
PENGEMBANGAN DETEKTOR PORTABEL TINGKAT KERUSAKAN JALAN MENGGUNAKAN ESP32, MPU6050, DAN MICROSD

Muhamad Iradat Achmad^{1*}, Siti Nurjanah A.²

¹Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Dayanu Ikhsanuddin

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Haluoleo

¹irad4t@gmail.com, ²noeruh@gmail.com

*Penulis Koresponden

diajukan: 12 Agustus 2024,

diterima: 25 Agustus 2024.

Abstrak

Pemeliharaan jalan yang efektif sangat penting untuk menjamin keselamatan dan efisiensi transportasi, karena jalan yang rusak dapat menyebabkan kecelakaan lalu lintas, kerusakan kendaraan, dan peningkatan waktu perjalanan, yang pada akhirnya berdampak pada perekonomian dengan menghambat distribusi barang dan jasa. Deteksi dini kerusakan jalan seperti lubang, retakan, dan deformasi permukaan menjadi sangat penting untuk pemeliharaan dan perbaikan yang tepat waktu. Untuk itu penelitian ini mengembangkan detektor portabel tingkat kerusakan jalan. Tahap desain memastikan komponen perangkat keras dan perangkat lunak dipilih sesuai spesifikasi dan dapat diintegrasikan untuk mencapai tujuan mendeteksi kerusakan jalan. Pada tahap integrasi sistem, koneksi ESP32 ke MPU6050 melalui interface I2C, dan ke microSD melalui interface SPI. Pengujian sistem detektor dilakukan pada empat kondisi ruas jalan yaitu Jalan Mulus, Jalan dengan Retakan, Jalan Bergelombang, dan Jalan Berlubang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa detektor portabel yang dikembangkan mampu bekerja dengan baik untuk mendeteksi tingkat kerusakan jalan. Hasil pengujian mengkonfirmasi bahwa tingkat kerusakan jalan berbanding lurus dengan bacaan detektor akselerometer dan giroskop dengan persentase tingkat kerusakan berada dalam interval [1.17%, 9.54%] untuk akselerometer, dan interval [15.41%, 36.27%] untuk giroskop.

Kata kunci: detektor portabel, tingkat kerusakan jalan, ESP32, MPU6050.

Abstract

Effective road maintenance is essential to ensure transportation safety and efficiency, as damaged roads can cause traffic accidents, vehicle damage, and increased travel times, which ultimately impact the economy by hampering the distribution of goods and services. Early detection of road defects such as potholes, cracks and surface deformations is critical for timely maintenance and repair. For this reason, this research developed a portable road damage level detector. The design stage ensures that hardware and software components are selected according to specifications and can be integrated to achieve the goal of detecting road damage. At the system integration stage, the ESP32 connection to the MPU6050 via I2C, and to the microSD via SPI. Testing of the detector was carried out on four road conditions, namely smooth roads, roads with cracks, bumpy roads and potholes. The test results show that the portable detector developed is able to work well to detect the level of road damage. The test results confirm that the level of road damage is directly proportional to the accelerometer and gyroscope detector readings with the percentage of damage level being in the interval [1.17%, 9.54%] for the accelerometer, and the interval [15.41%, 36.27%] for the gyroscope.

Keywords: portable detector, road damage level, ESP32, MPU6050.

1. PENDAHULUAN

Pemeliharaan jalan yang efektif sangat penting untuk menjamin keselamatan dan efisiensi transportasi, karena jalan yang rusak dapat menyebabkan kecelakaan lalu lintas, kerusakan kendaraan, dan peningkatan waktu perjalanan, yang pada akhirnya berdampak pada perekonomian dengan menghambat distribusi barang dan jasa. Deteksi dini kerusakan jalan seperti lubang, retakan, dan deformasi permukaan menjadi sangat penting untuk pemeliharaan dan perbaikan yang tepat waktu. Metode konvensional, termasuk inspeksi manual dan kendaraan khusus yang dilengkapi sensor canggih, seringkali tidak efisien karena tingginya kebutuhan waktu dan biaya, rentan terhadap kesalahan manusia, dan terbatasnya cakupan seluruh area jalan. Inspeksi manual membutuhkan banyak tenaga kerja dan rentan terhadap ketidakakuratan, sedangkan inspeksi khusus memerlukan investasi awal yang besar dan biaya pengoperasian yang tinggi. Selain itu, metode tradisional ini biasanya tidak mendukung deteksi real-time, sehingga menyebabkan kerusakan jalan semakin parah sebelum dapat diidentifikasi dan ditangani. Untuk mengatasi keterbatasan ini, pendekatan inovatif seperti penggunaan drone dan kecerdasan buatan (AI) untuk analisis jalan telah diusulkan. Drone dapat menangkap gambar permukaan jalan dengan resolusi tinggi, dan teknik AI dapat memproses gambar tersebut untuk mengklasifikasikan dan mendeteksi berbagai jenis kerusakan jalan, seperti retakan linier dan zig-zag, secara real-time, sehingga meningkatkan efisiensi dan akurasi pemeliharaan jalan [1]. Selain itu, deteksi kerusakan perkerasan jalan berbasis gambar secara otomatis menggunakan metode pembelajaran mendalam, seperti Weakly Supervised Patch Label Inference Networks (WSPLIN), dapat secara efisien mengatasi karakteristik spesifik gambar perkerasan, sehingga memberikan informasi perantara yang dapat ditafsirkan tentang lokasi dan jenis kerusakan, sehingga meningkatkan kinerja dan efisiensi dalam pemeliharaan perkerasan [2]. Penelitian lainnya yang mengintegrasikan pertimbangan keselamatan ke dalam sistem mobil angkutan bersama carpooling dapat membantu mengurangi kemacetan lalu lintas dan emisi CO₂, yang secara tidak langsung berkontribusi terhadap kondisi jalan yang lebih baik dengan mengurangi jumlah kendaraan dan kerusakan jalan [3]. Penggunaan teknik non-destruktif canggih seperti interferometri transmisi dapat mendeteksi cacat mikro pada material transparan, yang dapat diadaptasi untuk inspeksi permukaan jalan dengan resolusi tinggi, memastikan identifikasi tepat waktu dan perbaikan bahkan pada cacat terkecil [4].

Kemajuan terkini dalam visi komputer dan pembelajaran mendalam telah meningkatkan akurasi dan efisiensi deteksi kerusakan jalan secara signifikan. Penggunaan teknik segmentasi pengolahan citra untuk mendeteksi retakan telah mencapai akurasi yang mengesankan dalam mengidentifikasi retakan perkerasan, sehingga meningkatkan keandalan inspeksi jalan [5]. Selain itu, sistem otomatis menggunakan kamera video berbiaya rendah yang dipasang pada kendaraan dapat menangkap citra perkerasan dan memasukkannya ke dalam jaringan saraf tiruan untuk mendeteksi dan klasifikasi keretakan sehingga dapat memberikan data berharga seperti persentase keretakan per segmen jalan dan peta segmentasi, yang membantu dalam melakukan pemeliharaan yang berbasis informasi untuk pengambilan keputusan [6]. Hubungan antara kondisi perkerasan jalan dan kecepatan kendaraan, getaran, dan kebisingan di dalam kendaraan juga telah dipelajari, mengungkapkan bahwa kondisi jalan yang buruk secara signifikan meningkatkan kebisingan dan getaran sekaligus mengurangi kecepatan kendaraan, yang semakin menekankan perlunya pemeliharaan tepat waktu [7]. Penerapan sistem manajemen pemeliharaan perkerasan yang komprehensif yang mencakup teknik inspeksi visual dan database jenis kerusakan aspal yang umum dapat membantu dalam mengevaluasi kondisi perkerasan dan menyarankan tindakan pemeliharaan yang tepat [8]. Selain itu, kerangka kerja pemeliharaan prediktif yang menggunakan model pembelajaran mendalam yang telah dilatih sebelumnya dapat mengklasifikasikan jalan berdasarkan tingkat kerusakannya, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan pemeliharaan yang diprioritaskan berdasarkan tingkat keparahan kerusakan [9]. Sistem ROAD (Robotics-Assisted Onsite Data Collecting) memanfaatkan pembelajaran mendalam dan sistem

visi robot untuk mengumpulkan data berkualitas tinggi dan mengidentifikasi retakan jalan dengan akurasi yang tinggi menggunakan model Xception [10]. Penggunaan sensor LiDAR multi-balok seluler berbiaya rendah telah dieksplorasi untuk menilai kinerja berbagai material marka jalan, memberikan wawasan berharga untuk jadwal pemeliharaan dan pemilihan material [11]. Metode-metode inovatif ini secara kolektif menawarkan pendekatan pemeliharaan jalan yang lebih efisien, hemat biaya, dan akurat, sehingga pada akhirnya meningkatkan keselamatan dan efisiensi transportasi.

Mikrokontroler ESP32 adalah komponen yang sangat serbaguna dan kuat untuk aplikasi IoT, berkat prosesor dual-core, Wi-Fi terintegrasi, dan kemampuan Bluetooth, yang memungkinkan pemrosesan data real-time dan konektivitas jaringan tanpa memerlukan komponen tambahan. Hal ini membuatnya sangat cocok untuk aplikasi yang memerlukan transfer data real-time dan kendali jarak jauh, seperti sistem deteksi kerusakan jalan. Dukungan ESP32 untuk berbagai antarmuka seperti SPI, I2C, UART, dan ADC semakin meningkatkan fleksibilitasnya, memungkinkan integrasi tanpa batas dengan berbagai sensor dan komponen lainnya. Fleksibilitas ini ditunjukkan dalam berbagai aplikasi, seperti sistem irigasi cerdas yang memantau kelembaban tanah dan mengontrol pompa air berdasarkan data real-time, memanfaatkan konektivitas ESP32 untuk mengirimkan data ke platform seperti ThingSpeak untuk analisis dan visualisasi [12]. Selain itu, kemampuan ESP32 untuk menangani banyak tugas secara bersamaan sangat penting untuk langkah-langkah keamanan siber di perangkat IoT, seperti yang terlihat dalam penerapan T800, filter paket dengan sumber daya rendah yang menggunakan pembelajaran mesin untuk mengklasifikasikan paket dan mengecualikan lalu lintas berbahaya, sehingga meningkatkan keamanan. Dokumentasi ESP32 yang berbiaya rendah dan ekstensif menjadikannya pilihan yang menarik untuk mengembangkan sistem tertanam yang kompleks, sebagaimana dibuktikan dengan penggunaannya pada perangkat berbiaya rendah untuk kualifikasi media isothermal dan telemetri waktu nyata dalam lingkungan akademik [13]. Selain itu, penerapannya dalam sistem mitigasi banjir, di mana ia memproses data dari sensor ultrasonik untuk memantau ketinggian sungai dan mengirimkan informasi tersebut ke platform seperti Blynk dan ThingSpeak, menyoroti kegunaannya dalam pengawasan lingkungan [14]. Terlepas dari kelebihanannya, penting untuk mengatasi potensi kerentanan, seperti masalah buffer overflow, yang dapat diatasi melalui patch tertentu untuk memastikan kinerja dan keamanan yang kuat [15]. Secara keseluruhan, ESP32 menawarkan solusi yang efisien dan terjangkau untuk berbagai aplikasi IoT, termasuk deteksi kerusakan jalan, dengan berfungsi sebagai unit pemrosesan pusat yang menangani data sensor dan memfasilitasi analisis dan penyimpanan lebih lanjut.

MPU6050 adalah sensor Unit Pengukuran Inersia (IMU) serbaguna yang mengintegrasikan akselerometer 3 sumbu dan giroskop 3 sumbu, sehingga sangat cocok untuk aplikasi yang memerlukan deteksi dan orientasi gerakan presisi, seperti deteksi kerusakan jalan. Akselerometer dapat mendeteksi percepatan linier sepanjang sumbu x, y, dan z, yang penting untuk mengidentifikasi getaran dan guncangan yang mengindikasikan kerusakan jalan. Giroskop melengkapinya dengan mengukur kecepatan rotasi pada sumbu yang sama, memberikan data tambahan tentang orientasi dan perubahan arah. Kemampuan ganda ini penting untuk memetakan kondisi jalan secara akurat. Resolusi dan akurasi tinggi MPU6050 ditingkatkan dengan Digital Motion Processor (DMP), yang memproses data mentah menjadi informasi yang lebih bermakna, sehingga mengurangi beban komputasi pada mikrokontroler dan meningkatkan analisis data real-time. Dalam konteks deteksi kerusakan jalan, MPU6050 dapat dipasang pada kendaraan yang bergerak untuk terus memantau getaran dan guncangan selama perjalanan. Data ini kemudian dapat dianalisis untuk menentukan area jalan yang rusak. Konsumsi daya yang rendah, ukuran yang ringkas, dan harga yang terjangkau dari sensor ini menjadikannya pilihan ideal untuk penggunaan portabel dan luas dalam aplikasi semacam itu. Selain itu, penggunaan filter pelengkap dapat lebih meningkatkan akurasi pengukuran inersia, mencapai akurasi hingga 95%, yang sangat penting untuk deteksi kerusakan jalan yang andal [16]. Selain itu, integrasi algoritma canggih,

seperti filter Kalman yang diperluas (EKF) dan deteksi kecepatan nol (ZVD), dapat secara signifikan meningkatkan akurasi pengukuran dengan mengkompensasi ketidakselarasan instalasi dan secara dinamis menyesuaikan matriks kovarians kebisingan [17]. Algoritma evolusioner seperti metode optimasi yang terinspirasi merpati (PIO) yang ditingkatkan juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan memperbaiki kesalahan sensor, sehingga meminimalkan kesalahan hasil navigasi dan meningkatkan akurasi sistem secara keseluruhan [18]. Potensi presisi tinggi dan kinerja kebisingan rendah, seperti yang ditunjukkan dalam aplikasi sensor inersia lainnya, menggarisbawahi kemampuan MPU6050 dalam memberikan data yang andal dan akurat untuk deteksi kerusakan jalan [19]. Hal ini menjadikan MPU6050 solusi yang kuat dan hemat biaya untuk memantau dan memelihara infrastruktur jalan.

Penyimpanan data secara real-time sangat penting untuk sistem deteksi kerusakan jalan, terutama ketika data perlu dikumpulkan dalam jangka waktu lama dan di berbagai lokasi. Modul MicroSD memberikan solusi efektif untuk tujuan ini karena kapasitas penyimpanannya yang besar, biaya rendah, dan kemudahan integrasi dengan mikrokontroler seperti ESP32 melalui antarmuka SPI atau SDIO. Modul-modul ini memungkinkan penyimpanan langsung data sensor di lapangan, sehingga menghilangkan kebutuhan akan koneksi internet atau perangkat penyimpanan eksternal. Misalnya, dalam analisis jalan menggunakan drone untuk memperoleh gambar guna mengenali kerusakan, data dapat disimpan pada kartu microSD, memungkinkan perekaman terus menerus dan kemudian ditransfer ke komputer atau server untuk analisis lebih lanjut. Demikian pula, dalam deteksi kerusakan bangunan pasca gempa menggunakan UAV, gambar dan data beresolusi tinggi yang dikumpulkan dapat disimpan pada kartu microSD, memfasilitasi penyebaran cepat dan pengelolaan data yang efisien tanpa akses internet langsung [20]. Selain itu, integrasi sensor optik Fiber Bragg Grating (FBG) pada struktur jalan untuk pembacaan regangan akibat lalu lintas secara real-time dapat memanfaatkan penyimpanan microSD, memastikan bahwa data regangan dan suhu dalam jumlah besar dicatat secara terus menerus dan andal [21]. Penggunaan algoritma tingkat lanjut, seperti analisis paket wavelet untuk identifikasi kerusakan struktural, juga menghasilkan data kompleks yang dapat disimpan secara efisien pada kartu microSD untuk analisis rinci selanjutnya [22]. Selain itu, dalam sistem transportasi cerdas, di mana penghitungan kendaraan secara real-time sangat penting untuk mengurangi kemacetan lalu lintas, modul microSD dapat menyimpan data yang diproses oleh model seperti YOLOv5 dan DeepSort, memastikan akurasi dan keandalan yang tinggi dalam pengelolaan data [23]. Dengan demikian, portabilitas dan penggantian kartu microSD menawarkan fleksibilitas yang signifikan dalam mengelola dan menganalisis kumpulan data besar yang dikumpulkan dari berbagai sensor dan sistem dalam deteksi kerusakan jalan dan aplikasi terkait.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem detektor kerusakan jalan yang portable, murah, dan efektif dengan memanfaatkan teknologi ESP32, MPU6050, dan MicroSD. ESP32 adalah mikrokontroler yang dikenal karena kemampuannya dalam komunikasi nirkabel dan pengolahan data yang cepat. MPU6050 adalah sensor IMU (Inertial Measurement Unit) yang menggabungkan akselerometer dan giroskop, sehingga mampu mendeteksi perubahan kecepatan dan orientasi yang dapat menunjukkan adanya kerusakan jalan. Modul MicroSD digunakan untuk penyimpanan data secara real-time, sehingga memungkinkan analisis lebih lanjut. Sistem ini dirancang untuk mudah dipasang pada kendaraan biasa, yang akan mengumpulkan data selama perjalanan tanpa memerlukan perangkat khusus yang mahal. Penelitian ini memberikan solusi inovatif dalam deteksi kerusakan jalan yang dapat digunakan oleh pemerintah dan masyarakat. Dengan sistem yang dikembangkan, deteksi kerusakan jalan dapat dilakukan secara lebih efisien dan dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Data yang dikumpulkan oleh sistem ini dapat digunakan untuk memprioritaskan perbaikan jalan dan merencanakan pemeliharaan yang lebih efektif. Selain itu, sistem ini dapat diintegrasikan dengan aplikasi mobile atau platform berbasis web, memungkinkan masyarakat untuk melaporkan dan memonitor kondisi jalan di lingkungan mereka. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan alat yang

praktis dan ekonomis bagi pemerintah, tetapi juga memberdayakan masyarakat untuk turut serta dalam pemeliharaan infrastruktur jalan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Desain Sistem

Pengembangan sistem detektor kerusakan jalan portable menggunakan ESP32, MPU6050, dan MicroSD memerlukan perancangan yang matang baik dari segi perangkat keras maupun perangkat lunak. Pada desain perangkat keras, sistem ini melibatkan beberapa komponen utama yang harus dirakit dan diintegrasikan secara efisien untuk mencapai tujuan deteksi kerusakan jalan. Komponen-komponen tersebut meliputi ESP32, MPU6050, modul MicroSD, dan komponen pendukung lainnya seperti baterai dan casing pelindung. Sebagai mikrokontroler utama, ESP32 bertugas mengumpulkan data dari sensor MPU6050 dan menyimpan data tersebut ke kartu MicroSD. ESP32 dipilih karena keunggulannya dalam konektivitas nirkabel dan pemrosesan data yang cepat. Sensor IMU ini menggabungkan akselerometer dan giroskop yang akan mendeteksi getaran dan guncangan yang terjadi pada jalan selama kendaraan bergerak. Sensor ini akan mengirimkan data gerakan secara kontinu ke ESP32. Modul MicroSD digunakan untuk menyimpan data yang dikumpulkan dari sensor MPU6050. Data disimpan dalam format yang mudah diakses dan dianalisis kemudian. Sistem ini memerlukan sumber daya yang portable sehingga penggunaan baterai yang sesuai sangat penting. Baterai Li-Po dengan kapasitas yang cukup besar dipilih untuk memastikan operasional yang panjang. Untuk melindungi komponen dari debu, air, dan benturan, casing pelindung yang kuat dan tahan cuaca digunakan. Skema dasar dari interkoneksi sistem perangkat keras adalah sebagai berikut. ESP32 terhubung dengan MPU6050 melalui interface I2C. Modul MicroSD terhubung dengan ESP32 melalui interface SPI. Baterai memberikan daya ke ESP32, MPU6050, dan Modul MicroSD. Casing Pelindung melindungi seluruh sistem dari kondisi lingkungan yang keras.

Dalam desain perangkat lunak sistem ini melibatkan pengembangan firmware untuk ESP32 serta skrip pemrosesan data yang akan digunakan untuk analisis lebih lanjut. Perangkat lunak ini bertugas untuk mengumpulkan, menyimpan, dan memproses data dari sensor. Pada tahap awal, ESP32 akan menginisialisasi komunikasi dengan MPU6050 dan modul MicroSD. Hal ini melibatkan konfigurasi I2C untuk berkomunikasi dengan MPU6050 dan SPI untuk mengakses kartu MicroSD. Firmware akan mengatur MPU6050 untuk mengirimkan data percepatan dan rotasi secara periodik. Data yang diterima akan di-buffer dalam memori ESP32 sebelum disimpan. Data yang terkumpul akan disimpan dalam file di kartu MicroSD dengan format yang mudah diakses, seperti CSV atau JSON. Penyimpanan dilakukan secara berkala untuk memastikan data tidak hilang jika sistem dimatikan secara tiba-tiba. Firmware juga harus mengelola konsumsi daya untuk memastikan bahwa sistem dapat beroperasi dalam waktu yang lama tanpa pengisian ulang baterai yang terlalu sering. Ini termasuk pengaturan mode tidur (sleep mode) untuk ESP32 saat sistem tidak aktif. Setelah data dikumpulkan dan disimpan di kartu MicroSD, data tersebut akan dipindahkan ke komputer atau server untuk analisis lebih lanjut. Skrip pemrosesan data akan membaca file yang disimpan dan melakukan analisis untuk mendeteksi pola getaran yang menunjukkan kerusakan jalan. Metode analisis dapat meliputi filter digital untuk mengurangi noise, deteksi puncak (peak detection) untuk menemukan getaran besar, dan algoritma klasifikasi untuk mengidentifikasi jenis kerusakan. Hasil analisis dapat divisualisasikan dalam bentuk grafis untuk memudahkan interpretasi. Contoh visualisasi meliputi grafik waktu terhadap percepatan dan peta lokasi kerusakan yang terdeteksi. Dengan desain perangkat keras dan perangkat lunak yang terintegrasi dengan baik, sistem detektor kerusakan jalan ini diharapkan dapat memberikan solusi yang efektif dan efisien dalam mendeteksi dan mengidentifikasi kerusakan jalan. Sistem ini dirancang agar mudah digunakan dan diimplementasikan, sehingga dapat membantu pemerintah dan masyarakat dalam memelihara kualitas infrastruktur jalan secara berkelanjutan.

2.2. Komponen Utama

Dalam pengembangan sistem detektor kerusakan jalan portable, terdapat beberapa komponen utama yang harus diintegrasikan dengan baik untuk memastikan sistem berfungsi secara optimal. Komponen-komponen tersebut meliputi ESP32 sebagai mikrokontroler utama, MPU6050 sebagai sensor akselerometer dan giroskop, serta modul MicroSD untuk penyimpanan data. ESP32 adalah mikrokontroler yang sangat canggih dan serbaguna yang dirancang oleh Espressif Systems. Mikrokontroler ini dilengkapi dengan berbagai fitur yang membuatnya ideal untuk aplikasi IoT (Internet of Things) dan sistem embedded. Beberapa keunggulan utama dari ESP32 yang relevan untuk sistem detektor kerusakan jalan dapat dijelaskan sebagai berikut. ESP32 memiliki dua inti prosesor Tensilica Xtensa LX6 yang mampu menjalankan tugas secara paralel. Ini memungkinkan pengolahan data sensor dan manajemen komunikasi secara simultan, meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan. ESP32 dilengkapi dengan modul Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, yang memungkinkan perangkat untuk berkomunikasi dengan jaringan dan perangkat lain tanpa memerlukan modul tambahan. Konektivitas Wi-Fi dapat digunakan untuk mengunggah data ke server cloud atau untuk mengakses data secara real-time dari jarak jauh. ESP32 mendukung berbagai interface komunikasi seperti I2C, SPI, UART, dan ADC. Interface I2C digunakan untuk berkomunikasi dengan sensor MPU6050, sedangkan interface SPI digunakan untuk mengakses modul MicroSD. Meskipun powerful, ESP32 dirancang untuk efisiensi daya. Fitur manajemen daya yang canggih memungkinkan perangkat beroperasi dalam mode daya rendah (deep sleep mode), yang sangat penting untuk aplikasi portable yang mengandalkan baterai. ESP32 didukung oleh ekosistem pengembangan yang luas, termasuk SDK (Software Development Kit), pustaka, dan alat pengembangan lainnya. Komunitas pengguna yang aktif juga menyediakan banyak sumber daya dan contoh aplikasi yang dapat digunakan sebagai referensi.

MPU6050 adalah sensor Inertial Measurement Unit (IMU) yang menggabungkan akselerometer 3-sumbu dan giroskop 3-sumbu dalam satu chip. Sensor ini sangat penting untuk mendeteksi getaran dan guncangan yang menunjukkan adanya kerusakan jalan. Beberapa fitur dan keunggulan dari MPU6050 dapat dijelaskan sebagai berikut. Akselerometer 3-Sumbu dalam MPU6050 mampu mendeteksi percepatan linier di sepanjang tiga sumbu (x, y, dan z). Data percepatan ini digunakan untuk mengukur getaran dan guncangan yang terjadi saat kendaraan bergerak di atas permukaan jalan. Giroskop 3-Sumbu mengukur kecepatan rotasi di sekitar tiga sumbu yang sama, memberikan informasi tambahan tentang orientasi dan perubahan arah. Data dari giroskop dapat digunakan untuk mengkoreksi data akselerometer, meningkatkan akurasi deteksi kerusakan. MPU6050 dilengkapi dengan Digital Motion Processor (DMP) yang mampu mengolah data sensor secara internal sebelum mengirimkannya ke mikrokontroler. DMP dapat mengurangi beban pemrosesan pada ESP32 dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. MPU6050 dirancang untuk aplikasi portable dengan konsumsi daya yang rendah, memungkinkan sistem beroperasi dalam waktu yang lama dengan baterai. MPU6050 menggunakan interface I2C untuk berkomunikasi dengan mikrokontroler. Interface ini memudahkan integrasi dengan ESP32 dan memungkinkan pengiriman data dengan cepat dan andal.

Modul MicroSD digunakan untuk menyimpan data yang dikumpulkan dari sensor MPU6050 secara real-time. Penyimpanan data yang handal dan mudah diakses sangat penting untuk analisis dan pelaporan kerusakan jalan. Beberapa fitur dan keunggulan dari modul MicroSD dapat dijelaskan sebagai berikut. Kartu MicroSD tersedia dalam berbagai kapasitas, mulai dari beberapa gigabyte hingga terabyte. Ini memungkinkan penyimpanan data dalam jumlah besar tanpa harus sering mengganti kartu atau mengunduh data ke komputer. Data yang disimpan dalam kartu MicroSD dapat diakses dengan mudah menggunakan komputer atau perangkat lain. Format penyimpanan yang umum seperti FAT32 atau exFAT memastikan kompatibilitas yang luas. Modul MicroSD mendukung kecepatan baca dan tulis yang tinggi, memungkinkan penyimpanan data secara real-time tanpa keterlambatan. Ini penting untuk memastikan bahwa semua data sensor tercatat dengan akurat. Modul MicroSD menggunakan interface SPI untuk berkomunikasi dengan

mikrokontroler ESP32. Interface ini memastikan transfer data yang cepat dan andal antara ESP32 dan kartu MicroSD. Kartu MicroSD dirancang untuk bertahan dalam kondisi lingkungan yang keras, termasuk suhu ekstrem, kelembaban, dan guncangan. Ini memastikan bahwa data tetap aman dan tidak rusak selama pengoperasian di lapangan. Dengan mengintegrasikan ESP32, MPU6050, dan modul MicroSD, sistem detektor kerusakan jalan ini dirancang untuk mengumpulkan, menyimpan, dan menganalisis data secara efisien dan andal. Komponen-komponen utama ini bekerja sama untuk memberikan solusi yang portable, murah, dan efektif untuk deteksi kerusakan jalan, yang dapat digunakan oleh pemerintah dan masyarakat untuk memelihara infrastruktur jalan secara lebih baik.

2.3. Integrasi Sistem

Integrasi sistem merupakan langkah krusial dalam pengembangan detektor kerusakan jalan portable yang melibatkan ESP32, MPU6050, dan modul MicroSD. Bagian ini akan menjelaskan tentang skema rangkaian elektronik dan koneksi antar komponen untuk memastikan sistem berfungsi dengan baik. Skema rangkaian elektronik menggambarkan bagaimana setiap komponen utama dihubungkan satu sama lain secara fisik. Koneksi antar komponen utama dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Koneksi ESP32 ke MPU6050. MPU6050 berkomunikasi dengan ESP32 melalui interface I2C. Interface ini memerlukan dua jalur utama, yaitu SDA (Serial Data Line) yang digunakan untuk mentransfer data antara ESP32 dan MPU6050, dan SCL (Serial Clock Line) yang digunakan untuk sinkronisasi data transfer. Pin koneksi ESP32 SDA (GPIO21) terhubung ke SDA MPU6050, dan ESP32 SCL (GPIO22) terhubung ke SCL MPU6050, Power Supply MPU6050 memerlukan daya 3.3V yang dapat disuplai oleh ESP32. Dalam hal ini, VCC MPU6050 terhubung ke 3.3V ESP32 dan GND MPU6050 terhubung ke GND ESP32.
2. Koneksi ESP32 ke Modul MicroSD. Modul MicroSD berkomunikasi dengan ESP32 melalui interface SPI. Interface ini memerlukan empat jalur utama, yaitu MOSI (Master Out Slave In) yang digunakan untuk mengirim data dari ESP32 ke modul MicroSD, MISO (Master In Slave Out) yang digunakan untuk menerima data dari modul MicroSD ke ESP32, SCK (Serial Clock) yang digunakan untuk sinkronisasi data transfer, dan CS (Chip Select) yang digunakan untuk memilih modul MicroSD. Pin koneksi ESP32 MOSI (GPIO23) terhubung ke MOSI MicroSD, ESP32 MISO (GPIO19) terhubung ke MISO MicroSD, ESP32 SCK (GPIO18) terhubung ke SCK MicroSD, dan ESP32 CS (GPIO5) terhubung ke CS MicroSD. Power Supply modul MicroSD memerlukan daya 3.3V atau 5V tergantung pada modul yang digunakan. Dan untuk memastikan hal ini sistem menggunakan regulator tegangan jika diperlukan. VCC MicroSD terhubung ke 3.3V atau 5V ESP32, dan GND MicroSD terhubung ke GND ESP32.
3. Sumber Daya (Power Supply). Sistem ini menggunakan baterai Li-Po untuk daya portabel. Baterai dihubungkan ke regulator daya (jika diperlukan) untuk menyediakan tegangan yang tepat (3.3V untuk ESP32 dan MPU6050). Untuk rangkaian pengisian daya yang aman untuk baterai Li-Po, sistem menggunakan modul charger seperti TP4056.
4. Komponen Pendukung. Beberapa kapasitor dan resistor diperlukan untuk stabilisasi tegangan dan penyaringan noise pada jalur daya dan sinyal. Switch On/Off untuk mengontrol daya ke seluruh sistem. Switch on/off dapat dipasang antara baterai dan rangkaian.

Integrasi sistem melibatkan beberapa langkah utama yang dijelaskan sebagai berikut. Perakitan fisik dimulai dengan memasang semua komponen pada papan prototipe (breadboard) atau PCB (Printed Circuit Board) untuk memastikan koneksi yang kuat dan stabil. Setelah komponen terpasang, lakukan penyolderan pada koneksi yang diperlukan untuk memastikan integritas listrik dan mengurangi kemungkinan gangguan sinyal. Sebelum menghubungkan seluruh sistem, pengujian awal dilakukan pada masing-masing komponen untuk memastikan setiap bagian berfungsi dengan benar. Misalnya, uji komunikasi I2C antara ESP32 dan MPU6050, serta uji penyimpanan data pada modul MicroSD. Integrasi Kode dilakukan dengan

mengembangkan dan mengunggah firmware ke ESP32 untuk mengatur komunikasi dengan sensor dan modul penyimpanan, serta mengelola data yang dikumpulkan. Pengujian menyeluruh terhadap sistem yang telah dirakit dilakukan untuk memastikan semua komponen berfungsi dengan baik secara bersama-sama. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pengujian ini adalah aspek stabilitas daya, keakuratan data sensor, dan kecepatan penyimpanan data. Setelah sistem diuji dan berfungsi dengan baik, dilakukan pengemasan seluruh perangkat dalam casing pelindung yang tahan terhadap kondisi lingkungan. Konstruksi casing harus dipastikan memiliki ventilasi yang cukup untuk mencegah overheating dan mudah diakses untuk penggantian baterai dan kartu MicroSD. Dengan integrasi yang tepat dari ESP32, MPU6050, dan modul MicroSD, sistem detektor kerusakan jalan ini diharapkan dapat bekerja secara efektif dalam mengumpulkan dan menyimpan data getaran dan guncangan yang dapat digunakan untuk menganalisis kondisi jalan. Desain yang kompak dan portable memungkinkan sistem ini digunakan secara luas oleh pemerintah dan masyarakat untuk meningkatkan pemeliharaan dan keselamatan jalan.

2.4. Prosedur Pengujian

Pengujian sistem detektor kerusakan jalan portable merupakan tahap krusial untuk memastikan bahwa perangkat bekerja sesuai dengan yang diharapkan dalam kondisi nyata. Langkah-langkah pengujian sistem di lapangan dapat dijelaskan sebagai berikut. Langkah persiapan peralatan dilakukan sebelum melakukan pengujian di lapangan untuk memastikan semua peralatan yang dibutuhkan sudah disiapkan. Termasuk dalam langkah ini memastikan perangkat ESP32, MPU6050, dan modul MicroSD terhubung dan berfungsi dengan baik. Selain itu juga penting untuk memeriksa sumber daya baterai terisi penuh dan perangkat memiliki suplai daya yang cukup untuk durasi pengujian. Alat bantu seperti laptop untuk pemantauan data secara real-time, alat tulis untuk mencatat observasi, dan GPS untuk mencatat lokasi pengujian. Langkah berikut ini adalah kalibrasi awal sebelum melakukan pengujian di lapangan. Kalibrasi MPU6050 untuk memastikan sensor akselerometer dan giroskop bekerja dengan benar dan data yang dihasilkan akurat. Hal ini dapat dilakukan dengan menempatkan perangkat pada permukaan datar dan stabil, lalu mengatur ulang nilai nol sensor. Langkah selanjutnya adalah pengujian komunikasi antara ESP32, MPU6050, dan modul MicroSD untuk memastikan data dapat dikumpulkan dan disimpan dengan benar.

Langkah pengujian di lapangan dimulai dari pemilihan lokasi pengujian. Beberapa lokasi jalan yang memiliki karakteristik berbeda untuk pengujian yaitu Jalan Mulus untuk baseline data getaran minimal, Jalan dengan Retakan untuk mendeteksi kerusakan permukaan, Jalan Bergelombang untuk mendeteksi guncangan yang lebih besar, dan Jalan Berlubang untuk mendeteksi kerusakan signifikan. Perlu dipastikan bahwa lokasi-lokasi tersebut mencakup variasi yang cukup untuk menguji kemampuan perangkat dalam mendeteksi berbagai jenis kerusakan jalan. Langkah selanjutnya adalah pemasangan, pengaturan, dan instalasi di kendaraan yang akan digunakan untuk pengujian. Pada langkah ini perlu dipastikan bahwa perangkat dipasang dengan aman dan stabil pada kendaraan untuk menghindari getaran tambahan yang tidak diinginkan. Selain itu penempatan optimal perangkat di lokasi yang dapat mengukur getaran secara representatif, seperti di dekat roda atau pada sasis kendaraan. Berikutnya adalah pengujian dinamis dengan mengendarai kendaraan melalui rute yang telah ditentukan. Dalam pengujian ini kecepatan kendaraan yang konsisten perlu dipertahankan untuk mendapatkan data yang konsisten. Perangkat akan mengumpulkan data getaran dan guncangan secara real-time dan menyimpannya ke modul MicroSD. Jika memungkinkan, pantau data secara real-time menggunakan laptop untuk memastikan perangkat bekerja dengan baik. Gunakan GPS untuk mencatat lokasi setiap segmen jalan yang diuji, sehingga data getaran dapat dikaitkan dengan lokasi spesifik.

Setelah pengujian di lapangan selesai, dilakukan pengumpulan dan analisis data yang telah disimpan. Ekstrak data dari kartu MicroSD dan transfer ke komputer untuk analisis lebih lanjut. Lakukan pembersihan data untuk menghilangkan noise dan anomali yang tidak diinginkan.

Analisis data getaran untuk mengidentifikasi pola-pola yang menunjukkan kerusakan jalan. Gunakan perangkat lunak analisis data untuk memvisualisasikan dan menganalisis data. Verifikasi hasil analisis dilakukan dengan membandingkan hasil analisis dengan kondisi jalan yang sebenarnya. Hal ini dilakukan melalui inspeksi visual pada lokasi pengujian untuk memverifikasi jenis dan tingkat kerusakan yang terdeteksi oleh perangkat. Perlu untuk memastikan bahwa data yang dikumpulkan konsisten dengan observasi visual dan kondisi jalan yang sebenarnya. Langkah selanjutnya adalah mengevaluasi kinerja sistem berdasar hasil pengujian yang telah dilakukan. Langkah ini mencakup evaluasi akurasi perangkat dalam mendeteksi berbagai jenis kerusakan jalan, evaluasi reliabilitas perangkat dalam berbagai kondisi lingkungan dan kecepatan kendaraan, dan evaluasi konsumsi daya perangkat selama pengujian untuk memastikan bahwa sistem dapat beroperasi dalam waktu yang cukup lama dengan satu kali pengisian daya.

Langkah terakhir yang perlu dilakukan adalah dokumentasi dan pelaporan seluruh proses pengujian dan hasil yang diperoleh. Laporan Pengujian yang dibuat mencakup deskripsi metodologi, hasil pengujian, analisis data, dan kesimpulan. Dalam laporan ini juga perlu menyertakan rekomendasi untuk perbaikan dan pengembangan lebih lanjut berdasarkan temuan selama proses pengujian. Dengan mengikuti prosedur pengujian yang mendetail dan sistematis ini, dapat dipastikan bahwa sistem detektor kerusakan jalan portable bekerja secara efektif dan dapat diandalkan dalam kondisi nyata. Pengujian di lapangan memberikan informasi berharga tentang kinerja perangkat dan memungkinkan penyesuaian yang diperlukan untuk meningkatkan akurasi dan reliabilitas deteksi kerusakan jalan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

Pengujian detektor kerusakan jalan portable dilakukan di empat ruas jalan yang masing-masing mewakili tingkat kerusakan kondisi Jalan Mulus, Jalan dengan Retakan, Jalan Bergelombang, dan Jalan Berlubang. Hasil pengujian berupa data pembacaan sensor MPU6050 yang mencakup akselerasi (dalam sumbu X, Y, Z) dengan satuan gravitasi (g) dan rotasi sudut (dalam sumbu X, Y, Z) dengan satuan derajat per detik (°/s) pada setiap timestamp. Di dua baris terakhir setiap tabel tersebut terdapat hasil perhitungan nilai rerata dan deviasi baku dari 30 data untuk masing-masing bacaan sensor akselerometer dan giroskop sumbu X, Y, dan Z. Hasil pengujian ini ditampilkan secara tabular dalam Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4 sebagai berikut.

Tabel 1. Data bacaan sensor MPU6050 untuk kondisi Jalan Mulus

Timestamp	Akselerometer (g)			Giroskop (°/s)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0:00:01	0.01	0.02	0.98	0.08	0.05	0.01
0:00:02	0.01	0.01	0.98	0.08	0.05	0.01
0:00:03	0.01	0.00	0.97	0.07	0.05	0.03
0:00:04	0.02	0.01	0.99	0.06	0.04	0.02
0:00:05	0.01	0.01	0.97	0.05	0.06	0.02
0:00:06	0.01	0.02	0.98	0.07	0.05	0.02
0:00:07	0.01	0.00	0.98	0.06	0.06	0.01
0:00:08	0.01	0.01	0.98	0.08	0.06	0.03
0:00:09	0.00	0.01	0.98	0.07	0.05	0.01
0:00:10	0.01	0.02	0.98	0.08	0.05	0.03
0:00:11	0.01	0.01	0.98	0.07	0.06	0.03

0:00:12	0.00	0.02	0.98	0.08	0.05	0.00
0:00:13	0.01	0.01	0.99	0.06	0.06	0.02
0:00:14	0.00	0.02	0.98	0.06	0.06	0.02
0:00:15	0.01	0.02	0.97	0.07	0.05	0.02
0:00:16	0.03	0.02	0.99	0.08	0.06	0.01
0:00:17	0.00	0.02	0.97	0.05	0.04	0.05
0:00:18	0.01	0.03	0.98	0.07	0.05	0.02
0:00:19	0.02	0.01	0.97	0.08	0.05	0.02
0:00:20	0.01	0.02	0.98	0.06	0.05	0.03
0:00:21	0.01	0.01	0.98	0.07	0.06	0.01
0:00:22	0.00	0.02	0.98	0.09	0.06	0.02
0:00:23	0.01	0.01	0.99	0.08	0.04	0.02
0:00:24	0.00	0.00	0.98	0.06	0.05	0.02
0:00:25	0.02	0.02	0.97	0.08	0.05	0.02
0:00:26	0.01	0.01	0.97	0.08	0.05	0.01
0:00:27	0.01	0.03	0.98	0.08	0.05	0.02
0:00:28	0.01	0.03	0.97	0.07	0.04	0.01
0:00:29	0.00	0.01	0.98	0.07	0.05	0.03
0:00:30	0.02	0.02	0.99	0.08	0.05	0.02
rerata	0.0097	0.0155	0.9799	0.0700	0.0513	0.0189
std. deviasi	0.0066	0.0071	0.0061	0.0093	0.0050	0.0087

Tabel 2. Data Bacaan Sensor MPU6050 untuk Jalan dengan Retakan

Timestamp	Akselerometer (g)			Giroskop (°/s)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0:00:01	0.04	0.02	1.00	0.07	0.04	0.05
0:00:02	0.02	0.02	1.00	0.08	0.07	0.04
0:00:03	0.02	0.02	0.98	0.10	0.07	0.03
0:00:04	0.01	0.03	0.99	0.10	0.06	0.01
0:00:05	0.02	0.03	0.99	0.09	0.08	0.04
0:00:06	0.04	0.00	0.98	0.10	0.07	0.03
0:00:07	0.02	0.01	0.97	0.13	0.08	0.03
0:00:08	0.05	0.01	0.99	0.11	0.07	0.02
0:00:09	0.04	0.01	0.97	0.14	0.08	0.03
0:00:10	0.04	0.00	1.01	0.13	0.07	0.02
0:00:11	0.02	0.01	0.99	0.06	0.06	0.03
0:00:12	0.01	0.02	0.98	0.09	0.06	0.04
0:00:13	0.02	0.02	1.00	0.12	0.07	0.05
0:00:14	0.03	0.04	0.99	0.08	0.06	0.02
0:00:15	0.02	0.04	1.00	0.09	0.07	0.04
0:00:16	0.03	0.02	0.98	0.08	0.06	0.03
0:00:17	0.03	0.03	0.99	0.13	0.06	0.03
0:00:18	0.03	0.02	0.98	0.08	0.07	0.02

0:00:19	0.03	0.01	0.98	0.11	0.05	0.03
0:00:20	0.02	0.03	0.98	0.09	0.06	0.02
0:00:21	0.03	0.02	1.01	0.09	0.05	0.02
0:00:22	0.02	0.01	1.00	0.07	0.07	0.04
0:00:23	0.04	0.01	0.99	0.10	0.07	0.04
0:00:24	0.03	0.02	0.99	0.12	0.07	0.04
0:00:25	0.03	0.03	0.99	0.10	0.08	0.02
0:00:26	0.02	0.03	0.99	0.07	0.07	0.01
0:00:27	0.02	0.02	1.00	0.08	0.05	0.04
0:00:28	0.02	0.02	0.97	0.08	0.08	0.02
0:00:29	0.02	0.02	0.99	0.08	0.06	0.01
0:00:30	0.02	0.00	1.00	0.07	0.08	0.05
rerata	0.0269	0.0187	0.9904	0.0954	0.0670	0.0300
std. deviasi	0.0086	0.0091	0.0108	0.0211	0.0095	0.0102

Tabel 3. Data Bacaan Sensor MPU6050 untuk Jalan Bergelombang

Timestamp	Akselerometer (g)			Giroskop (°/s)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0:00:01	0.04	0.08	1.01	0.14	0.11	0.05
0:00:02	0.03	0.02	0.99	0.21	0.08	0.05
0:00:03	0.06	0.02	1.05	0.13	0.07	0.04
0:00:04	0.05	0.06	1.00	0.15	0.09	0.06
0:00:05	0.04	0.09	0.99	0.15	0.06	0.06
0:00:06	0.06	0.04	0.99	0.05	0.09	0.06
0:00:07	0.05	0.01	1.02	0.08	0.11	0.05
0:00:08	0.05	0.07	0.98	0.13	0.08	0.07
0:00:09	0.04	0.03	0.96	0.16	0.06	0.04
0:00:10	0.04	0.05	0.98	0.09	0.09	0.03
0:00:11	0.06	0.07	1.01	0.15	0.08	0.07
0:00:12	0.05	0.04	1.00	0.04	0.10	0.04
0:00:13	0.03	0.09	0.96	0.19	0.06	0.07
0:00:14	0.05	0.08	0.98	0.16	0.10	0.04
0:00:15	0.07	0.09	1.02	0.23	0.11	0.05
0:00:16	0.03	0.06	1.00	0.15	0.07	0.05
0:00:17	0.04	0.04	0.99	0.16	0.09	0.06
0:00:18	0.04	0.08	0.98	0.15	0.08	0.07
0:00:19	0.06	0.06	1.00	0.15	0.08	0.04
0:00:20	0.03	0.06	0.96	0.08	0.07	0.04
0:00:21	0.06	0.09	0.98	0.23	0.07	0.05
0:00:22	0.05	0.08	1.01	0.11	0.10	0.07
0:00:23	0.06	0.07	1.01	0.18	0.08	0.05
0:00:24	0.04	0.07	1.00	0.07	0.09	0.06
0:00:25	0.05	0.07	0.94	0.14	0.07	0.03

0:00:26	0.07	0.08	0.97	0.03	0.06	0.06
0:00:27	0.06	0.06	0.97	0.11	0.07	0.05
0:00:28	0.06	0.05	1.00	0.13	0.07	0.04
0:00:29	0.05	0.08	1.03	0.15	0.07	0.07
0:00:30	0.03	0.07	1.03	0.10	0.09	0.06
rerata	0.0488	0.0623	0.9930	0.1342	0.0812	0.0524
std. deviasi	0.0124	0.0223	0.0239	0.0508	0.0155	0.0127

Tabel 4. Data Bacaan Sensor MPU6050 untuk Jalan Berlubang

Timestamp	Akselerometer (g)			Giroskop (°/s)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0:00:01	0.07	0.17	1.03	0.36	0.02	0.01
0:00:02	0.10	0.18	1.09	0.22	0.17	0.15
0:00:03	0.03	0.06	1.05	0.25	0.14	0.18
0:00:04	0.05	0.10	1.12	0.22	0.09	0.08
0:00:05	0.17	0.09	1.16	0.25	0.09	0.13
0:00:06	0.19	0.24	1.23	0.30	0.07	0.01
0:00:07	0.10	0.09	1.23	0.40	0.09	0.19
0:00:08	0.04	0.08	1.12	0.12	0.14	0.28
0:00:09	0.08	0.10	1.10	0.38	0.12	0.07
0:00:10	0.10	0.21	1.14	0.21	0.02	0.00
0:00:11	0.11	0.08	1.09	0.27	0.08	0.06
0:00:12	0.07	0.08	1.18	0.34	0.21	0.01
0:00:13	0.06	0.11	1.10	0.24	0.16	0.02
0:00:14	0.05	0.09	1.04	0.19	0.07	0.11
0:00:15	0.07	0.02	1.04	0.42	0.18	0.14
0:00:16	0.06	0.07	0.98	0.35	0.07	0.07
0:00:17	0.08	0.09	1.00	0.49	0.09	0.21
0:00:18	0.10	0.06	1.10	0.31	0.01	0.07
0:00:19	0.11	0.04	1.18	0.27	0.07	0.03
0:00:20	0.13	0.06	1.09	0.33	0.02	0.10
0:00:21	0.08	0.12	1.07	0.32	0.21	0.07
0:00:22	0.14	0.07	1.11	0.25	0.17	0.21
0:00:23	0.14	0.07	1.12	0.26	0.06	0.09
0:00:24	0.13	0.12	1.02	0.23	0.11	0.08
0:00:25	0.03	0.12	1.18	0.29	0.08	0.17
0:00:26	0.05	0.02	1.04	0.40	0.04	0.15
0:00:27	0.04	0.21	1.02	0.43	0.02	0.07
0:00:28	0.11	0.15	1.28	0.24	0.10	0.05
0:00:29	0.02	0.12	0.91	0.34	0.12	0.03
0:00:30	0.13	0.14	1.20	0.29	0.12	0.04
rerata	0.0875	0.1057	1.1001	0.2996	0.0969	0.0959
dev. baku	0.0420	0.0531	0.0812	0.0790	0.0560	0.0698

3.2. Pembahasan

Bagian ini membahas analisis data sensor MPU6050 yang telah dikumpulkan selama pengujian lapangan. Tujuan analisis yang dilakukan adalah untuk mengidentifikasi jenis kerusakan yang terjadi. Langkah analisis ini diawali dengan segmentasi data untuk membagi data menjadi segmen-segmen data berdasarkan waktu atau jarak untuk analisis yang lebih mendetail. Termasuk dalam langkah ini adalah mengelompokkan subset data berdasar jenis kerusakan jalan dan berdasar jenis sumbu x, y, z menurut bacaan akselerometer dan giroskop. Subset data yang telah diklasifikasi ini diurutkan berdasar perolehan waktu timestamp dari waktu paling awal sampai waktu paling akhir di setiap subset data, yaitu bacaan akselerometer sumbu x, sumbu y, dan sumbu z, dan dilanjutkan dengan bacaan giroskop sumbu x, sumbu y, dan sumbu z, sehingga di setiap subset bacaan data tersebut terdiri atas 30 data bacaan berbeda waktu yang menempati masing-masing baris pada tabel, dan di setiap baris data bacaan ini tersusun dari 6 data bacaan sensor dalam waktu yang sama yang menempati setiap kolom dari tabel data.

Selanjutnya, perhitungan nilai rerata dan deviasi baku diterapkan kepada setiap kolom dari tabel data, sehingga diperoleh nilai rerata dan nilai deviasi baku dari akselerometer dan giroskop pada sumbu x, sumbu y, dan sumbu z. Nilai rerata dapat dimaknai sebagai suatu nilai konstan yang merupakan model data yang mewakili suatu subset data dan menjadi pusat sebaran data di subset tersebut. Semakin besar nilai rerata suatu subset data maka semakin besar pula nilai-nilai amplitudo atau magnitudo yang dimiliki oleh sampel data dalam subset data tersebut. Nilai rerata ini tidak cukup memadai untuk menjelaskan dinamika data yang terjadi dalam sampel data. Untuk ini maka nilai deviasi baku diperlukan. Nilai deviasi yang semakin kecil menyatakan dinamika data semakin konvergen ke nilai rerata, sementara nilai deviasi yang semakin besar menunjukkan dinamika data semakin dinamis dan menyebar di sekitar nilai rerata. Konsekuensi logis dari dinamika data konvergen adalah semakin kecil perubahan amplitudo atau magnitudo dari sampel data, dan sebaliknya dinamika data yang semakin menyebar di sekitar nilai rerata merupakan indikasi dari semakin besar perubahan amplitudo sampel data.

Sebagai pengingat untuk bahasan selanjutnya adalah bahwa bacaan akselerometer menurut datasheet MPU6050 memiliki nilai normal baku 0.98 untuk sumbu z dan normal baku 0.00 untuk sumbu x dan sumbu y. Untuk itu, berdasar perhitungan nilai rerata akselerometer sumbu x Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4 didapatkan nilai 0.0097, 0.0269, 0.0488, dan 0.0875. Terlihat sangat jelas bahwa peningkatan nilai rerata ini adalah bersesuaian dan mengikuti tingkatan kerusakan “Jalan Mulus”, “Jalan dengan Retakan”, “Jalan Bergelombang”, dan “Jalan Berlubang”. Fenomena yang mirip juga terlihat pada nilai rerata akselerometer sumbu y dan sumbu z, dan pada nilai rerata giroskop di masing-masing sumbu. Untuk kemudahan analisis dan penarikan kesimpulan maka perlu dikembangkan suatu besaran yang nilainya menyatakan kontribusi dari masing-masing variabel sumbu x, y, dan z yang dapat dijelaskan sebagai berikut. Dalam sistem koordinat kartesian tiga dimensi dikenal suatu besaran yang disebut jarak euclidean [24] antara dua titik (x_1, y_1, z_1) dan (x_2, y_2, z_2) yang disimbolkan ED dan dinyatakan secara matematis sebagai $ED = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$. Dalam kaitan ini, nilai rerata bacaan sensor MPU6050 yang terdiri atas akselerometer sumbu x, y dan z dapat dipandang sebagai suatu titik dalam sistem koordinat kartesian tiga dimensi yang memiliki jarak ED dengan titik nol sistem koordinat $(x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0)$. Dengan cara pandang ini maka untuk kondisi Jalan Mulus Tabel 1 memiliki nilai $(x_2, y_2, z_2) = (0.0097, 0.0155, 0.9799)$ dan nilai ED akselerometer untuk Tabel 1 dihitung sama dengan 0.98012. Dengan cara yang sama nilai ED akselerometer untuk Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4 secara urut dihitung sama dengan 0.99094, 0.99616, dan 1.10867. Kecenderungan yang mirip terlihat dalam hasil perhitungan ED giroskop Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4 secara urut sama dengan 0.08884, 0.12034, 0.16537, dan 0.32912, yang masing-masing secara urut mewakili kondisi Jalan Mulus, Jalan dengan Retakan, Jalan Bergelombang, dan Jalan Berlubang. Dari hasil ini dapat dinyatakan bahwa nilai ED berbanding lurus dengan tingkat kerusakan jalan. Semakin

besar nilai ED semakin besar tingkat kerusakan jalan, dan sebaliknya semakin kecil nilai ED semakin kecil pula tingkat kerusakan jalan yang terjadi.

Mengingat kembali pengertian deviasi baku di paragraf sebelumnya yang pada pokoknya menyatakan semakin kecil nilai deviasi baku maka dinamika data semakin konvergen ke nilai rerata, sementara nilai deviasi yang semakin besar menunjukkan dinamika data semakin dinamis dan menyebar melebar di sekitar nilai rerata. Pengertian ini mengkaitkan secara langsung antara nilai deviasi baku dan nilai rerata, sehingga fenomena yang terlihat melalui hasil perhitungan ED nilai rerata seharusnya juga terlihat pada perhitungan nilai ED deviasi baku. Untuk mengkonfirmasi ini, perhitungan nilai ED deviasi baku akselerometer untuk Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4 memberikan hasil masing-masing secara urut 0.01142, 0.01657, 0.03502, dan 0.10571. Sementara perhitungan nilai ED deviasi baku giroskop untuk setiap tabel memberikan hasil masing-masing secara urut 0.01369, 0.02528, 0.05459, dan 0.11938. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa nilai deviasi baku adalah berbanding lurus dengan tingkat kerusakan jalan. Semakin besar nilai deviasi baku semakin besar dan parah tingkat kerusakan jalan, sebaliknya semakin kecil nilai deviasi baku tersebut semakin kecil pula tingkat kerusakan jalan yang terjadi. Lebih jauh lagi dapat diamati bahwa terhadap interval nilai rerata [0.98012, 1.10867] dari hasil sebelumnya, interval nilai deviasi baku yang bersesuaian adalah [0.01142, 0.10571] menunjukkan persentase dinamika data di sekitar nilai rerata berada dalam interval [1.17%, 9.54%]. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi Jalan Mulus memberikan persentase guncangan bacaan nilai data sebesar 1.17% jauh sangat kecil dibanding dengan guncangan yang terjadi ketika melalui jalan dengan kondisi Jalan Berlubang yang memberikan persentase guncangan sebesar 9.54%. Fenomena yang mirip terlihat pada nilai rerata giroskop dalam interval [0.08884, 0.32912] dengan deviasi baku [0.01369, 0.11938] yang memberikan persentase dinamika data dalam interval [15.41%, 36.27%]. Dua interval persentase tersebut yang bersumber dari dinamika data bacaan akselerometer dan giroskop dapat secara simultan dipergunakan untuk pemeriksaan tingkat kerusakan jalan oleh alat detektor yang dikembangkan dalam penelitian ini.

4. KESIMPULAN

1. Alat Detektor Kerusakan Jalan Portable menggunakan ESP32, MPU6050, dan MicroSD telah selesai dikembangkan dalam penelitian ini.
2. Alat Detektor yang dikembangkan telah berfungsi dengan baik dan mampu mengukur tingkat kerusakan jalan dengan kategori kondisi Jalan Mulus, Jalan dengan Retakan, Jalan Bergelombang, dan Jalan Berlubang.
3. Hasil pengukuran tingkat kerusakan jalan berdasar hasil pengolahan data bacaan detektor dalam persentase adalah dalam interval [1.17%, 9.54%] untuk akselerometer, dan [15.41%, 36.27%] untuk giroskop.

5. SARAN

1. Perlu dilakukan pengujian lebih komprehensif lagi untuk jenis jalan yang lebih beragam baik di wilayah perkotaan, pedesaan, industri, pertanian dan perkebunan dalam rangka membangun basis data set yang lebih andal.
2. Penerapan teknologi buffering data perlu dielaborasi untuk melihat berbagai peluang pengolahan data tingkat lanjut secara real time.
3. Integrasi Modul GPS berpotensi dilakukan untuk menambah fitur data spasial maupun spasio-temporal pada detektor portabel yang dikembangkan.

REFERENSI

- [1] I. E. Álvarez-Cisneros, B. E. Carvajal-Gómez, D. Araujo-Díaz, M. A. Castillo-Martínez, and L. Méndez-Segundo, “Smart-Road: Road Damage Estimation Using a Mobile Device,” A. J. R. Neves and F. J. Gallegos-Funes, Eds., Rijeka: IntechOpen, 2021,

- p. Ch. 7. doi: 10.5772/intechopen.100289.
- [2] S. Huang, W. Tang, G. Huang, L. Huangfu, and D. Yang, “Weakly Supervised Patch Label Inference Networks for Efficient Pavement Distress Detection and Recognition in the Wild,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 24, no. 5, pp. 5216–5228, 2023, doi: 10.1109/TITS.2023.3245192.
- [3] H. Hashikami, R. Kobayashi, Y. Li, Y. Nakano, and M. Shigeno, “Safe Route Carpooling to Avoid Accident Locations and Small-Scale Proof of Concept in Japan,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. 53, no. 7, pp. 4239–4250, 2023, doi: 10.1109/TSMC.2023.3243720.
- [4] R. Meziane, S. Meguellati, and M. Messagier, “Precision inspection of transparent component quality,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 125, no. 3–4, pp. 1731–1741, 2023, doi: 10.1007/s00170-022-10774-3.
- [5] N. Chinthamu, S. Selvan, and V. Rajakumareswaran, “Automatic Detection of Road Cracks using EfficientNet with Residual U-Net-based Segmentation and YOLOv5-based Detection,” *Int. J. Recent Innov. Trends Comput. Commun.*, vol. 11, no. 4s, pp. 84–91, 2023, doi: 10.17762/ijritcc.v11i4s.6310.
- [6] D. Inácio, H. N. N. Oliveira, P. Oliveira, and P. Correia, “A Low-Cost Deep Learning System to Characterize Asphalt Surface Deterioration,” *Remote Sens.*, vol. 15, no. 6, p. 1701, 2023, doi: 10.3390/rs15061701.
- [7] I. U. Khan, K. S. Khattak, Z. H. Khan, and T. A. Gulliver, “Impact of Road Pavement Condition on Vehicular Free Flow Speed, Vibration and In-Vehicle Noise,” *Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 1, 2023, doi: 10.54327/set2023/v3.i1.48.
- [8] S. I. Sarsam and A. T. Abdulhameed, “Development of Pavement Maintenance Management System for Baghdad Urban Roadway Network,” *Mağallai al-handasaï*, vol. 20, no. 3, pp. 1–14, 2023, doi: 10.31026/j.eng.2014.03.01.
- [9] M. U. Hassan, O.-M. H. Steinnes, E. G. Gustafsson, S. Løken, and I. A. Hameed, “Predictive Maintenance of Norwegian Road Network Using Deep Learning Models,” *Sensors*, vol. 23, no. 6, p. 2935, 2023, doi: 10.3390/s23062935.
- [10] A. Kowsalya, “ROAD: Robotics-Assisted Onsite Data Collection and Deep Learning Enabled Robotic Vision System for Identification of Cracks on Diverse Surfaces,” *Sustainability*, vol. 15, no. 12, p. 9314, 2023, doi: 10.3390/su15129314.
- [11] B.-K. Park, J. R. Sayer, A. D. Clover, and M. P. Reed, “Longitudinal Degradation of Pavement Marking Detectability for Mobile LiDAR Sensing Technology in Real-World Use,” *Sensors*, vol. 23, no. 13, p. 5815, 2023, doi: 10.3390/s23135815.
- [12] Z. Didi and I. El Azami, “Monitoring of submersible pumps using ESP32 microcontroller and photovoltaic panels,” *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 30, no. 3, p. 1470, 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v30.i3.pp1470-1477.
- [13] D. E. M. Lorenzo, “Diseño de un caracterizador de medios isotermos basado en ESP32 y DS18B20 en el entorno de programación de Arduino,” *Innotec*, vol. 25, 2023, doi: 10.26461/25.05.
- [14] N. A. Pramono, B. A. Purwandani, O. Ghaisyani, and F. I. Sofyan, “Development a prototype of river water level monitoring system using ESP32 based on internet of things for flood mitigation,” *J. Phys.*, vol. 2498, no. 1, p. 12039, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2498/1/012039.
- [15] K. Lehniger and P. Langendörfer, “Through the Window: Exploitation and Countermeasures of the ESP32 Register Window Overflow,” *Futur. Internet*, vol. 15, no. 6, p. 217, 2023, doi: 10.3390/fi15060217.
- [16] J. M. Sultan, N. H. Zani, M. Azuani, S. Z. Ibrahim, and A. M. Yusop, “Analysis of Inertial Measurement Accuracy using Complementary Filter for MPU6050 Sensor,” *J. Kejuruter.*, vol. 34, no. 5, pp. 959–964, 2022, doi: 10.17576/jkukm-2022-34(5)-24.

- [17] C. Wang, X. Tu, Q. Yang, and T. Fang, "Movable Surface Rotation Angle Measurement System Using IMU," *Sensors*, vol. 22, no. 22, p. 8996, 2022, doi: 10.3390/s22228996.
- [18] Z. Li, Y. Deng, and W. Liu, "Identification of INS Sensor Errors from Navigation Data Based on Improved Pigeon-Inspired Optimization," *Drones*, vol. 6, no. 10, p. 287, 2022, doi: 10.3390/drones6100287.
- [19] V. V. H. Mudeng, I. M. Hakim, S. S. Suprpto, and S. Choe, "An Alternative Athlete Monitoring System Using Cost-Effective Inertial Sensing Instrumentation," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 17, pp. 3581–3592, 2022, doi: 10.1007/s42835-022-01258-1.
- [20] N. Takhtkeshha, A. Mohammadzadeh, and B. Salehi, "A Rapid Self-Supervised Deep-Learning-Based Method for Post-Earthquake Damage Detection Using UAV Data (Case Study: Sarpol-e Zahab, Iran)," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 1, p. 123, 2022, doi: 10.3390/rs15010123.
- [21] J. Braunfelds *et al.*, "Road Pavement Structural Health Monitoring by Embedded Fiber-Bragg-Grating-Based Optical Sensors," *Sensors*, vol. 22, no. 12, p. 4581, 2022, doi: 10.3390/s22124581.
- [22] H. Wu, M. Huang, Z. Wan, and Z. Xu, "Research on Bridge Damage Identification Based on WPE-MDS and HTF-SAPSO," *Buildings*, vol. 12, no. 8, p. 1089, 2022, doi: 10.3390/buildings12081089.
- [23] A. Kutlimuratov, J. Khamzaev, T. A. Kuchkorov, M. S. Anwar, and A. Choi, "Applying Enhanced Real-Time Monitoring and Counting Method for Effective Traffic Management in Tashkent," *Sensors*, vol. 23, no. 11, p. 5007, 2023, doi: 10.3390/s23115007.
- [24] P. Breiding, F. Sottile, and J. Woodcock, "Euclidean Distance Degree and Mixed Volume," *Found. Comput. Math.*, pp. 1–23, 2021, doi: 10.1007/S10208-021-09534-8.