Rancang Bangun Alat Ukur Ketebalan Aspal Dan Jarak Jalan Semi Otomatis Berbasis Arduino

Ashiddiqi Dzulqossalam[1]*,Misbah[2], Rini Puji Astutik[3]
Universitas Muhammadiyah Gresik
*e-mail: ashiddiqidzulqossalam@gmail.com

ABSTRAK

Pengendalian mutu pekerjaan jalan memerlukan pemeriksaan ketebalan lapisan dan panjang segmen secara konsisten, sedangkan pengukuran manual rentan terhadap kesalahan pembacaan, pencatatan terpisah, dan keterbatasan pencahayaan. Penelitian ini bertujuan merancang prototipe alat ukur semi otomatis berbasis Arduino yang mengintegrasikan pengukuran ketebalan, jarak tempuh, tampilan hasil, peringatan bunyi, dan penyimpanan data. Sistem menggunakan sensor inframerah/optocoupler pada roda untuk menghasilkan pulsa jarak, potensiometer geser untuk mengubah perpindahan mekanis menjadi tegangan ketebalan, LCD 20 × 4 sebagai antarmuka, buzzer sebagai indikator batas, serta modul microSD sebagai data logger. Pengembangan dilakukan melalui perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, kalibrasi terhadap meteran, kemudian pengujian lapangan di Jalan Dewi Sekardadu dan Jalan Operasional Semen, Kabupaten Gresik. Validasi ketebalan masih menggunakan media sirtu sehingga hasil belum mewakili seluruh kondisi lapisan aspal. Empat pengujian jarak menghasilkan galat relatif 0,55–9,09%, galat absolut rata-rata 0,113 m, dan galat persentase absolut rata-rata 4,05%. Empat pengujian ketebalan pada 3, 4, 5, dan 7 cm menunjukkan galat 0% terhadap pembacaan manual. Buzzer aktif pada ketebalan 4 cm atau kurang, sedangkan seluruh data dapat ditampilkan dan disimpan. Prototipe berfungsi sesuai rancangan untuk pengukuran awal, tetapi masih memerlukan penyempurnaan mekanik, kalibrasi pada berbagai permukaan, GPS, dan penyimpanan berbasis web sebelum digunakan sebagai instrumen inspeksi lapangan.

Kata kunci: Arduino; Data Logger; Ketebalan Aspal; Sensor Inframerah; Sistem Pengukuran

ABSTRACT

Roadwork quality control requires consistent checks of layer thickness and segment length, while manual measurement is susceptible to reading errors, separate record keeping, and limited lighting. This study developed a semi-automatic Arduino-based prototype integrating thickness measurement, travelled-distance measurement, result display, audible warning, and data storage. The system employed an infrared/optocoupler sensor on the wheel to generate distance pulses, a slide potentiometer to convert mechanical displacement into a thickness-related voltage, a 20 × 4 LCD as the interface, a buzzer as the threshold indicator, and a microSD module as the data logger. Development comprised hardware and software design, calibration against a measuring tape, and field testing on Dewi Sekardadu Road and the Cement Operational Road in Gresik Regency. Thickness validation was still conducted on sand–gravel material; therefore, the findings do not yet represent all asphalt-layer conditions. Four distance tests produced relative errors of 0.55–9.09%, a mean absolute error of 0.113 m, and a mean absolute percentage error of 4.05%. Four thickness tests at 3, 4, 5, and 7 cm showed 0% error against manual readings. The buzzer was activated at thicknesses of 4 cm or less, while all readings could be displayed and stored. The prototype operated as designed for preliminary measurement, but mechanical refinement, calibration on various surfaces, GPS integration, and web-based storage are required before field inspection use.

Keywords: *Arduino; Asphalt Thickness; Data Logger; Infrared Sensor; Measurement System*

PENDAHULUAN

Ketebalan lapisan merupakan salah satu parameter penting dalam pengendalian mutu perkerasan karena berkaitan dengan kesesuaian pekerjaan terhadap rancangan, volume material, dan kemampuan struktur menerima beban. Spesifikasi pekerjaan jalan mensyaratkan pengendalian dimensi, bahan, pelaksanaan, dan hasil akhir secara terdokumentasi (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020). Pengukuran ketebalan campuran beraspal yang telah dipadatkan juga diatur melalui prosedur standar pada benda uji atau sampel lapangan (ASTM International, 2023), sedangkan pengambilan sampelnya perlu mengikuti tata cara yang menjamin keterwakilan lokasi pemeriksaan (ASTM International, 2021).

Pada kegiatan inspeksi lapangan, ketebalan umumnya diverifikasi menggunakan alat manual setelah lapisan dapat diakses, sedangkan panjang ruas dicatat menggunakan meteran atau perangkat terpisah. Cara tersebut sederhana, tetapi ketelitian hasil sangat dipengaruhi posisi alat, keterampilan operator, kondisi permukaan, pencahayaan, dan konsistensi pencatatan. Kebutuhan pengukuran ruas yang mudah diulang juga sejalan dengan kegiatan evaluasi lingkungan jalan yang memerlukan data geometrik dan kondisi lapangan

secara sistematis (Tanan, Wibowo and Tinumbia, 2017). Oleh karena itu, integrasi sensor, pengolah data, antarmuka, dan media penyimpanan berpotensi mengurangi tahapan manual serta mempercepat dokumentasi.

Platform mikrokontroler terbuka memberi peluang untuk membangun instrumen khusus dengan biaya terjangkau dan rancangan yang dapat dikembangkan kembali. Peralatan berbasis perangkat keras terbuka dapat disesuaikan dengan kebutuhan eksperimen dan memperluas akses terhadap sistem pengukuran (Pearce, 2012). Arduino banyak digunakan karena menyediakan mikrokontroler, pin masukan-keluaran digital dan analog, serta lingkungan pemrograman yang relatif mudah diintegrasikan dengan sensor dan aktuator (Arduino, 2024). Penggunaan perangkat terbuka juga dinilai dapat menekan biaya pengembangan instrumen, meningkatkan fleksibilitas, dan memudahkan reproduksi rancangan (Fisher and Gould, 2012).

Sejumlah penelitian telah memanfaatkan mikrokontroler untuk pengukuran panjang, jarak, atau perpindahan. (Yudha and Sani, 2017) menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai sensor jarak pada sistem parkir, sedangkan (Pasaribu, 2017) mengembangkan alat ukur ketebalan kayu berbasis sensor ultrasonik dan Arduino. Optocoupler juga telah diterapkan untuk menghitung pulsa pada alat ukur pemakaian energi listrik (Subito and Rizal, 2012). Untuk perpindahan linear, potensiometer geser dapat digunakan sebagai transduser karena perubahan posisi menghasilkan perubahan tegangan yang dapat dibaca mikrokontroler (Ulfa, Pauzi and Warsito, 2016). Temuan tersebut menunjukkan bahwa pengukuran jarak dan perpindahan dapat dibangun dengan sensor sederhana apabila mekanisme, kalibrasi, dan pengolahan sinyal dirancang secara tepat.

Penyimpanan hasil merupakan bagian penting dari sistem pengukuran portabel. Kajian data logger menekankan perlunya kesesuaian kapasitas penyimpanan, interval pencatatan, konsumsi daya, dan keandalan media (Badhiye, Chatur and Wakode, 2011). (Fuentes *et al.*, 2014) menunjukkan bahwa Arduino dapat digunakan sebagai dasar data logger otonom yang akurat dan berbiaya rendah. Kerangka kendali instrumen berbasis Arduino juga dapat dipadukan dengan antarmuka perangkat lunak (Koenka, Sáiz and Hauser, 2014), sedangkan sistem open-hardware lain memperlihatkan kemampuan pencatatan jarak jauh dan pemantauan berkelanjutan (Asinelli *et al.*, 2018). Pada aplikasi bergerak, sistem akuisisi berbiaya rendah telah digunakan untuk dinamika kendaraan (González, Olazagoitia and Vinolas, 2018), perekaman seismik (Soler-Llorens *et al.*, 2016), pemantauan kondisi perkerasan (Loperfido and others, 2023), dan analisis dinamika vertikal kendaraan (de Souto *et al.*, 2023).

Antarmuka LCD memudahkan operator memeriksa hasil secara langsung. Integrasi Arduino dengan komunikasi I2C dan LCD telah diterapkan pada sistem kendali otomatis (Akinwole and Oladimeji, 2018). Kestabilan catu daya juga perlu diperhatikan karena sensor, LCD, modul penyimpanan, dan buzzer bekerja pada rentang tegangan tertentu; rancangan catu variabel berbasis Arduino menunjukkan bahwa regulasi tegangan merupakan bagian penting dalam menjaga kinerja rangkaian (Nurlana, 2019).

Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini merancang alat ukur ketebalan lapisan dan jarak jalan secara semi otomatis. Kebaruan praktis sistem terletak pada penggabungan dua fungsi pengukuran dalam satu prototipe beroda, dilengkapi tampilan LCD, peringatan batas ketebalan, dan penyimpanan pada microSD. Penelitian bertujuan mengevaluasi fungsi setiap subsistem, membandingkan hasil pembacaan dengan alat ukur manual, menghitung galat, serta mengidentifikasi keterbatasan prototipe sebagai dasar pengembangan instrumen inspeksi berikutnya.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan rancang bangun dan pengujian eksperimental. Tahap kerja meliputi identifikasi kebutuhan, perancangan mekanik dan elektronik, penyusunan program, kalibrasi sensor, integrasi sistem, pengujian fungsional, pengambilan data lapangan, dan evaluasi galat. Prototipe bersifat semi otomatis karena operator masih mendorong alat dan menempatkan batang pengukur pada media, sedangkan pembacaan, penentuan status, tampilan, serta penyimpanan dilakukan oleh sistem.

Pengujian jarak dilaksanakan di Jalan Operasional Semen dan Jalan Dewi Sekardadu, Kabupaten Gresik. Pengujian ketebalan dilakukan pada media sirtu sebagai simulasi lapisan yang dapat ditembus batang pengukur. Pemilihan media ini memungkinkan evaluasi awal mekanisme potensiometer, tetapi tidak digunakan untuk menyimpulkan kinerja alat pada aspal padat. Setiap pembacaan alat dibandingkan dengan meteran sebagai acuan.

Arsitektur dan Komponen Sistem

Penelitian ini menggunakan pendekatan rancang bangun yang dipadukan dengan pengujian eksperimental. Pendekatan rancang bangun digunakan untuk menghasilkan prototipe alat ukur jarak dan

ketebalan lapisan berbasis mikrokontroler, sedangkan pengujian eksperimental dilakukan untuk mengetahui fungsi, ketelitian, dan tingkat galat alat setelah seluruh komponen terintegrasi. Proses penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan, yaitu identifikasi kebutuhan sistem, perancangan mekanik dan elektronik, penyusunan program, kalibrasi sensor, integrasi komponen, pengujian fungsional, pengambilan data lapangan, serta evaluasi hasil pengukuran.

Tahap identifikasi kebutuhan dilakukan dengan menentukan fungsi utama alat, jenis data yang harus dihasilkan, komponen yang diperlukan, serta kondisi penggunaan di lapangan. Hasil identifikasi tersebut digunakan sebagai dasar dalam merancang struktur mekanik, rangkaian elektronik, dan alur kerja perangkat lunak. Perancangan mekanik mencakup rangka alat, roda pengukur, batang penetrasi, serta mekanisme penghubung antara batang pengukur dan potensiometer geser. Sementara itu, perancangan elektronik meliputi hubungan antara Arduino Uno, sensor inframerah, potensiometer, LCD, buzzer, modul microSD, sumber daya, dan regulator tegangan.

Setelah rancangan mekanik dan elektronik selesai, tahap berikutnya adalah penyusunan program pada Arduino Uno. Program dirancang untuk membaca pulsa dari sensor inframerah, mengolah nilai analog dari potensiometer, mengonversi data sensor menjadi nilai jarak dan ketebalan, menentukan status hasil pengukuran, menampilkan informasi pada LCD, mengaktifkan buzzer, serta menyimpan data ke dalam kartu microSD. Program juga memuat konstanta kalibrasi yang diperoleh melalui pembandingan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur acuan.

Kalibrasi dilakukan sebelum alat digunakan pada pengujian lapangan. Sensor jarak dikalibrasi dengan membandingkan jumlah pulsa yang dihasilkan oleh putaran roda terhadap jarak aktual yang diukur menggunakan meteran. Sementara itu, potensiometer dikalibrasi dengan membandingkan perubahan nilai analog terhadap perpindahan batang pengukur dalam satuan sentimeter. Hasil kalibrasi digunakan untuk memperoleh persamaan konversi sehingga keluaran sensor dapat diterjemahkan menjadi nilai pengukuran yang sesuai.

Setelah proses kalibrasi selesai, seluruh komponen diintegrasikan menjadi satu sistem. Pengujian fungsional dilakukan untuk memastikan bahwa setiap komponen dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang direncanakan. Pengujian meliputi respons sensor inframerah terhadap putaran roda, perubahan nilai potensiometer saat batang pengukur bergerak, ketepatan tampilan LCD, fungsi peringatan buzzer, keberhasilan penyimpanan data pada microSD, serta kestabilan catu daya selama alat digunakan.

Prototipe yang dikembangkan termasuk dalam kategori semiotomatis. Operator masih berperan dalam mendorong alat sepanjang lintasan dan menempatkan batang pengukur pada media yang diuji. Meskipun demikian, proses pembacaan sensor, pengolahan data, penentuan status ketebalan, penyajian informasi pada LCD, aktivasi buzzer, dan penyimpanan data telah dilakukan secara otomatis oleh sistem. Karakteristik tersebut memungkinkan pekerjaan pengukuran menjadi lebih cepat dan terstruktur dibandingkan pencatatan secara manual, meskipun alat masih memerlukan keterlibatan operator dalam proses pemindahan dan penetrasi batang pengukur.

Pengujian jarak dilakukan di Jalan Operasional Semen dan Jalan Dewi Sekardadu, Kabupaten Gresik. Kedua lokasi tersebut dipilih untuk memberikan kondisi lintasan yang berbeda selama proses pengukuran. Dalam setiap pengujian, alat didorong mengikuti lintasan yang telah ditentukan, kemudian hasil pembacaan jarak pada LCD dibandingkan dengan jarak aktual yang diukur menggunakan meteran. Perbandingan ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pengukuran, besarnya selisih, dan persentase galat alat.

Pengujian ketebalan dilakukan menggunakan media sirtu sebagai simulasi lapisan yang dapat ditembus oleh batang pengukur. Media tersebut dipilih karena memungkinkan pengujian awal terhadap mekanisme batang penetrasi dan respons potensiometer geser. Ketika batang ditekan ke dalam media, perubahan kedalaman penetrasi menyebabkan posisi potensiometer berubah dan menghasilkan perubahan tegangan analog. Nilai tersebut kemudian dikonversi oleh Arduino menjadi nilai ketebalan dalam satuan sentimeter.

Penggunaan sirtu dalam penelitian ini hanya ditujukan untuk mengevaluasi kinerja awal mekanisme pengukuran ketebalan. Oleh karena itu, hasil pengujian tidak digunakan untuk menyimpulkan kemampuan alat dalam mengukur ketebalan aspal padat secara langsung. Karakteristik kepadatan, kekerasan, dan ketahanan penetrasi sirtu berbeda dengan lapisan aspal, sehingga penerapan alat pada perkerasan aspal memerlukan pengembangan mekanisme pengukuran dan pengujian lanjutan. Setiap hasil pembacaan ketebalan tetap dibandingkan dengan pengukuran manual menggunakan meteran sebagai acuan untuk menentukan selisih dan tingkat galat.

Arsitektur dan Komponen Sistem

Pengendali utama pada prototipe yang telah dirakit adalah Arduino Uno berbasis mikrokontroler ATmega328P. Arduino berfungsi sebagai pusat pemrosesan yang menerima data dari sensor, melakukan perhitungan, mengendalikan perangkat keluaran, dan menyimpan hasil pengukuran. Pemilihan Arduino Uno didasarkan pada kemudahan pemrograman, ketersediaan pin masukan dan keluaran, serta kemampuannya dalam mengintegrasikan beberapa modul dalam satu sistem.

Sensor inframerah atau optocoupler digunakan untuk mengukur jarak tempuh alat. Sensor membaca perubahan penanda yang dipasang pada roda dan menghasilkan pulsa setiap kali penanda melewati area pembacaan. Jumlah pulsa yang terdeteksi dihitung oleh Arduino, kemudian dikonversi menjadi jarak berdasarkan keliling roda dan jumlah penanda yang digunakan. Semakin banyak putaran roda, semakin besar jumlah pulsa yang diterima dan semakin panjang jarak yang dihitung oleh sistem.

Pengukuran ketebalan dilakukan menggunakan potensiometer geser yang dikopel dengan batang mekanik. Pergerakan batang pengukur menyebabkan posisi penggeser potensiometer berubah sehingga menghasilkan perubahan tegangan analog. Nilai tegangan tersebut dibaca oleh pin analog Arduino dan dikonversi menjadi kedalaman penetrasi berdasarkan persamaan kalibrasi. Dengan mekanisme ini, perubahan posisi batang dapat diterjemahkan menjadi nilai ketebalan media yang diukur.

LCD berukuran 20 × 4 karakter digunakan sebagai antarmuka utama antara alat dan pengguna. Layar menampilkan informasi lokasi pengujian, jarak tempuh, nilai ketebalan, dan status hasil pengukuran. Penyajian informasi secara langsung membantu operator memantau kinerja alat dan mengetahui hasil pengukuran tanpa harus membuka data penyimpanan terlebih dahulu.

Buzzer digunakan sebagai indikator peringatan apabila hasil pengukuran ketebalan berada pada atau di bawah batas 4 cm. Setelah nilai ketebalan diperoleh, Arduino membandingkannya dengan batas yang telah ditetapkan dalam program. Apabila hasil pengukuran memenuhi kondisi peringatan, buzzer akan diaktifkan untuk memberikan sinyal suara kepada operator. Fitur ini memudahkan identifikasi cepat terhadap bagian media yang memiliki ketebalan di bawah kriteria.

Modul microSD berfungsi menyimpan hasil pengukuran dalam bentuk rekaman data. Informasi yang disimpan dapat meliputi lokasi pengujian, nilai jarak, nilai ketebalan, dan status hasil pengukuran. Penyimpanan digital memungkinkan data ditinjau kembali, diolah, dan digunakan untuk analisis lebih lanjut. Fitur ini juga mengurangi risiko kehilangan data akibat kesalahan pencatatan manual.

Sumber daya sistem berasal dari baterai 18650 yang dihubungkan dengan regulator tegangan. Baterai menyediakan energi listrik agar alat dapat digunakan secara portabel di lapangan, sedangkan regulator menjaga tegangan keluaran tetap sesuai dengan kebutuhan Arduino dan komponen lainnya. Kestabilan catu daya diperlukan agar pembacaan sensor, tampilan LCD, penyimpanan data, dan fungsi peringatan dapat berlangsung secara konsisten.

Ringkasan jenis, fungsi, dan peran setiap komponen disajikan pada Tabel 1, sedangkan bentuk fisik serta susunan prototipe ditampilkan pada Gambar 1. Kedua penyajian tersebut memberikan gambaran mengenai hubungan antara rancangan konseptual dan implementasi alat yang digunakan dalam pengujian.

Tabel 1. Komponen utama prototipe dan fungsinya

Komponen	Spesifikasi utama	Fungsi
Arduino Uno	ATmega328P; 5 V; 14 pin digital; 6 pin analog	Mengolah masukan sensor dan mengendalikan keluaran
Sensor inframerah/optocoupler	Keluaran pulsa digital	Mendeteksi putaran roda untuk perhitungan jarak
Potensiometer geser	Keluaran analog 0–5 V	Mengubah perpindahan mekanis menjadi nilai ketebalan
LCD I2C	20 karakter × 4 baris	Menampilkan hasil dan status pengukuran
Modul microSD	Komunikasi SPI	Menyimpan hasil pengukuran secara lokal
Buzzer	Tegangan kerja 4–8 V DC	Memberikan peringatan ketebalan ≤ 4 cm
DIP switch/push button	Masukan digital	Memilih fungsi dan mengendalikan proses
Baterai dan regulator	Baterai 18650; keluaran teratur	Menyuplai daya ke seluruh rangkaian



Gambar 1. Komponen utama sistem pengukuran

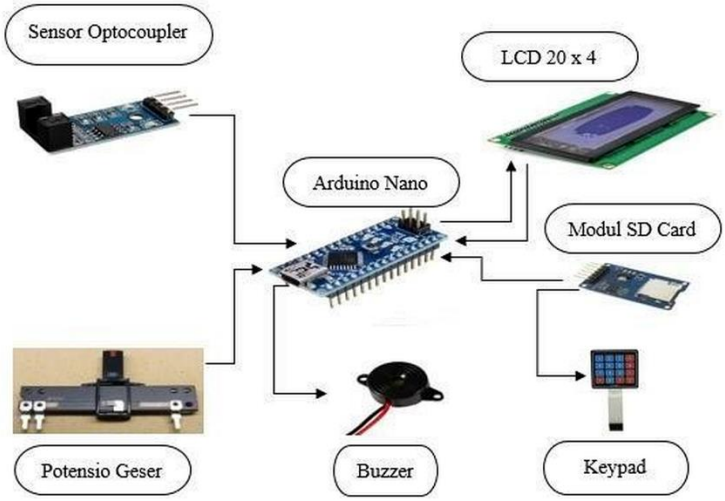
Hubungan antarkomponen sistem ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem dirancang dengan Arduino sebagai pusat pengendali yang menerima, mengolah, dan meneruskan data dari setiap komponen. Sensor inframerah berfungsi mendeteksi keberadaan atau posisi objek dan menghasilkan sinyal digital, sedangkan potensiometer menghasilkan sinyal analog yang merepresentasikan perubahan posisi mekanis pada alat ukur. Kedua sinyal tersebut diterima melalui pin masukan Arduino untuk selanjutnya diproses berdasarkan algoritma yang telah ditanamkan dalam program. Nilai analog yang diperoleh dari potensiometer terlebih dahulu dibaca melalui fasilitas *analog-to-digital converter* pada Arduino, sedangkan sinyal digital dari sensor inframerah digunakan sebagai penanda dimulainya proses pengukuran atau sebagai konfirmasi keberadaan objek.

Data mentah yang diterima Arduino kemudian dikonversi menggunakan persamaan dan konstanta kalibrasi yang diperoleh dari hasil perbandingan dengan alat ukur standar. Proses kalibrasi diperlukan untuk mengubah nilai keluaran sensor menjadi nilai jarak dan ketebalan dalam satuan pengukuran yang dapat dipahami pengguna. Setelah proses perhitungan selesai, hasil pengukuran ditampilkan secara langsung pada layar LCD sehingga pengguna dapat mengetahui nilai jarak dan ketebalan tanpa melakukan perhitungan secara manual. Tampilan tersebut juga membantu pengguna memantau proses pengukuran secara waktu nyata dan memastikan bahwa objek telah ditempatkan pada posisi yang sesuai.

Selain ditampilkan pada LCD, hasil pengukuran secara otomatis disimpan pada kartu microSD. Penyimpanan ini dilakukan untuk menyediakan dokumentasi data yang dapat digunakan dalam proses evaluasi, pengujian akurasi, dan analisis hasil pengukuran. Data yang tersimpan dapat mencakup nilai jarak, ketebalan, nomor pengukuran, serta informasi lain yang telah ditentukan dalam program. Fitur penyimpanan tersebut mengurangi risiko kehilangan data dan memudahkan pengguna melakukan penelusuran kembali terhadap hasil pengukuran sebelumnya.

Buzzer digunakan sebagai indikator peringatan apabila nilai ketebalan berada di luar batas yang telah ditentukan. Arduino membandingkan nilai hasil pengukuran dengan nilai ambang yang tersimpan dalam program. Apabila ketebalan objek lebih kecil atau lebih besar daripada batas toleransi, Arduino akan mengaktifkan buzzer sebagai tanda bahwa objek tidak memenuhi kriteria yang ditetapkan. Sebaliknya, buzzer tidak diaktifkan apabila nilai ketebalan masih berada dalam rentang yang diizinkan. Dengan demikian, buzzer membantu pengguna melakukan identifikasi awal terhadap ketidaksesuaian hasil pengukuran secara cepat.

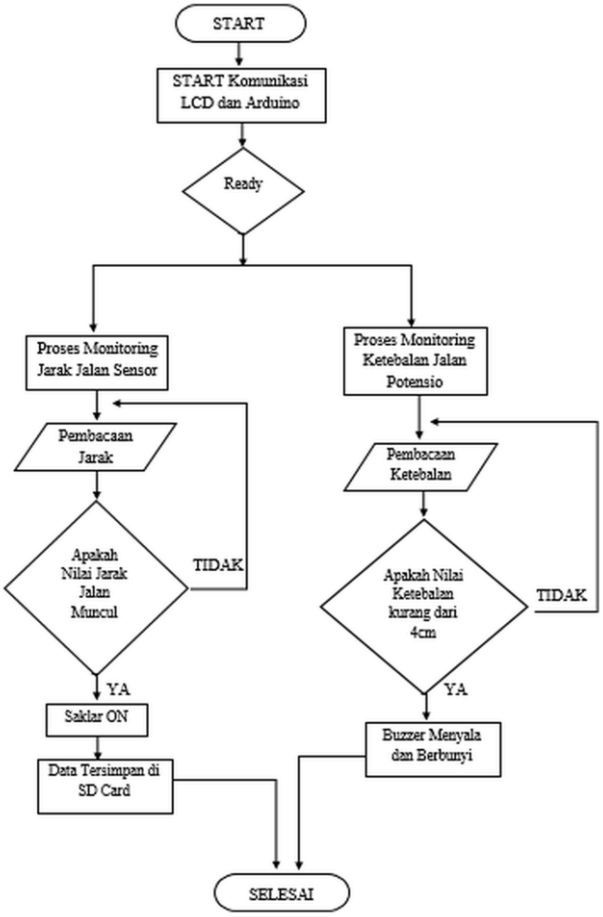
Diagram rancangan awal mencantumkan penggunaan Arduino Nano sebagai pusat kendali, sedangkan prototipe yang direalisasikan dan diuji menggunakan Arduino Uno. Perubahan jenis papan mikrokontroler tersebut dilakukan berdasarkan pertimbangan ketersediaan perangkat, kemudahan perakitan, dan akses terhadap pin masukan serta keluaran. Meskipun memiliki perbedaan dalam dimensi fisik dan tata letak pin, Arduino Nano dan Arduino Uno menggunakan mikrokontroler dengan kemampuan pengolahan yang relatif setara untuk kebutuhan sistem ini. Keduanya menyediakan pin digital, pin analog, komunikasi serial, serta kapasitas pemrosesan yang memadai untuk menghubungkan sensor inframerah, potensiometer, LCD, modul microSD, dan buzzer. Oleh karena itu, penggunaan Arduino Uno pada prototipe tidak mengubah prinsip kerja, alur pemrosesan data, maupun fungsi utama sistem yang telah dirancang.



Gambar 2. Diagram blok sistem pengukuran

Perangkat Lunak dan Alur Kerja

Program dibuat pada Arduino IDE. Setelah catu daya diaktifkan, sistem menginisialisasi LCD, pin sensor, pembacaan analog, buzzer, dan modul microSD. Operator memilih mode pengukuran, kemudian sistem menghitung pulsa jarak atau membaca tegangan potensiometer. Nilai yang telah dikonversi ditampilkan, diberi status sesuai batas, dan disimpan. Apabila inisialisasi penyimpanan gagal, hasil tetap dapat ditampilkan tetapi pencatatan lokal harus diulangi setelah media diperiksa. Alur proses diringkas pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir proses pengukuran

Kalibrasi dan Analisis Galat

Kalibrasi jarak dilakukan secara empiris dengan menjalankan prototipe pada panjang acuan dan menyesuaikan konstanta jumlah pulsa per meter. Pendekatan empiris dipilih karena jarak efektif dipengaruhi diameter roda, posisi penanda, jumlah pulsa setiap putaran, slip, serta ketidakrataan permukaan. Kalibrasi ketebalan dilakukan dengan menghubungkan tegangan analog potensiometer terhadap perpindahan batang

yang dibaca menggunakan meteran. Data pengujian menunjukkan hubungan linear sekitar 1,43 cm per volt pada rentang 3–7 cm.

Galat dihitung terhadap pembacaan manual. Penggunaan nilai acuan, satuan, dan pembulatan mengikuti prinsip umum pelaporan hasil pengukuran dan ketidakpastian (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008). Rumus galat relatif yang digunakan adalah:

$$\text{Galat relatif (\%)} = |x_{alat} - x_{acuan}| / x_{acuan} \times 100\% \quad (1)$$

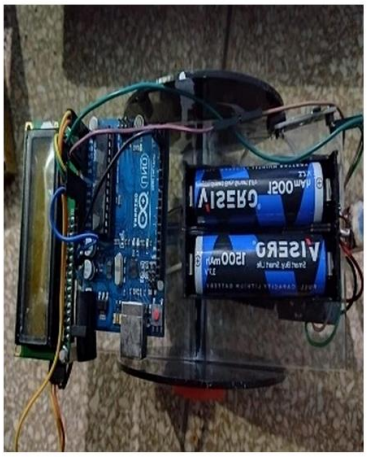
Selain galat tiap pengujian, kinerja jarak diringkas menggunakan mean absolute error (MAE) dan mean absolute percentage error (MAPE). Fungsi sistem dinyatakan berhasil apabila sensor terbaca, nilai muncul pada LCD, data tersimpan pada microSD, dan buzzer merespons sesuai ambang yang ditetapkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

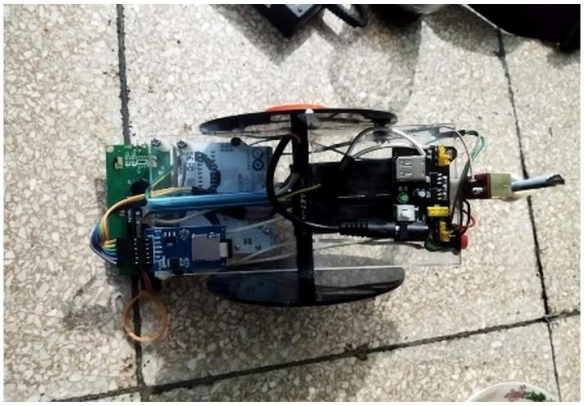
Realisasi Prototipe

Prototipe berhasil dirakit pada rangka beroda dengan komponen elektronik ditempatkan di bagian atas dan mekanisme potensiometer berada di sisi alat. Susunan tersebut memungkinkan roda menghasilkan pulsa saat alat didorong, sementara batang pengukur dapat digerakkan secara vertikal ke media. Tampak prototipe terakit disajikan pada Gambar 4. Sistem dapat diaktifkan menggunakan baterai 18650 dan regulator, menjalankan LCD, membaca sensor, mengendalikan buzzer, serta mengakses modul microSD.

Dari sisi penggunaan, penggabungan pengukuran jarak dan ketebalan mengurangi kebutuhan membawa dua perangkat pencatatan. Meskipun demikian, posisi terbuka pada rangka membuat kabel dan modul masih rentan terhadap debu, kelembapan, benturan, dan pergeseran konektor. Casing tertutup, pengikat kabel, konektor berpengunci, dan batang pengukur yang lebih kaku diperlukan agar alat layak untuk kondisi proyek.



(a) Tampak atas komponen utama



(b) Tampak mekanisme pengukuran

Gambar 4. Prototipe terakit dan mekanisme pengukuran

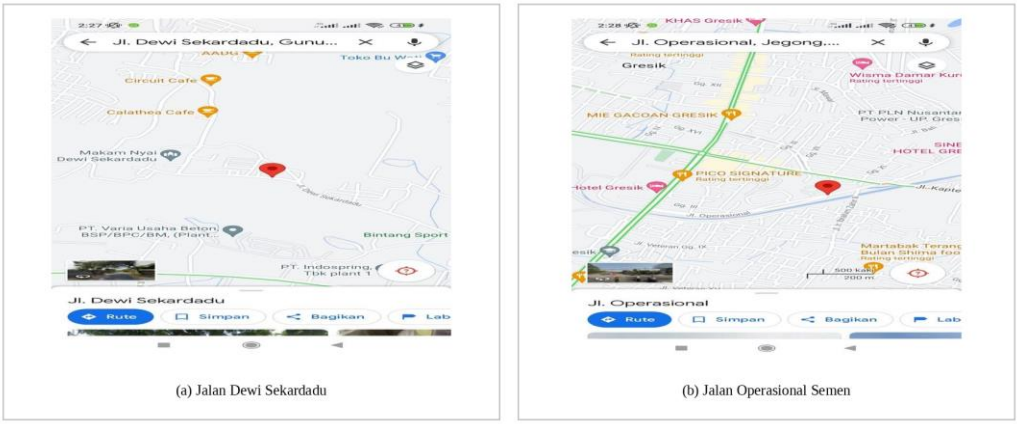
Lokasi Pengujian

Pengujian prototipe dilaksanakan pada dua lokasi yang memiliki karakteristik lintasan berbeda, yaitu Jalan Dewi Sekardadu dan Jalan Operasional Semen, Kabupaten Gresik. Pemilihan kedua lokasi tersebut bertujuan memperoleh variasi kondisi permukaan, panjang lintasan, dan kebutuhan pengukuran sehingga kinerja alat dapat dievaluasi pada lebih dari satu kondisi operasional. Jalan Dewi Sekardadu digunakan sebagai lokasi pengujian jarak dengan lintasan yang relatif lebih panjang. Lokasi ini memungkinkan pengamatan terhadap kestabilan pembacaan sensor, konsistensi perhitungan jarak, dan kemampuan sistem dalam menyimpan data selama alat bergerak pada lintasan yang lebih luas. Selain pengujian jarak, pada lokasi tersebut juga dilakukan pengujian ketebalan menggunakan media sirtu sebagai media simulasi yang dapat ditembus oleh batang pengukur. Penggunaan sirtu ditujukan untuk mengevaluasi respons mekanik batang pengukur dan perubahan nilai potensiometer ketika kedalaman penetrasi berbeda.

Jalan Operasional Semen digunakan untuk pengujian pada lintasan yang lebih pendek. Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi respons awal alat, ketepatan pembacaan jarak pada perpindahan yang terbatas, serta kesesuaian antara hasil pengukuran prototipe dan alat ukur pembanding. Perbedaan panjang lintasan

pada kedua lokasi memberikan gambaran mengenai kemampuan prototipe dalam melakukan pengukuran pada skala pengujian yang bervariasi. Lokasi pelaksanaan pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.

Pada tahap pengembangan ini, informasi lokasi pengujian masih dicatat secara manual dalam bentuk teks pada lembar pengamatan dan data hasil pengukuran. Prototipe belum dilengkapi modul *Global Positioning System* (GPS), sehingga sistem belum dapat merekam koordinat geografis, menampilkan posisi pengujian secara otomatis, maupun menghubungkan setiap hasil pengukuran dengan titik lokasi tertentu. Kondisi tersebut menjadi salah satu keterbatasan prototipe karena penelusuran kembali lokasi pengukuran masih bergantung pada catatan operator. Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan dengan mengintegrasikan modul GPS agar data jarak dan ketebalan dapat dilengkapi informasi koordinat, waktu pengambilan data, serta pemetaan titik pengujian secara lebih akurat dan terdokumentasi.

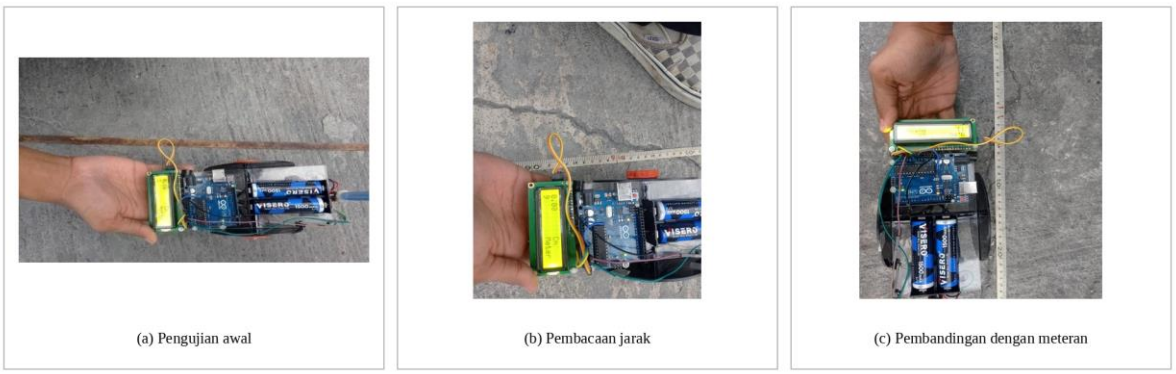


(a) Jalan Dewi Sekardadu (b) Jalan Operasional Semen

Gambar 5. Lokasi pengujian prototipe

Pengujian Jarak Jalan

Pengujian sensor inframerah dilakukan dengan mendorong alat sepanjang lintasan, mencatat hasil yang tampil pada LCD, kemudian membandingkannya dengan meteran. Rangkaian proses ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil perhitungan pada Tabel 2 menggunakan kembali data mentah naskah dan memperbaiki persentase galat yang sebelumnya tidak konsisten dengan selisih hasil pengukuran.



(a) Pengujian awal (b) Pembacaan jarak (c) Pembandingan dengan meteran

Gambar 6. Proses pengujian jarak menggunakan sensor inframerah

Tabel 2. Hasil pengujian jarak jalan

No.	Lokasi	Hasil alat (m)	Acuan manual (m)	Selisih (m)	Galat (%)
1	Jalan Operasional Semen	1,00	1,10	0,10	9,09
2	Jalan Operasional Semen	2,00	2,10	0,10	4,76
3	Jalan Dewi Sekardadu	9,00	9,05	0,05	0,55
4	Jalan Dewi Sekardadu	11,00	11,20	0,20	1,79

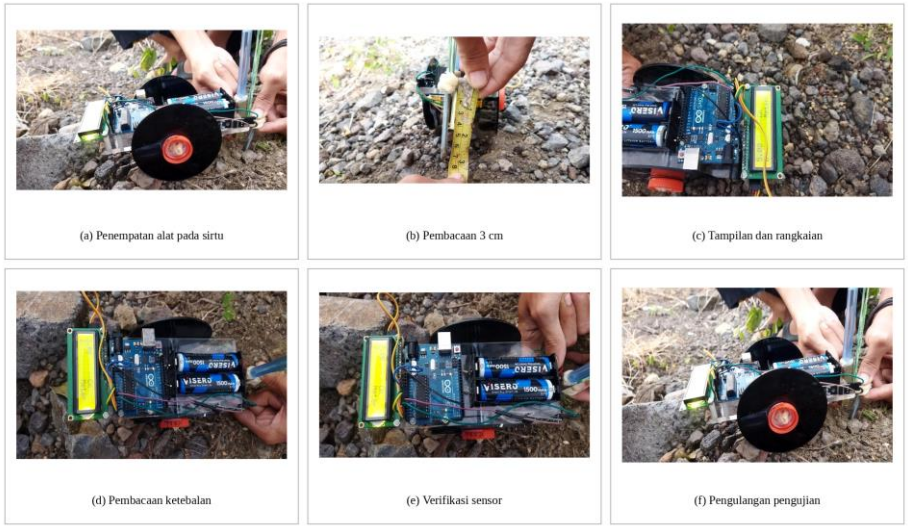
Keterangan: galat dihitung terhadap hasil pengukuran manual sebagai acuan.

Galat relatif berada pada rentang 0,55–9,09%. Nilai MAE sebesar 0,113 m, MAPE sebesar 4,05%, dan akar rata-rata kuadrat galat sebesar 0,125 m. Galat terbesar terjadi pada lintasan 1,10 m karena selisih 0,10 m memberikan persentase lebih besar ketika panjang acuan pendek. Pada lintasan 9,05 m, selisih 0,05 m hanya menghasilkan galat 0,55%. Dengan demikian, evaluasi tidak cukup menggunakan persentase; selisih absolut juga perlu diperhatikan.

Penyebab utama deviasi diperkirakan berasal dari resolusi pulsa, slip roda, perubahan arah, tekanan operator, dan permukaan yang tidak rata. Prinsip ini serupa dengan sistem pengukuran bergerak lain yang kualitas datanya dipengaruhi pemasangan sensor dan dinamika kendaraan (González, Olazagoitia and Vinolas, 2018; de Souto *et al.*, 2023). Pemantauan perkerasan berbiaya rendah juga memerlukan kalibrasi terhadap kondisi jaringan jalan dan validasi berulang agar data dapat dibandingkan antarsegmen (Loprencipe et al., 2021). Untuk meningkatkan kinerja, roda ukur sebaiknya menggunakan bahan dengan koefisien gesek lebih tinggi, encoder beresolusi lebih besar, kompensasi arah, dan proses kalibrasi pada beberapa jenis permukaan.

Pengujian Ketebalan

Pengujian ketebalan dilakukan dengan menancapkan batang mekanik ke media sirtu hingga mencapai dasar acuan. Pergeseran batang mengubah posisi potensiometer, kemudian tegangan dibaca oleh kanal analog Arduino dan dikonversi menjadi sentimeter. Proses pengujian ditampilkan pada Gambar 7, sedangkan hasilnya disajikan pada Tabel 3.



Gambar 7. Proses pengujian ketebalan pada media sirtu

Tabel 3. Hasil pengujian ketebalan media sirtu

No.	Tegangan potensiometer (V)	Hasil alat (cm)	Acuan manual (cm)	Galat (%)	Buzzer
1	2,1	3	3	0	Aktif
2	3,5	5	5	0	Tidak aktif
3	4,9	7	7	0	Tidak aktif
4	2,8	4	4	0	Aktif

Buzzer diprogram aktif ketika ketebalan terukur ≤ 4 cm.

Seluruh pembacaan ketebalan sama dengan hasil manual sehingga galat pada empat titik uji adalah 0%. Tegangan meningkat secara proporsional terhadap perpindahan dan menghasilkan hubungan sekitar 1,43 cm/V. Buzzer aktif pada 3 dan 4 cm, lalu tidak aktif pada 5 dan 7 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konversi analog, tampilan, dan logika ambang bekerja sesuai program pada rentang uji.

Galat 0% tidak dapat ditafsirkan sebagai akurasi universal karena jumlah titik uji masih sedikit, resolusi meteran terbatas, dan media sirtu lebih mudah ditembus dibandingkan lapisan aspal padat. Potensiometer linear dapat memberikan keluaran yang proporsional terhadap perpindahan apabila kopling mekaniknya stabil (Ulfa, Pauzi and Warsito, 2016), tetapi kelonggaran batang, sudut penetrasi, keausan, dan perubahan titik nol dapat menimbulkan histeresis. Pengembangan berikutnya perlu menggunakan kaliper atau depth gauge sebagai acuan, melakukan pengulangan pada setiap ketebalan, menguji linearitas dan repeatability, serta memvalidasi pada benda uji perkerasan yang sesuai dengan prosedur standar (ASTM International, 2023).

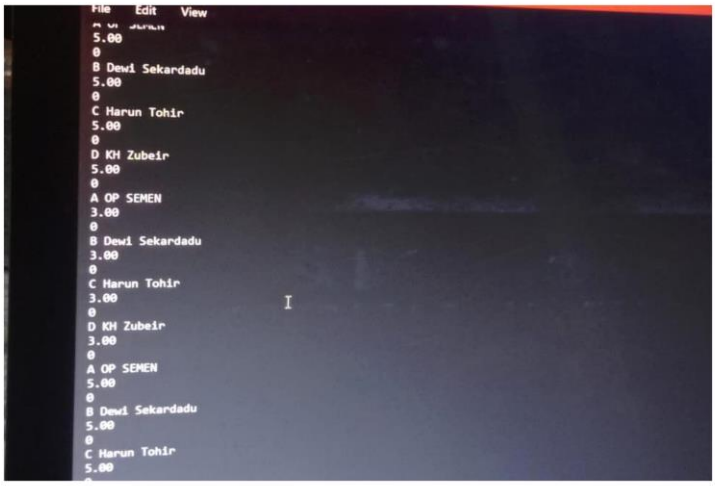
Dari sudut pandang konstruksi jalan, alat ini lebih tepat diposisikan sebagai prototipe pencatat kedalaman lapisan yang masih dapat ditembus, bukan pengganti metode pengambilan core atau pengujian standar. Sampel lapangan tetap harus diperoleh dan dievaluasi menurut prosedur yang berlaku (ASTM International, 2021). Pembatasan ini penting agar hasil rancang bangun tidak digunakan melampaui cakupan validasinya.

Kinerja Antarmuka dan Penyimpanan Data

LCD menampilkan nama lokasi, nilai jarak atau ketebalan, dan status buzzer. Penyimpanan pada microSD berhasil menghasilkan daftar data yang dapat dibuka kembali, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8.

Integrasi tampilan I2C dengan Arduino mendukung antarmuka ringkas dan mengurangi jumlah kabel data (Akinwole and Oladimeji, 2018). Pencatatan lokal juga sejalan dengan prinsip data logger berbiaya rendah yang memungkinkan data lapangan dipindahkan untuk analisis berikutnya (Fuentes *et al.*, 2014).

Media microSD masih memiliki keterbatasan karena kartu harus dilepas untuk membaca data dan berisiko rusak apabila catu daya terputus ketika proses penulisan berlangsung. Sistem data logger yang lebih matang memerlukan penanda waktu, pemeriksaan keberhasilan penulisan, struktur berkas yang konsisten, dan pencadangan (Badhiye, Chatur and Wakode, 2011). Penambahan real-time clock, GPS, komunikasi nirkabel, dan basis data web akan memperkuat ketertelusuran lokasi serta waktu pengukuran. Model open-hardware membuktikan bahwa sistem pemantauan dapat dikembangkan secara modular dan ditingkatkan sesuai kebutuhan (Koenka, Sáiz and Hauser, 2014; Asinelli *et al.*, 2018).



Gambar 8. Contoh data hasil pengukuran yang tersimpan pada microSD

Evaluasi Keseluruhan Sistem

Tabel 4. Ringkasan kinerja prototipe

Aspek	Hasil utama	Evaluasi
Pengukuran jarak	MAPE 4,05%; galat maksimum 9,09%	Berfungsi, perlu peningkatan resolusi dan pengendalian slip
Pengukuran ketebalan	Galat 0% pada 3–7 cm di media sirtu	Berfungsi pada rentang uji, belum tervalidasi pada aspal padat
Peringatan buzzer	Aktif pada ketebalan 3 dan 4 cm	Logika ambang sesuai program
LCD dan microSD	Data tampil dan tersimpan	Berfungsi, perlu timestamp dan pemeriksaan penulisan
Konstruksi mekanik	Rangka prototipe terbuka	Memerlukan casing, penguatan mekanik, dan proteksi lingkungan

Secara keseluruhan, sistem memenuhi fungsi dasar yang dirancang: memperoleh masukan jarak dan ketebalan, memproses nilai, menampilkan hasil, mengaktifkan peringatan, dan menyimpan data. Keunggulan utama ialah integrasi beberapa fungsi dalam satu alat berbiaya rendah. Pendekatan serupa telah menunjukkan bahwa Arduino efektif sebagai inti instrumen khusus, baik untuk laboratorium maupun pemantauan lapangan (Fisher and Gould, 2012; Pearce, 2012; Soler-Llorens *et al.*, 2016).

Keterbatasan penelitian terletak pada jumlah pengujian yang kecil, penggunaan satu meteran sebagai acuan, belum adanya analisis ketidakpastian lengkap, tidak digunakannya benda uji aspal, serta belum diuji ketahanan alat terhadap debu, air, getaran, dan pemakaian berulang. Pengujian berikutnya perlu mencakup kalibrasi multi-titik, minimal tiga pengulangan per titik, analisis repeatability, pengujian pada permukaan yang berbeda, dan perbandingan dengan instrumen standar. Dengan perbaikan tersebut, prototipe dapat dikembangkan menjadi perangkat bantu inspeksi, bukan sekadar demonstrasi fungsi sensor.

SIMPULAN

Prototipe alat ukur ketebalan lapisan dan jarak jalan semi otomatis berbasis Arduino berhasil mengintegrasikan sensor inframerah, potensiometer geser, LCD 20 × 4, buzzer, dan modul microSD. Pengujian jarak pada empat lintasan menghasilkan galat 0,55–9,09%, MAE 0,113 m, dan MAPE 4,05%. Pengujian ketebalan pada media sirtu untuk nilai 3, 4, 5, dan 7 cm menghasilkan galat 0% terhadap meteran,

sedangkan buzzer bekerja pada batas 4 cm atau kurang. Data dapat ditampilkan dan disimpan sesuai alur program. Hasil tersebut membuktikan fungsi dasar prototipe, tetapi belum cukup untuk menyatakan alat siap mengukur lapisan aspal padat. Pengembangan perlu diarahkan pada encoder beresolusi lebih tinggi, mekanisme anti-slip, casing pelindung, kalibrasi dan pengulangan yang lebih luas, validasi menggunakan benda uji perkerasan, penambahan GPS dan real-time clock, serta penyimpanan berbasis web.

DAFTAR PUSTAKA

Akinwole, O.O. and Oladimeji, T.T. (2018) "Design and Implementation of {Arduino} Microcontroller Based Automatic Lighting Control with {I2C LCD} Display," *Journal of Electrical \& Electronic Systems*, 7(2), p. 258. Available at: https://doi.org/10.4172/2332-0796.1000258.

Arduino (2024) "Arduino UNO R3." Available at: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3.

Asinelli, M.G. *et al.* (2018) "The {smARTS_Museum_V1}: An Open Hardware Device for Remote Monitoring of Cultural Heritage Indoor Environments," *HardwareX*, 4, p. e00028. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00028.

ASTM International (2021) "{ASTM D5361/D5361M-16(2021)}: Standard Practice for Sampling Compacted Asphalt Mixtures for Laboratory Testing."

ASTM International (2023) "{ASTM D3549/D3549M-18(2023)}: Standard Test Method for Thickness or Height of Compacted Asphalt Mixture Specimens."

Badhiye, S.S., Chatur, P.N. and Wakode, B. V (2011) "Data Logger System: A Survey," *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering*, 1(2), pp. 24–26.

Direktorat Jenderal Bina Marga (2020) *Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*.

Fisher, D.K. and Gould, P.J. (2012) "Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research," *Modern Instrumentation*, 1(2), pp. 8–20. Available at: https://doi.org/10.4236/mi.2012.12002.

Fuentes, M. *et al.* (2014) "Design of an Accurate, Low-Cost Autonomous Data Logger for {PV} System Monitoring Using {Arduino} That Complies with {IEC} Standards," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, pp. 529–543. Available at: https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.08.008.

González, A., Olazagoitia, J.L. and Vinolas, J. (2018) "A Low-Cost Data Acquisition System for Automobile Dynamics Applications," *Sensors*, 18(2), p. 366. Available at: https://doi.org/10.3390/s18020366.

Koenka, I.J., Sáiz, J. and Hauser, P.C. (2014) "Instrumentino: An Open-Source Modular {Python} Framework for Controlling {Arduino}-Based Experimental Instruments," *Computer Physics Communications*, 185(10), pp. 2724–2729. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.06.007.

Loperfido, A. and others (2023) "Management of Deep Neck Space Infections: A Large Tertiary Center Experience," *Cureus*, 15(3), p. e36574. Available at: https://doi.org/10.7759/cureus.36574.

Nurlana, M.E. (2019) "Pembuatan Power Supply dengan Tegangan Keluaran Variabel Menggunakan Keypad Berbasis Arduino Uno," *Edu Elektrika Journal*, 8(2), pp. 53–59.

Pasaribu, A. (2017) "Rancang Bangun Alat Ukur Ketebalan Kayu Menggunakan Sensor {HC-SR04} dengan Tampilan {LCD} Berbasis Arduino."

Pearce, J.M. (2012) "Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware," *Science*, 337(6100), pp. 1303–1304. Available at: https://doi.org/10.1126/science.1228183.

Soler-Llorens, J.L. *et al.* (2016) "Development and Programming of Geophonino: A Low-Cost {Arduino}-Based Seismic Recorder for Vertical Geophones," *Computers \& Geosciences*, 94, pp. 1–10. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.05.014.

de Souto, J.I. *et al.* (2023) "Design and Implementation of an Embedded Data Acquisition System for Vehicle Vertical Dynamics Analysis," *Sensors*, 23(23), p. 9491. Available at: https://doi.org/10.3390/s23239491.

Subito, M. and Rizal (2012) "Alat Pengukur Pemakaian Energi Listrik Menggunakan Sensor Optocoupler dan Mikrokontroler {AT89S52}," *Foristek*, 2(2), pp. 184–189.

Tanan, N., Wibowo, S.S. and Tinumbia, N. (2017) "Pengukuran Walkability Index pada Ruas Jalan di Kawasan Perkotaan," *Jurnal Jalan-Jembatan*, 34(2), pp. 115–127.

Ulfa, S.Y., Pauzi, G.A. and Warsito (2016) "Desain dan Realisasi Alat Pendeteksi Perubahan Tingkat Kemiringan Tanah sebagai Penyebab Tanah Longsor Menggunakan Sensor Potensio Linier Berbasis

Mikrokontroler {ATMega 8535},” *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 4(1), pp. 29–36.

Yudha, P.S.F. and Sani, R.A. (2017) “Implementasi Sensor Ultrasonik {HC-SR04} sebagai Sensor Parkir Mobil Berbasis Arduino,” *EINSTEIN (e-Journal)*, 5(3).