuran mortar atau beton dan menentukan workabilitas, kepadatan, serta kekuatan tekan akhir struktur. Standar Nasional Indonesia (SNI) dan ASTM menetapkan bahwa pasir harus memiliki gradasi butiran yang baik, yang secara teknis dibagi ke dalam kategori halus dan kasar berdasarkan Modulus Halus Butir (MHB) dan zona distribusi ukuran lubang ayakan [1].

Masalah utama yang dihadapi industri konstruksi saat ini adalah proses identifikasi jenis pasir yang masih bergantung pada metode manual. Analisis saringan (sieve analysis) sebagai standar baku laboratorium memerlukan waktu lama, peralatan statis, dan intervensi manusia yang tinggi pada setiap tahap penimbangan dan perhitungan persentase kumulatif. Pada lokasi proyek yang dinamis atau pabrik beton ready-mix, keterlambatan mengetahui kualitas gradasi pasir dapat menyebabkan kesalahan komposisi campuran, sementara penilaian visual oleh



operator seringkali bersifat subjektif dan tidak akurat dalam membedakan batas transisi antara pasir halus dan kasar.

Sensor Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) seperti akselerometer MPU6050 menawarkan peluang untuk mendeteksi getaran mekanis yang dihasilkan oleh interaksi butiran pasir. Setiap ukuran butiran granular memiliki karakteristik mekanis, massa, dan gaya gesek yang berbeda ketika diberi gaya eksitasi getar: butiran pasir kasar cenderung menghasilkan impuls beramplitudo tinggi pada frekuensi rendah, sedangkan pasir halus menghasilkan distribusi energi getaran yang lebih redam dengan tanda frekuensi yang unik pada domain frekuensi lebih tinggi. Algoritma Fast Fourier Transform (FFT) digunakan untuk mengubah sinyal getaran domain waktu menjadi representasi domain frekuensi, sehingga fitur spektral seperti frekuensi dominan dan energi spektral dapat diekstraksi sebagai “sidik jari” getaran masing-masing jenis pasir. Untuk menjaga efisiensi komputasi pada mikrokontroler ESP32 yang memiliki keterbatasan sumber daya, algoritma Rule-Based Threshold dipilih sebagai mesin pengambilan keputusan karena lebih ringan dan transparan dibandingkan model pembelajaran mesin yang kompleks, sehingga ideal untuk sistem tertanam yang membutuhkan respons real-time [2].

Pendekatan berbasis sensor getar dan pengolahan sinyal telah banyak dieksplorasi pada domain lain, misalnya pemantauan getaran pada proses pencetakan 3D untuk kendali kualitas permukaan [5], klasifikasi sinyal getaran untuk diagnosis kerusakan bearing menggunakan CNN [9], serta sistem pemeliharaan prediktif berbasis TinyML pada ESP32 [10]. Di sisi lain, integrasi sensor getar dengan mikrokontroler dan dashboard IoT telah terbukti efektif untuk pemantauan kondisi mesin secara real-time [6][7][8]. Namun demikian, penerapan kombinasi sensor getar, FFT, dan rule-based threshold secara khusus untuk klasifikasi material granular konstruksi seperti pasir masih jarang dibahas, sehingga menjadi celah yang diisi oleh penelitian ini.

Selain aspek identifikasi, aspek pemantauan juga menjadi kebutuhan vital pada era industri 4.0. Integrasi Internet of Things (IoT) memungkinkan data klasifikasi pasir dikirim secara nirkabel dan divisualisasikan melalui dashboard interaktif berbasis Grafana yang terhubung dengan basis data MySQL, sehingga manajer proyek atau teknisi laboratorium dapat memantau kualitas material dari jarak jauh, menganalisis data historis, dan menerima peringatan otomatis apabila ditemukan material yang tidak sesuai spesifikasi.

1.1 Research Gap dan Kontribusi

Berdasarkan kajian penelitian terdahulu, terdapat celah penelitian: penelitian mengenai deteksi getaran mesin sudah cukup luas, namun mayoritas berfokus pada deteksi kerusakan mesin (fault detection) atau pengukuran intensitas guncangan tanah, bukan pada identifikasi sifat intrinsik material seperti ukuran butir pasir. Banyak sistem klasifikasi getaran juga menggunakan model deep learning yang meskipun akurat, memerlukan sumber daya komputasi tinggi dan sulit diimplementasikan pada perangkat IoT murah untuk penggunaan massal di lapangan [9]. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengusulkan sistem klasifikasi yang ringan namun andal menggunakan algoritma rule-based pada platform ESP32, dikhususkan untuk standardisasi agregat halus di Indonesia, sekaligus mengintegrasikan seluruh alur mulai dari akuisisi sinyal, klasifikasi, hingga pemantauan berbasis dashboard IoT dalam satu sistem yang utuh.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) merancang dan membangun perangkat keras identifikasi jenis pasir berbasis sensor MPU6050 yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32; (2) mengimplementasikan algoritma Fast Fourier Transform (FFT) pada ESP32 untuk mengekstraksi fitur frekuensi puncak dan energi spektral dari sinyal getaran; (3) menerapkan algoritma Rule-Based Threshold untuk mengklasifikasikan jenis pasir ke dalam kategori halus dan kasar; serta (4) mengintegrasikan sistem dengan dashboard IoT agar hasil pengukuran dan status klasifikasi dapat dipantau secara real-time.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Pendekatan dan Tahapan Penelitian

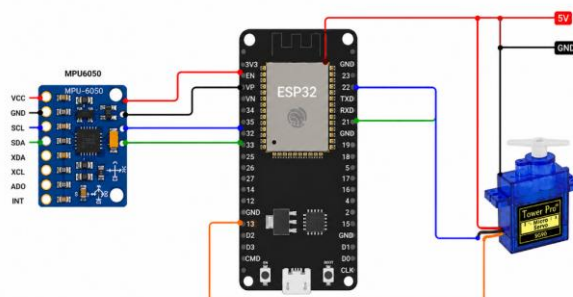
Penelitian menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium dengan model pengembangan Research and Development (R&D), karena fokus utama penelitian adalah pengembangan artefak teknologi yang mampu melakukan klasifikasi material granular secara otomatis. Tahapan penelitian disusun mengikuti siklus pengembangan sistem sensor sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tahap	Aktivitas
Analisis	Identifikasi karakteristik spektral pasir berdasarkan standar SNI dan penentuan kebutuhan perangkat keras
Perancangan	Mendesain mekanik shaker table, sirkuit elektronik ESP32-MPU6050, dan arsitektur database IoT
Implementasi	Penulisan kode program FFT dan algoritma rule-based pada firmware serta konfigurasi dashboard
Pengujian	Validasi akurasi menggunakan confusion matrix dan pengujian keandalan sistem

Tabel 1. Tahapan penelitian dan pengembangan sistem

2.2 Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras dirancang untuk menangkap sinyal getaran dari material pasir, memproses data tersebut, serta mengirimkan hasil analisis ke sistem monitoring berbasis IoT. Sensor getaran MPU6050 merupakan sensor Inertial Measurement Unit (IMU) yang mengintegrasikan accelerometer dan gyroscope tiga sumbu dalam satu chip. Mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai pusat pengolahan data untuk akuisisi sinyal, perhitungan FFT, klasifikasi rule-based, serta pengiriman data secara nirkabel ke dashboard. Servo SG90 difungsikan sebagai mekanisme pintu penjatuh sampel pasir menuju plat sensor pada shaker table, sehingga jumlah pasir yang dijatuhkan pada setiap pengujian relatif seragam.



Gambar 1. Rangkaian sensor MPU6050, mikrokontroler ESP32, dan servo SG90

Komponen	Pin Komponen	Pin ESP32
MPU6050	VCC	3V3
MPU6050	GND	GND
MPU6050	SCL	GPIO 22
MPU6050	SDA	GPIO 21
Servo SG90	VCC (merah)	5V
Servo SG90	GND (coklat)	GND
Servo SG90	Signal (oranye)	GPIO 13

Tabel 2. Konfigurasi pin ESP32 dan koneksi perangkat

2.3 Pengolahan Sinyal (Windowing dan FFT)

ESP32 melakukan akuisisi data pada sumbu Z dengan frekuensi sampling (f_s) 1000 Hz, disimpan dalam larik berukuran $N = 1024$ sampel agar optimal untuk komputasi FFT. Sebelum ditransformasikan, sinyal terlebih dahulu melalui tahap preprocessing berupa penghilangan DC offset dan penerapan fungsi jendela Hamming $w(n) = 0,54 - 0,46 \cos(2\pi n/(N-1))$ untuk mengurangi kebocoran spektral (spectral leakage) akibat diskontinuitas pada tepi blok data. Sinyal kemudian ditransformasikan dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan algoritma FFT dengan frekuensi Nyquist 500 Hz dan resolusi bin sekitar 0,97 Hz per unit frekuensi, menghasilkan nilai magnitudo spektral $|X(k)|$ untuk setiap bin frekuensi k . Dari spektrum tersebut diekstraksi dua fitur utama, yaitu frekuensi puncak (f_{peak}) dan energi spektral total (E_{total}), yang merepresentasikan karakteristik getaran material pasir yang diuji.

2.4 Klasifikasi Rule-Based Threshold

Klasifikasi jenis pasir dilakukan menggunakan pendekatan rule-based threshold, yaitu teknik klasifikasi sederhana yang membandingkan nilai fitur hasil ekstraksi FFT dengan nilai ambang batas (threshold) yang telah ditentukan melalui kalibrasi awal menggunakan 30 sampel latih untuk masing-masing kategori. Metode ini dipilih karena kompleksitasnya rendah, mudah diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32, serta mampu memberikan hasil klasifikasi secara cepat tanpa komputasi berat. Struktur aturan yang diterapkan adalah sebagai berikut: (1) jika $f_{\text{peak}} < 85$ Hz dan $E_{\text{total}} > \text{Threshold_Coarse}$ maka status = “Kasar”; (2) jika $f_{\text{peak}} > 160$ Hz dan $E_{\text{total}} < \text{Threshold_Fine}$ maka status = “Halus”. Proses klasifikasi dilakukan langsung pada ESP32 setelah proses FFT dan ekstraksi fitur selesai, dan hasilnya dikirimkan ke sistem monitoring IoT.

2.5 Arsitektur IoT dan Dashboard

Data hasil klasifikasi dikirim oleh ESP32 melalui protokol HTTP POST ke skrip PHP yang menjembatani penyimpanan ke basis data MySQL (Tabel 3), lalu divisualisasikan pada dashboard berbasis Grafana dalam bentuk grafik time-series untuk memantau perubahan intensitas getaran terhadap waktu, serta bar gauge untuk menampilkan distribusi frekuensi terakhir guna memverifikasi ada tidaknya anomali pada material.

Kolom	Tipe Data	Deskripsi
id_log	INT (AI)	Primary key

Kolom	Tipe Data	Deskripsi
timestamp	DATETIME	Waktu pengambilan data
peak_freq	FLOAT	Frekuensi dominan hasil FFT
energy	FLOAT	Total magnitudo spektral

Tabel 3. Struktur tabel basis data

2.6 Metode Pengujian dan Validasi

Pengujian sistem menggunakan 60 sampel pasir (30 pasir halus dan 30 pasir kasar) yang telah diklasifikasikan menggunakan metode sieve analysis mengacu pada SNI ASTM C136:2012 sebagai ground truth, dengan pasir halus pada rentang Modulus Halus Butir (MHB) 1,50-2,60 (Zona 3) dan pasir kasar pada rentang MHB 3,01-3,80 (Zona 1). Sebelum pengujian, pasir dicuci untuk menghilangkan kadar lumpur (maksimal 5% sesuai SNI 03-4142-1996) dan dikeringkan dalam oven pada suhu $110 \pm 5^\circ\text{C}$ selama 24 jam. Evaluasi performa klasifikasi dilakukan menggunakan confusion matrix untuk memperoleh nilai accuracy, precision, dan recall, sedangkan performa real-time diukur dari total durasi mulai sampling data hingga hasil klasifikasi tampil pada dashboard, dengan target performansi di bawah 2 detik per siklus identifikasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Sistem

Implementasi sistem dilakukan dengan merakit seluruh komponen perangkat keras pada satu unit alat uji, meliputi mikrokontroler ESP32, sensor MPU6050, servo SG90, expansion board ESP32 sebagai base plate, serta meja penggetar (shaker table) yang menghasilkan rangsangan getaran pada sampel pasir (Gambar 2). Perangkat lunak sistem ditulis menggunakan bahasa C++ pada platform Arduino IDE, bertugas melakukan akuisisi data getaran, pengolahan sinyal FFT, klasifikasi rule-based threshold, pengendalian servo SG90, serta pengiriman data hasil identifikasi ke server melalui jaringan WiFi.



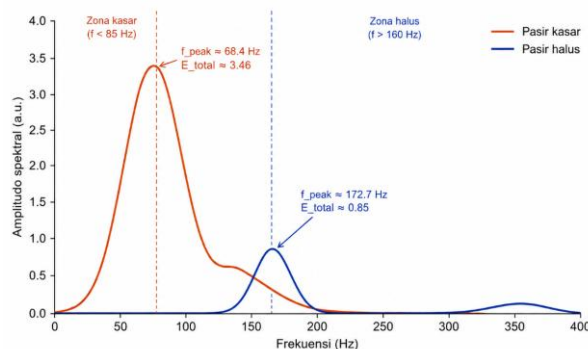
Gambar 2. Implementasi prototipe alat identifikasi jenis pasir

3.2 Pengujian Sensor dan Aktuator

Pengujian MPU6050 dilakukan untuk memastikan sensor mampu menangkap perbedaan pola getaran antara pasir halus dan pasir kasar saat sampel dijatuhkan ke plat sensor melalui pintu servo SG90, dengan membaca data percepatan tiga sumbu pada frekuensi sampling 1000 Hz. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pasir kasar menghasilkan lonjakan percepatan yang jauh lebih tinggi dan tidak beraturan pada durasi singkat, sedangkan pasir halus menghasilkan pola getaran yang lebih halus, stabil, dan teredam. Pengujian servo SG90 pada sudut bukaan 45° dengan durasi bukaan 500 ms menghasilkan massa pasir keluar yang relatif konsisten pada kisaran 49,8-50,5 gram di lima kali percobaan, sehingga mendukung keterulangan (repeatability) hasil pengukuran getaran.

3.3 Hasil Ekstraksi Fitur FFT

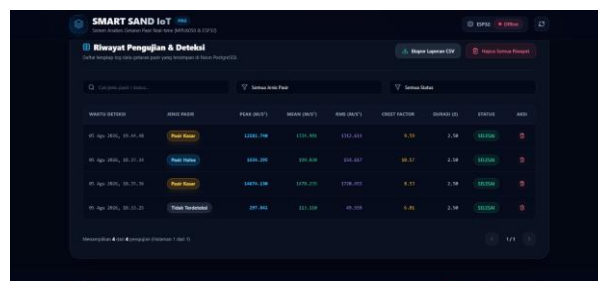
Sinyal getaran dari MPU6050 diproses melalui tahap preprocessing berupa penghilangan DC offset dan penerapan fungsi jendela Hamming, kemudian ditransformasikan ke domain frekuensi menggunakan algoritma FFT (Gambar 3). Hasil ekstraksi fitur menunjukkan bahwa pasir kasar cenderung memiliki frekuensi puncak di bawah 85 Hz dengan energi spektral yang lebih tinggi (misalnya 68,4 Hz dengan energi 3,42), sedangkan pasir halus menunjukkan frekuensi puncak di atas 160 Hz dengan energi spektral yang lebih rendah (misalnya 172,3 Hz dengan energi 0,85), sehingga kedua kategori dapat dipisahkan secara jelas menggunakan aturan threshold yang ditetapkan.



Gambar 3. Spektrum frekuensi hasil FFT pada pasir halus dan pasir kasar

3.4 Pengujian Dashboard IoT

Dashboard monitoring menampilkan hasil identifikasi jenis pasir secara real-time, meliputi kategori klasifikasi, nilai peak, mean, RMS, crest factor, durasi pengukuran, serta status setiap siklus pengujian, sekaligus menyediakan riwayat data yang tersimpan pada basis data (Gambar 4). Fitur ini memudahkan pengguna memantau dan mengaudit hasil pengujian tanpa perlu mengakses basis data secara langsung.



Gambar 4. Dashboard monitoring identifikasi jenis pasir



3.5 Akurasi Klasifikasi (Confusion Matrix)

Pengujian akurasi klasifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil identifikasi sistem terhadap 60 sampel pasir (30 halus, 30 kasar) berdasarkan hasil sieve analysis sebagai ground truth (Tabel 4).

	Prediksi: Halus	Prediksi: Kasar
Aktual: Halus (30)	28	2
Aktual: Kasar (30)	3	27

Tabel 4. Confusion matrix hasil klasifikasi sistem

Metrik	Nilai
Accuracy	91,7% (55/60 sampel tepat)
Precision (pasir halus)	90,3% (28/31 prediksi halus benar)
Recall (pasir halus)	93,3% (28/30 sampel halus terdeteksi)

Tabel 5. Hasil perhitungan metrik evaluasi

Sebanyak 5 dari 60 sampel mengalami kesalahan klasifikasi (misclassification), yang sebagian besar terjadi pada sampel dengan nilai frekuensi puncak dan energi spektral yang berada di dekat batas threshold, sehingga membutuhkan penyesuaian nilai ambang batas atau penambahan data kalibrasi pada penelitian lanjutan.

3.6 Pengujian Real-Time Performance

Pengujian real-time performance mengukur durasi total mulai dari sampling data getaran hingga hasil klasifikasi tampil pada dashboard. Hasil lima kali percobaan menunjukkan durasi berkisar 1,35-1,51 detik dengan rata-rata 1,42 detik per siklus identifikasi, masih berada di bawah target performansi sebesar 2 detik, sehingga sistem layak dipertimbangkan untuk mendukung penerapan pada skala industri yang membutuhkan hasil identifikasi cepat.

3.7 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu menjawab permasalahan utama proses manual melalui integrasi akuisisi getaran, ekstraksi fitur FFT, klasifikasi rule-based threshold, dan pemantauan berbasis dashboard IoT dalam satu alur yang terintegrasi. Temuan ini sejalan dengan penelitian pemantauan getaran berbasis MPU6050/ADXL345 dan ESP32 pada domain lain, yang juga menunjukkan bahwa kombinasi sensor MEMS, mikrokontroler berbiaya rendah, dan dashboard berbasis web mampu memberikan pemantauan kondisi secara real-time dengan andal [6][7][8]. Dibandingkan dengan pendekatan klasifikasi berbasis deep learning seperti CNN yang membutuhkan sumber daya komputasi besar [9], pendekatan rule-based threshold pada penelitian ini terbukti cukup akurat (accuracy 91,7%) sekaligus jauh lebih ringan untuk diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 dengan sumber



daya terbatas, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi lapangan berbiaya rendah. Nilai accuracy, precision, dan recall yang diperoleh juga konsisten dengan target performansi real-time di bawah 2 detik, sehingga sistem berpotensi digunakan sebagai alternatif cepat terhadap metode sieve analysis konvensional, khususnya untuk pengujian cepat (rapid testing) di lapangan atau pabrik ready-mix.

3.8 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, pengujian hanya mencakup dua kategori pasir (halus dan kasar) dalam kondisi kering, sehingga belum merepresentasikan kategori pasir sedang maupun variasi kadar air/kelembapan. Kedua, kesalahan klasifikasi masih terjadi pada sampel dengan nilai fitur yang mendekati batas threshold, yang mengindikasikan perlunya kalibrasi ulang dengan data latih yang lebih banyak. Ketiga, jumlah sampel pengujian (60 sampel) masih relatif terbatas untuk generalisasi pada skala industri yang lebih luas.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, dapat disimpulkan bahwa perangkat keras identifikasi jenis pasir berhasil dirancang menggunakan sensor MPU6050 yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 dan servo SG90 sebagai mekanisme pintu penjatuh sampel. Algoritma FFT berhasil diimplementasikan pada ESP32 untuk mengubah sinyal getaran domain waktu menjadi domain frekuensi sehingga diperoleh fitur frekuensi puncak dan energi spektral total yang mampu membedakan karakteristik getaran pasir halus dan kasar, dengan pasir kasar cenderung memiliki frekuensi puncak di bawah 85 Hz dan energi spektral lebih tinggi, sedangkan pasir halus memiliki frekuensi puncak di atas 160 Hz dengan energi spektral lebih rendah. Algoritma Rule-Based Threshold yang diterapkan menghasilkan tingkat accuracy 91,7%, precision 90,3%, dan recall 93,3% pada pengujian 60 sampel, dengan rata-rata waktu respons 1,42 detik per siklus identifikasi yang masih di bawah target 2 detik. Sistem juga berhasil diintegrasikan dengan dashboard IoT berbasis Grafana dan basis data MySQL sehingga hasil identifikasi dapat dipantau secara real-time. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan mampu melakukan identifikasi jenis pasir secara otomatis, cepat, dan akurat, serta berpotensi digunakan sebagai alternatif metode sieve analysis konvensional pada aplikasi konstruksi dan manufaktur bahan bangunan. Pengembangan lanjutan disarankan mencakup penambahan kategori pasir sedang, kalibrasi ulang threshold dengan data yang lebih banyak, pengujian pada kondisi kadar air yang bervariasi, pengembangan dashboard menjadi aplikasi mobile dengan notifikasi dini, serta pengujian pada skala sampel yang lebih besar sebelum diterapkan pada skala industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, dosen pembimbing, serta pihak-pihak yang telah memberikan bimbingan, dukungan, serta informasi yang diperlukan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Achmad Suhudi, K., Purnama, A., & Ainurahman. (2022). Penelitian Pasir Dari Sungai Brantas Desa Padangan Kecamatan Ngantru Kabupaten Tulungagung. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Tulungagung*, 02(02), 67-83.



- [2] Choe, H.-O., & Lee, M.-H. (2025). Artificial Intelligence-Based Anomaly Detection Technology for Equipment Condition Monitoring in Smart Farms. *Applied Sciences*, 15(23), 12843. <https://doi.org/10.3390/app152312843>
- [3] Dhanda, M., Pant, P., Dogra, S., Gupta, A., & Dutt, V. (2022). Sensitivity Analysis of Contact Type Vibration Measuring Sensors. *Sound & Vibration*, 56(3), 235-243. <https://doi.org/10.32604/sv.2022.015615>
- [4] Franco, T., Sestrem, L., Henriques, P. R., Alves, P., Varanda Pereira, M. J., Brandão, D., Leitão, P., & Silva, A. (2022). Motion Sensors for Knee Angle Recognition in Muscle Rehabilitation Solutions. *Sensors*, 22(19), 7605. <https://doi.org/10.3390/s22197605>
- [5] Gabštur, P., Kočisko, M., Török, J., & Kaščák, J. (2025). Enhancement of Primary Profile Surface Quality in FFF Printing Through Vibration Monitoring and Active Control. *Applied Sciences*, 15(21), 11346. <https://doi.org/10.3390/app152111346>
- [6] Herdiansyah Noorrizky Anggana, & Moch Solikin. (2025). Development of a Real-Time Vibration Monitoring System for Drum Tester Machines Using ADXL345 Sensor and ESP32 Microcontroller. *Journal of Automotive and Mechanical Applied Technology*, 2(1), 66-75. <https://doi.org/10.21831/jamat.v2i1.1277>
- [7] Pandit, S. R., Patil, K., & Vaidya, V. (2025). Vibration-Based Motor Health Monitoring System. *International Journal of Progressive Research in Engineering Management and Science*, 3550-3552.
- [8] Rosell, J., Mangubat, N. V., Duhaylungsod, J., Saumat, M., Dalis, I., Ochang, P., & Demecillo, G. (2025). Design and Development of a Portable Vibrometer using ESP32 Microcontroller and ADXL345 Sensor. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 7(4), 1-15. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i04.47835>
- [9] Saouli, M. E., Touba, M. M., & Boudiaf, A. (2025). Hybrid Diagnostic Framework for Interpretable Bearing Fault Classification Using CNN and Dual-Stage Feature Selection. *Sensors*, 25(20). <https://doi.org/10.3390/s25206386>
- [10] Shubham Gupta, & Shiv Naresh Shivhare. (2025). Embedded TinyML for Predictive Maintenance: Vibration Analysis on ESP32 with Real-Time Fault Detection in Industrial Equipment. *International Journal on Computational Modelling Applications*, 2(2), 1-17. <https://doi.org/10.63503/j.ijcma.2025.114>
- [11] Srokosz, P. E., Dyka, I., Bujko, M., & Bocheńska, M. (2021). A Modified Resonant Column Device for In-Depth Analysis of Vibration in Cohesive and Cohesionless Soils. *Energies*, 14(20), 6647. <https://doi.org/10.3390/en14206647>