

Analisis Perubahan Perkerasan Jalan Berbasis LiDAR Multitemporal pada Jembatan Suramadu

Mochamad Gading Alifiansyah^{a,*}, Nain Dhaniarti Raharjo^b, Lalu Muhamad Jaelani^a

^aDepartemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya 60111, Indonesia

^bDepartemen Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang, Malang 65141, Indonesia

*Korespondensi Penulis: 5016221011@student.its.ac.id



Dikirim: 9 Mei 2026;

Diterima: 27 Mei 2026;

Diterbitkan: 31 Mei 2026.

Abstrak. Infrastruktur jalan merupakan komponen penting dalam mendukung mobilitas sehingga kondisi perkerasan perlu dievaluasi secara akurat dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kondisi perkerasan jalan pada bentang tengah Jembatan Suramadu menggunakan data *point cloud* LiDAR multitemporal berbasis *Airborne Laser Scanning* (ALS) yang dikombinasikan dengan *orthophoto*. Metode penelitian meliputi pembentukan *Digital Elevation Model* (DEM), identifikasi kerusakan melalui interpretasi visual *orthophoto*, serta analisis kuantitatif kedalaman lubang berdasarkan data elevasi dengan mempertimbangkan kemiringan melintang jalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada periode ke-3 kedalaman lubang berada pada rentang 0,011–0,072 m dengan klasifikasi 4 titik aman, 4 titik sedang, dan 2 titik bahaya, sedangkan pada periode ke-5 berubah menjadi -0,015–0,089 m dengan klasifikasi 6 titik aman, 1 titik sedang, dan 3 titik bahaya. Peningkatan kedalaman mengindikasikan degradasi perkerasan, sedangkan penurunan hingga nol atau negatif menunjukkan adanya perbaikan yang terverifikasi melalui *orthophoto*. Secara umum, perubahan kondisi perkerasan lebih dominan terjadi pada aspek vertikal dibandingkan luas area kerusakan. Integrasi data LiDAR multitemporal dan *orthophoto* terbukti efektif dalam mendukung evaluasi kondisi perkerasan jalan secara kuantitatif dan visual.

Kata kunci: DEM, Jembatan Suramadu, LiDAR *multitemporal*, *orthophoto*, perkerasan jalan, UAV.

Abstract. Road infrastructure plays an important role in supporting mobility; therefore, pavement conditions need to be evaluated accurately and continuously. This study aims to evaluate pavement conditions on the central span of the Suramadu Bridge using multitemporal LiDAR point cloud data based on Airborne Laser Scanning (ALS) combined with orthophoto imagery. The methods include the generation of a Digital Elevation Model (DEM), pavement distress identification through visual interpretation of orthophotos, and quantitative pothole depth analysis based on elevation data while considering the road cross slope. The results show that, in period 3, pothole depths ranged from 0.011–0.072 m, consisting of 4 safe points, 4 moderate points, and 2 hazardous points, while in period 5 the depths changed to -0.015–0.089 m, consisting of 6 safe points, 1 moderate point, and 3 hazardous points. Increasing pothole depth indicates pavement degradation, whereas decreasing depth to zero or negative values indicates pavement repair verified through orthophoto interpretation. In general, pavement changes were more dominant in the vertical aspect (depth) than in the horizontal area. The integration of multitemporal LiDAR data and orthophotos proved effective for quantitative and visual pavement condition evaluation.

Keywords: DEM, LiDAR multitemporal, orthophoto, pavement, Suramadu Bridge, UAV.

I. PENDAHULUAN

Infrastruktur jalan merupakan elemen vital dalam sistem transportasi modern karena berperan dalam mobilitas, distribusi logistik, dan pertumbuhan ekonomi. Penurunan kondisi perkerasan dapat berdampak pada keamanan, kenyamanan, dan efisiensi perjalanan, sehingga pemantauan yang akurat dan berkelanjutan menjadi penting, terutama pada infrastruktur strategis seperti Jembatan Suramadu. Teknologi LiDAR menjadi solusi

efektif karena mampu merepresentasikan geometri mikro permukaan jalan secara detail melalui data point cloud tiga dimensi dengan tingkat akurasi tinggi [1]–[3].

Metode konvensional seperti inspeksi visual cenderung subjektif dan kurang efisien untuk pemantauan berulang, terutama dalam mendeteksi deformasi mikro yang bersifat kecil namun signifikan. Oleh karena itu, pemanfaatan teknologi berbasis sensor seperti LiDAR, baik terestris, mobile, maupun *airborne*, semakin berkembang dalam

analisis kondisi perkerasan. LiDAR memungkinkan pengukuran parameter seperti *roughness*, *texture*, *cracking*, dan deformasi permukaan secara kuantitatif melalui rekonstruksi permukaan berbasis *point cloud* [1], [4]. Dalam penelitian ini, digunakan teknologi *Airborne Laser Scanning* (ALS) berbasis UAV DJI Matrice M350 untuk memperoleh data *point cloud* resolusi tinggi yang mampu menggambarkan kondisi permukaan jalan secara detail [5], [6].

Meskipun pendekatan berbasis *machine learning* telah banyak digunakan untuk deteksi otomatis kerusakan, analisis langsung berbasis *point cloud* tetap memiliki keunggulan karena mampu memberikan informasi deformasi mikro secara presisi tanpa ketergantungan pada model prediktif. Pendekatan ini sangat relevan untuk studi multitemporal, dimana perubahan elevasi dan deformasi permukaan dapat dianalisis secara langsung dari data LiDAR, sehingga memungkinkan evaluasi kondisi perkerasan secara lebih objektif dan terukur [7]–[11].

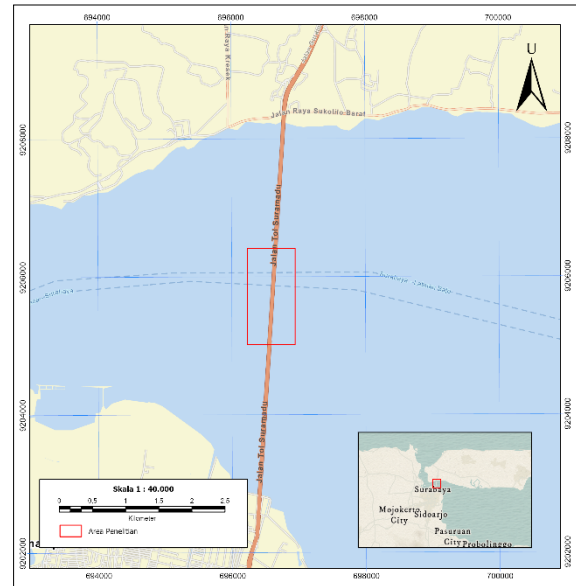
Pemantauan multitemporal menjadi krusial karena kondisi perkerasan bersifat dinamis akibat beban lalu lintas dan faktor lingkungan. Analisis temporal memungkinkan identifikasi tren degradasi maupun perbaikan secara lebih akurat, termasuk deteksi perubahan kecil yang tidak terlihat secara visual namun berpotensi berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius. Selain itu, integrasi data LiDAR dalam sistem spasial mendukung analisis spasial-temporal yang lebih komprehensif dan berbasis data [12]–[15].

Namun, penelitian berbasis LiDAR multitemporal pada infrastruktur jembatan di Indonesia, khususnya Jembatan Suramadu, masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk: (1) membentuk *Digital Elevation Model* (DEM) multitemporal dari data *point cloud* LiDAR berbasis *Airborne Laser Scanning* (ALS), (2) mengidentifikasi serta menghitung parameter geometrik kerusakan perkerasan berupa kedalaman dan luas lubang berdasarkan data elevasi, (3) membandingkan perubahan kondisi perkerasan antarperiode akuisisi, dan (4) mengklasifikasikan tingkat bahaya kerusakan berdasarkan parameter kedalaman lubang. Hasil penelitian diharapkan mampu mendukung evaluasi kondisi perkerasan dan perencanaan pemeliharaan jalan berbasis data spasial secara lebih akurat.

II. METODOLOGI

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian pada tugas akhir ini berada di area Jembatan Suramadu yang menghubungkan Kota Surabaya dan Kabupaten Bangkalan. Secara geografis, kawasan ini terletak pada kisaran koordinat $7^{\circ}14'30'' - 7^{\circ}15'30''$ LS dan $112^{\circ}43'30'' - 112^{\circ}46'00''$ BT.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

2.2 Peralatan dan Bahan

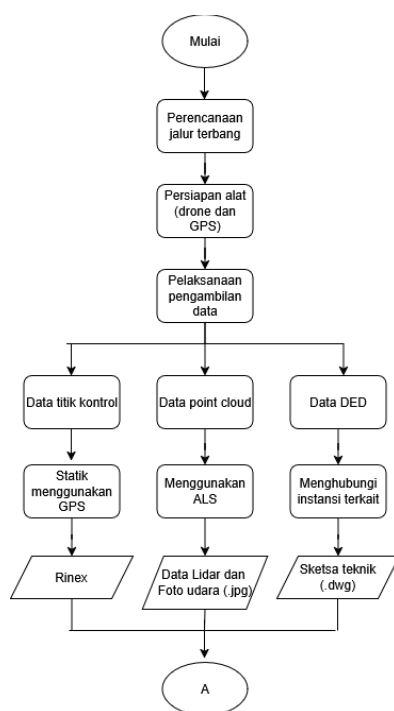
Data dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data utama berupa *point cloud* LiDAR serta data pendukung berupa *Detail Engineering Design* (DED) yang digunakan sebagai acuan dalam analisis geometri dan elevasi perkerasan jalan. Data *point cloud* LiDAR diperoleh dari akuisisi menggunakan teknologi *Airborne Laser Scanning* (ALS) untuk merepresentasikan kondisi permukaan jalan secara detail dalam bentuk tiga dimensi. Sementara itu, data DED digunakan untuk memahami kondisi desain geometrik jalan, khususnya kemiringan melintang, sebagai dasar dalam penentuan elevasi referensi pada analisis kedalaman lubang.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perangkat akuisisi data lapangan, yaitu UAV DJI Matrice 350 RTK yang dilengkapi dengan sensor LiDAR Geosun GS-260H. Sensor ini memiliki akurasi jarak sebesar 1 cm pada ketinggian 150 meter, sensor kamera 4/3 CMOS dengan resolusi efektif 20 MP, serta akurasi posisi horizontal dan vertikal masing-masing sebesar 5 cm. Selain itu, digunakan GPS Geodetik untuk mendukung proses penentuan posisi dan kalibrasi data.

Adapun perangkat lunak yang digunakan meliputi ArcGIS Pro untuk analisis spasial, Agisoft untuk pengolahan awal *orthophoto*, CloudCompare untuk pemrosesan dan *filtering point cloud*, Global Mapper untuk visualisasi dan analisis geospasial, serta gAirHawk untuk manajemen dan pengolahan data akuisisi LiDAR.

2.3 Metode Dan Tahapan Pengolahan Data

Penelitian ini dilaksanakan melalui dua tahapan utama, yaitu tahap pengambilan data dan tahap pengolahan data. Tahap pengambilan data mencakup akuisisi data menggunakan drone berbasis teknologi LiDAR secara multitemporal untuk memperoleh representasi kondisi permukaan jalan pada waktu yang berbeda. Sementara itu, tahap pengolahan data meliputi pemrosesan data LiDAR menjadi *point cloud* dan *orthophoto*, yang selanjutnya digunakan untuk analisis kondisi perkerasan jalan. Adapun tahapan pengambilan data tersebut disajikan dalam bentuk diagram alir sebagai berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan tahapan pengambilan dan pengolahan data awal sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Penelitian diawali dengan proses perencanaan jalur terbang untuk memastikan akuisisi data LiDAR dapat dilakukan secara efektif, efisien, dan mampu menghasilkan distribusi *point cloud* yang merata pada seluruh area penelitian. Perencanaan jalur terbang dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi geometrik wilayah survei, panjang lintasan jembatan, serta area di sekitar Jembatan Suramadu yang memiliki karakteristik permukaan berbeda-beda. Penentuan jalur terbang juga disesuaikan dengan kemampuan sensor LiDAR dalam menjangkau objek agar tidak terjadi kekosongan data pada area tertentu. Ketinggian terbang drone untuk akuisisi data *point cloud* LiDAR ditetapkan sebesar 60 meter guna memperoleh

kepadatan titik dan akurasi elevasi yang optimal. Sementara itu, pengambilan data foto udara untuk pembuatan *orthophoto* dilakukan pada ketinggian 130 meter agar cakupan area pengambilan gambar lebih luas dan efisien. Selain itu, kecepatan terbang dipertahankan pada rentang 6–8 m/s guna menjaga kestabilan wahana selama proses pemindaian dan mengurangi kemungkinan terjadinya distorsi data akibat pergerakan drone yang terlalu cepat. Jarak antar jalur terbang dirancang dengan overlap sebesar 80–90% untuk memastikan setiap bagian area penelitian terekam lebih dari satu kali sehingga kualitas *point cloud* yang dihasilkan menjadi lebih baik dan memudahkan proses registrasi data. Pada tahap ini juga dilakukan analisis kondisi lingkungan penerbangan seperti arah angin, intensitas cahaya matahari, kondisi cuaca, serta keberadaan hambatan di sekitar area survei guna meminimalkan risiko gangguan selama akuisisi data berlangsung.

Tahap berikutnya adalah persiapan alat yang meliputi pengecekan seluruh perangkat akuisisi data sebelum kegiatan survei dilaksanakan. *UAV* yang digunakan dalam penelitian ini adalah DJI Matrice 350 RTK yang dipadukan dengan sensor *Airborne Laser Scanning (ALS)* LiDAR Geosun GS260H. Pemeriksaan dilakukan terhadap kondisi fisik drone, kestabilan sistem propulsi, serta konektivitas antar perangkat untuk memastikan seluruh komponen dapat beroperasi dengan baik. Sistem navigasi yang terdiri dari *GNSS*, *IMU*, dan *Ground Control Point (GCP)* juga diperiksa untuk menjamin kualitas data posisi dan orientasi selama penerbangan. Proses kalibrasi perangkat dilakukan untuk menjaga integrasi antara *GNSS* dan *IMU* sehingga informasi posisi, kecepatan, serta orientasi drone dapat direkam secara akurat selama proses akuisisi berlangsung. Selain itu, dilakukan pengecekan kapasitas baterai, media penyimpanan data, kualitas sinyal komunikasi, serta konfigurasi parameter sensor LiDAR seperti frekuensi pemindaian dan sudut pemindaian. Tahapan ini penting dilakukan untuk mengurangi potensi kesalahan teknis yang dapat memengaruhi kualitas data hasil survei.

Setelah seluruh persiapan selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah pelaksanaan pengambilan data di lapangan. Akuisisi data dilakukan dengan menerbangkan drone mengikuti jalur terbang yang telah direncanakan sebelumnya. Sensor LiDAR akan memancarkan pulsa laser ke permukaan objek dan merekam pantulan sinyal untuk menghasilkan data *point cloud* tiga dimensi. Bersamaan dengan itu, kamera pada sistem juga merekam citra udara yang nantinya digunakan sebagai data pendukung visualisasi. Pada proses ini, data posisi dan orientasi drone direkam secara kontinu menggunakan sistem *GNSS* dan *IMU* sehingga setiap titik hasil pemindaian memiliki informasi koordinat yang akurat. Selama proses penerbangan, operator melakukan pemantauan terhadap

kestabilan drone, kualitas sinyal, dan cakupan area yang telah dipindai untuk memastikan seluruh area penelitian berhasil terekam dengan baik.

Pengambilan data titik kontrol dilakukan menggunakan receiver *GNSS* untuk memperoleh *Ground Control Point* (GCP) sebagai titik referensi pengikatan koordinat. Titik kontrol ditempatkan pada lokasi-lokasi strategis yang mudah dikenali pada data hasil akuisisi dan tersebar secara merata di area penelitian. Pengamatan *GNSS* dilakukan menggunakan metode statik untuk memperoleh ketelitian koordinat yang tinggi. Data hasil pengamatan kemudian diolah sehingga menghasilkan koordinat titik kontrol yang akan digunakan dalam proses georeferensi dan validasi akurasi data *LiDAR*. Keberadaan GCP sangat penting dalam meningkatkan ketelitian posisi horizontal maupun vertikal dari data *point cloud* yang dihasilkan.

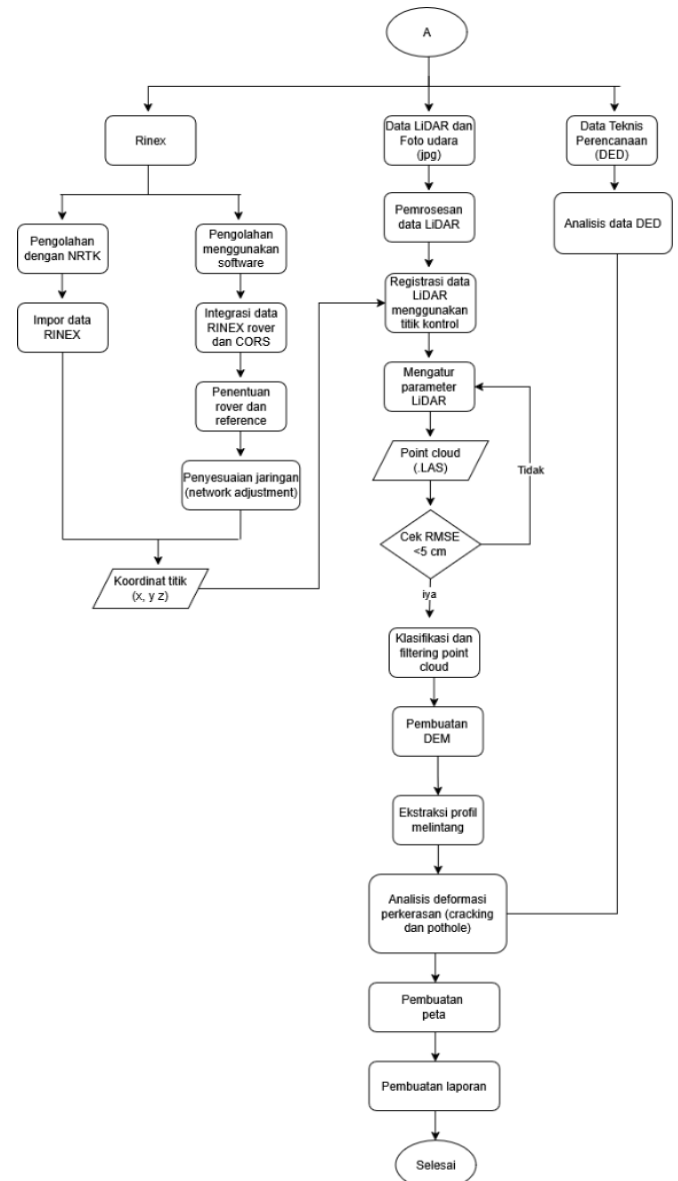
Data hasil akuisisi kemudian dipisahkan menjadi beberapa jenis data utama, yaitu data titik kontrol, data *point cloud*, dan data *Detail Engineering Design* (DED). Data titik kontrol yang diperoleh dari pengamatan *GNSS* diolah menggunakan metode statik sehingga menghasilkan file koordinat *rinex* yang memiliki tingkat akurasi tinggi. Selanjutnya, data *point cloud* hasil pemindaian *LiDAR* diproses menggunakan perangkat lunak *Airborne Laser Scanning* (ALS) untuk menghasilkan data spasial tiga dimensi berupa *point cloud* dan foto udara dalam format *LAS* maupun *JPG*. Pada tahap ini dilakukan proses *filtering*, klasifikasi titik, serta koreksi posisi untuk meningkatkan kualitas data hasil pemindaian. Sementara itu, data *DED* yang berupa gambar teknis dalam format *DWG* digunakan sebagai data pendukung untuk menghubungkan hasil survei lapangan dengan desain geometrik eksisting. Seluruh data tersebut kemudian diintegrasikan sebagai dasar dalam tahapan pengolahan lanjutan terkait analisis kondisi perkerasan jalan yang ditampilkan pada diagram alir di Gambar 3.

1. Pengolahan Data GNSS

Data *RINEX* hasil pengukuran *GNSS* dikombinasikan dengan data *CORS* untuk memperoleh koordinat yang presisi. Proses meliputi impor data, penentuan pasangan *rover-reference*, serta *adjustment* hingga diperoleh koordinat tiga dimensi (*x, y, z*). Titik kontrol yang dihasilkan digunakan sebagai referensi georeferensi data *LiDAR*.

2. Pengolahan Data LiDAR dan Foto Udara

Data *LiDAR* dan foto udara diolah melalui proses registrasi, pengaturan parameter, dan kalibrasi menggunakan titik kontrol. Kualitas data dievaluasi berdasarkan nilai *RMSE*



Gambar 3. Diagram Alir Pengolahan Data *Point cloud*

dengan toleransi < 5 cm. Jika belum memenuhi, dilakukan penyesuaian dan pemrosesan ulang. Selanjutnya dilakukan *filtering* untuk memisahkan permukaan jalan dari objek non-perkerasan, serta pembuatan *orthophoto* beresolusi tinggi sebagai dasar interpretasi visual.

3. Pembuatan Digital Elevation Model (DEM)

Point cloud yang telah difilter diklasifikasi untuk mempertahankan titik permukaan jalan (*ground*), kemudian diinterpolasi menggunakan metode seperti *TIN* atau rasterisasi untuk menghasilkan *DEM*. *DEM* ini merepresentasikan elevasi permukaan jalan secara kontinu dan detail.

4. Pemanfaatan Data Detail Engineering Design (DED)

Data DED digunakan sebagai acuan geometri jalan, khususnya kemiringan melintang ($\pm 2\%$). Informasi ini digunakan untuk menentukan elevasi referensi dengan pendekatan rata-rata elevasi sisi kiri dan kanan, guna menghindari bias dalam perhitungan kedalaman.

5. Analisis Perkerasan Jalan

Analisis dilakukan dengan mengintegrasikan interpretasi orthophoto dan data DEM. Identifikasi awal kerusakan dilakukan secara visual, kemudian kedalaman dihitung secara kuantitatif berdasarkan selisih elevasi terhadap elevasi referensi. Analisis multiperiode digunakan untuk mengidentifikasi perubahan kondisi perkerasan, baik degradasi maupun perbaikan.

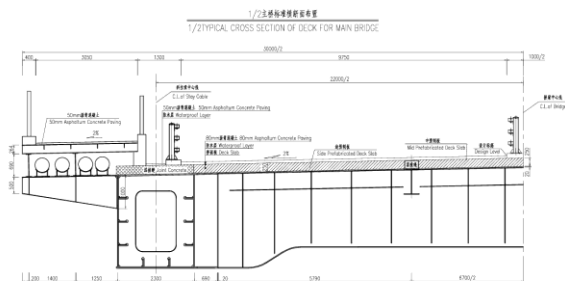
6. Klasifikasi dan Penyajian Hasil

Berdasarkan nilai kedalaman, kerusakan diklasifikasikan ke dalam tingkat bahaya tertentu. Hasil analisis disajikan dalam bentuk data tematik yang menggambarkan sebaran, tingkat kerusakan, dan kondisi perkerasan jalan secara keseluruhan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Detail Engineering Design (DED)

Analisis data pada penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan data *Detail Engineering Design* (DED) sebagai acuan dalam memahami geometri perkerasan jalan, khususnya terkait bentuk penampang dan kemiringan melintang. Data DED digunakan untuk merepresentasikan kondisi desain permukaan jalan yang direncanakan, sehingga dapat menjadi dasar dalam menentukan elevasi referensi pada analisis kondisi eksisting. Informasi yang diperoleh dari DED meliputi dimensi geometrik, susunan lapisan perkerasan, serta kemiringan jalan yang selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam interpretasi dan analisis data hasil pemindaian LiDAR, sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4. *Detail Engineering Design* (DED) Jalan Utama

Gambar tersebut merupakan *Detail Engineering Design* (DED) penampang melintang Jembatan Suramadu yang menggambarkan konfigurasi geometrik serta struktur

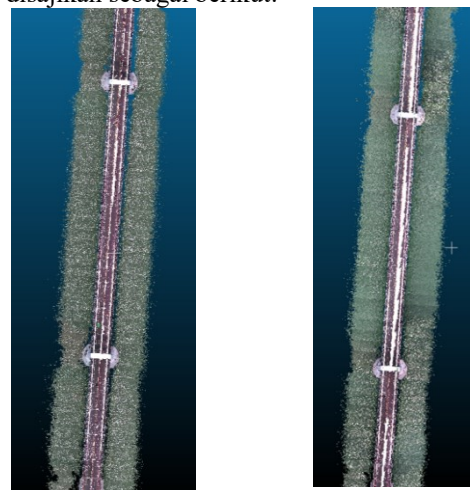
perkerasan jalan secara rinci. Pada DED terlihat bahwa permukaan jalan dirancang tidak datar, melainkan memiliki kemiringan melintang (*cross slope*) sebesar $\pm 2\%$ yang berfungsi untuk mengalirkan air ke sisi jalan sehingga mencegah terjadinya genangan. Selain itu, DED juga menunjukkan susunan lapisan perkerasan, mulai dari lapisan aspal (*asphalt concrete*), lapisan kedap air (*waterproof layer*), hingga deck slab yang didukung oleh struktur girder di bawahnya.

Dalam penelitian ini, data DED digunakan sebagai acuan untuk membandingkan kondisi geometrik ideal dengan kondisi eksisting hasil pengukuran LiDAR. Adanya kemiringan melintang sebesar 2% menyebabkan elevasi sisi kiri dan kanan jalan memiliki perbedaan nilai secara alami. Oleh karena itu, untuk memperoleh representasi elevasi permukaan normal di sekitar area lubang, digunakan pendekatan rata-rata elevasi sisi kiri dan kanan lubang.

Pendekatan ini dipilih karena nilai rata-rata tersebut dapat merepresentasikan elevasi referensi lokal yang seharusnya dimiliki permukaan jalan sesuai desain. Dengan demikian, kedalaman lubang ditentukan berdasarkan selisih antara elevasi rata-rata tersebut terhadap elevasi dasar lubang, sehingga analisis deformasi dapat dilakukan secara lebih akurat meskipun permukaan jalan memiliki kemiringan sesuai dengan DED.

B. Analisis Point cloud

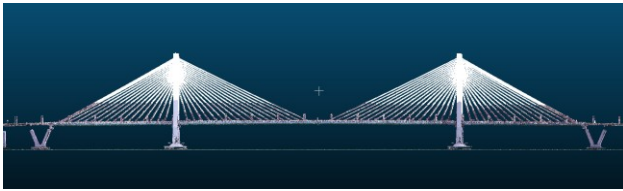
Adapun hasil *point cloud* dari akuisisi data *Airborne Laser Scanning* (ALS) multiperiode pada periode 3 dan periode 5 disajikan sebagai berikut.



Gambar 5. Hasil *Point cloud* tampak atas dari Jembatan Suramadu

Pada Gambar 5 terlihat bahwa tampilan *point cloud top view* pada periode ke-3 dan periode ke-5 umumnya memiliki sebaran titik yang merata dan mengikuti geometri

jalan, sehingga data cukup baik untuk digunakan dalam analisis kondisi perkerasan. Namun, pada periode ke-5 terdapat beberapa area kosong (berwarna putih) yang menunjukkan tidak terekamnya pantulan LiDAR, kemungkinan akibat sudut pemindaian, jarak sensor, atau karakteristik reflektivitas permukaan jalan. Meskipun terdapat kekosongan data pada beberapa bagian, area tersebut masih dapat direpresentasikan melalui proses interpolasi saat pembentukan DEM serta didukung dengan perbandingan terhadap data periode sebelum dan sesudahnya yang memiliki cakupan titik lebih lengkap, sehingga analisis perubahan permukaan jalan tetap dapat dilakukan secara konsisten.

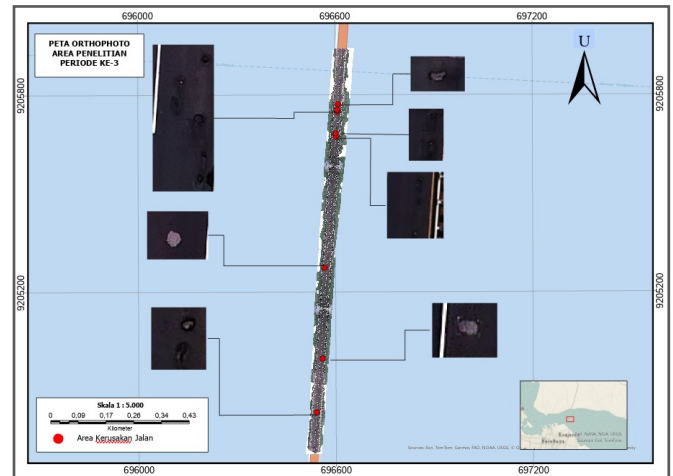


Gambar 6. Hasil *Point cloud* tampak samping dari Jembatan Suramadu

Gambar 6 menunjukkan hasil *point cloud* tampak samping yang menampilkan representasi tiga dimensi Jembatan Suramadu hasil akuisisi LiDAR. Data ini mampu merepresentasikan geometri struktur jembatan secara detail, termasuk kabel, pilar, dan permukaan jalan, dengan kerapatan titik yang relatif tinggi. Secara visual, distribusi titik terlihat cukup merata pada elemen struktur utama sehingga bentuk geometrik jembatan dapat tergambarkan dengan baik. Selain itu, hasil evaluasi akurasi menunjukkan nilai *Root Mean Square Error horizontal* (RMSEh) sebesar 0,161 m pada periode ke-3 dan 0,073 m pada periode ke-5, sedangkan nilai *Root Mean Square Error vertikal* (RMSEv) masing-masing sebesar 0,198 m dan 0,194 m. Nilai tersebut menunjukkan bahwa data *point cloud* memiliki konsistensi geometrik yang cukup baik, terutama pada aspek horizontal dimana periode ke-5 memiliki tingkat ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan periode ke-3. Sementara itu, akurasi vertikal pada kedua periode relatif serupa sehingga data elevasi masih dapat digunakan untuk analisis deformasi permukaan jalan. Data *point cloud* ini selanjutnya akan melalui proses *filtering* dan klasifikasi untuk mendukung tahapan pengolahan serta analisis lebih lanjut.

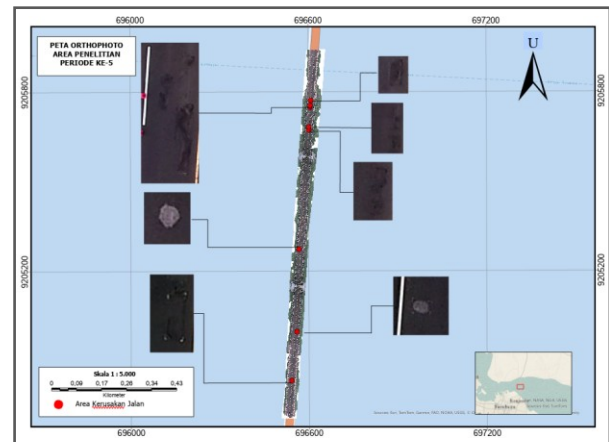
C. Analisis Hasil Orthophoto

Hasil pengolahan foto udara yang diperoleh menggunakan drone menghasilkan *orthophoto*, yang ditampilkan sebagai berikut.



Gambar 7. Peta Hasil *orthophoto* periode 3

Orthophoto yang dihasilkan mencakup area Jembatan Suramadu dengan fokus pada badan jalan sebagai objek penelitian. Data ini diperoleh pada periode ke-3 melalui akuisisi menggunakan UAV pada tanggal 5 Januari 2026 pukul 11.00–12.00 WIB dengan tinggi terbang 130 meter. *Orthophoto* memiliki kualitas visual yang cukup baik sehingga mampu menampilkan kondisi permukaan jalan secara jelas. Dalam penelitian ini, *orthophoto* digunakan sebagai data pendukung untuk interpretasi visual dan verifikasi hasil analisis berbasis *point cloud* LiDAR.



Gambar 8. Peta Hasil *orthophoto* periode 5

Orthophoto periode ke-5 diperoleh melalui akuisisi UAV pada tanggal 2 Februari 2026 pukul 14.00–15.00 WIB dengan ketinggian terbang ± 130 meter. Pengambilan data pada rentang waktu tersebut menghasilkan kondisi pencahayaan yang cukup stabil, sehingga citra yang dihasilkan memiliki kualitas visual yang baik dan mampu menampilkan kondisi permukaan Jembatan Suramadu secara jelas. Data ini digunakan sebagai pendukung interpretasi visual dan verifikasi hasil analisis *point cloud* LiDAR.

D. Analisis perkerasan Jalan

Pada bagian ini disajikan hasil analisis perkerasan jalan yang dihasilkan dari pengolahan data *point cloud* LiDAR yang dikombinasikan dengan interpretasi *orthophoto*.

Tabel 1. Hasil identifikasi perkerasan jalan pada periode 3

Kode	Elevasi Jalan (m)				Kedalaman Lubang (m)	Luas Lubang (m ²)
	Kiri Lubang	Kanan Lubang	Rata-rata	Objek Lubang		
P1	39,209	39,209	39,209	39,160	0,049	0,203
P2	39,424	39,435	39,430	39,419	0,011	0,136
P3	41,110	41,148	41,129	41,080	0,049	0,507
P4	35,750	35,758	35,754	35,682	0,072	0,129
P5	38,743	38,706	38,724	38,692	0,032	0,692
P6	38,627	38,651	38,639	38,593	0,046	0,148
P7	39,226	39,228	39,227	39,180	0,047	0,210
P8	38,706	38,709	38,708	38,660	0,048	0,161
P9	38,679	38,679	38,679	38,622	0,056	0,261
P10	38,674	38,699	38,687	38,617	0,069	0,354

Tabel diatas menyajikan hasil identifikasi lubang (*pothole*) pada periode 3 berdasarkan data *point cloud* LiDAR. Parameter yang ditampilkan meliputi elevasi tepi lubang, elevasi rata-rata, koordinat lokasi, kedalaman, serta luas lubang yang dihitung dari hasil ekstraksi DEM. Berikut untuk hasil identifikasi periode 5.

Tabel 2. Hasil identifikasi perkerasan jalan pada periode 5

Kode	Elevasi Jalan (m)				Kedalaman Lubang (m)	Luas Lubang (m ²)
	Kiri Lubang	Kanan Lubang	Rata-rata	Objek Lubang		
P1	39,202	39,205	39,204	39,150	0,054	0,203
P2	39,615	39,664	39,640	39,615	0,024	0,136
P3	41,232	41,245	41,239	41,184	0,055	0,507
P4	35,943	35,947	35,945	35,959	-0,014	0,129
P5	39,013	38,861	38,937	38,891	0,046	0,692
P6	38,573	38,573	38,573	38,573	0,000	0,148
P7	39,216	39,207	39,212	39,227	-0,015	0,210
P8	38,703	38,724	38,714	38,652	0,062	0,161
P9	38,706	38,716	38,711	38,713	-0,002	0,261
P10	38,489	38,512	38,501	38,412	0,089	0,354

Tabel 2 di atas menyajikan hasil identifikasi lubang (*pothole*) pada periode ke-5 dengan parameter yang sama seperti periode sebelumnya, sehingga memungkinkan dilakukan perbandingan secara langsung. Data ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan kondisi permukaan jalan, khususnya pada aspek kedalaman dan luas lubang, sebagai dasar dalam analisis dinamika kerusakan perkerasan secara multiperiode. Selanjutnya

dibawah ini adalah tabel perbandingan dari kedua periode tersebut.

Tabel 3. Hasil perbandingan identifikasi perkerasan jalan 2 periode

Kode	Kedalaman Periode 3 (m)	Kedalaman Periode 5 (m)	Selisih (m)
P1	0,049	0,054	+0,005
P2	0,011	0,024	+0,013
P3	0,049	0,055	+0,006
P4	0,072	-0,014	-0,086
P5	0,032	0,046	+0,014
P6	0,046	0,000	-0,046
P7	0,047	-0,015	-0,062
P8	0,048	0,062	+0,014
P9	0,056	-0,002	-0,058
P10	0,069	0,089	+0,020

Berdasarkan Tabel 3, yang berisi perbandingan kedalaman lubang antara periode ke-3 dan periode ke-5, terlihat bahwa kondisi perkerasan jalan mengalami perubahan yang dinamis berupa peningkatan maupun penurunan kedalaman lubang. Beberapa titik seperti P1, P2, P3, P5, P8, dan P10 mengalami peningkatan kedalaman yang menunjukkan proses degradasi perkerasan masih berlangsung akibat beban lalu lintas dan deformasi berulang, dengan peningkatan terbesar terjadi pada titik P10 sebesar +0,020 m. Sementara itu, titik P4, P6, P7, dan P9 mengalami penurunan kedalaman yang mengindikasikan adanya aktivitas perbaikan atau penanganan jalan, dimana penurunan terbesar terjadi pada titik P4 sebesar -0,086 m. Selain itu, nilai kedalaman negatif pada beberapa titik menunjukkan bahwa elevasi permukaan hasil perbaikan menjadi lebih tinggi dibandingkan kondisi sebelumnya. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi perkerasan lebih dominan terjadi pada aspek vertikal berupa perubahan kedalaman dibandingkan perubahan luas area kerusakan.

E. Analisis Hasil Klasifikasi

Klasifikasi tingkat bahaya kerusakan perkerasan pada penelitian ini ditentukan berdasarkan parameter kedalaman lubang (*pothole depth*) yang mengacu pada *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program* yang dikembangkan oleh Miller dan Bellinger (2014). Kedalaman digunakan sebagai indikator utama karena mampu merepresentasikan tingkat deformasi vertikal permukaan jalan yang berpengaruh terhadap kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan. Semakin besar nilai kedalaman lubang, maka semakin tinggi tingkat bahaya yang ditimbulkan. Adapun klasifikasi tingkat bahaya berdasarkan kedalaman lubang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil identifikasi perkerasan jalan pada periode 3

Tingkat	Kedalaman	Status
<i>Low</i> (Rendah)	< 25 mm	Aman (dapat dilintasi)
<i>Moderate</i> (Sedang)	25 mm – 50 mm	Waspada (Perlu perbaikan segera)
<i>High</i> (Tinggi)	>50 mm	Bahaya

Sumber : Miller dan Bellinger [17]

Berdasarkan klasifikasi pada Tabel 4, tingkat bahaya kerusakan perkerasan dibedakan menjadi tiga kategori, yaitu rendah (*low*), sedang (*moderate*), dan tinggi (*high*) berdasarkan nilai kedalaman lubang. Kategori rendah menunjukkan kondisi lubang yang masih relatif aman untuk dilintasi karena kedalamannya kurang dari 25 mm, sedangkan kategori sedang menunjukkan kondisi yang memerlukan perhatian dan perbaikan segera karena deformasi permukaan mulai mempengaruhi kenyamanan serta keselamatan pengguna jalan. Sementara itu, kategori tinggi menunjukkan kondisi kerusakan yang berbahaya karena kedalaman lubang melebihi 50 mm sehingga berpotensi menimbulkan risiko terhadap kendaraan maupun pengguna jalan. Selain parameter kedalaman, pada penelitian ini suatu kerusakan juga dikategorikan sebagai *pothole* apabila memiliki luas minimal $\pm 0,2 \text{ m}^2$ [17], sehingga deformasi kecil atau ketidakrataan permukaan yang tidak memenuhi batas tersebut tidak diklasifikasikan sebagai lubang jalan utama. Pendekatan ini digunakan untuk membedakan antara kerusakan mikro permukaan dengan kerusakan yang telah berkembang menjadi *pothole* secara geometrik.

Berdasarkan parameter geometrik hasil ekstraksi data *point cloud*, dilakukan klasifikasi tingkat bahaya lubang guna mengevaluasi tingkat risiko kerusakan perkerasan terhadap aspek keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan. Berikut adalah tabel hasil klasifikasi tiap periode.

Tabel 5. Klasifikasi kerusakan jalan pada periode 3

Kode	Periode 3				
	Koordinat Lubang		Kedalaman Lubang (m)	Luas Lubang (m^2)	Tingkat Bahaya
	T (m)	U (m)			
P1	696603,924	9205694,680	0,049	0,203	Sedang
P2	696569,021	9205272,099	0,011	0,136	Aman
P3	696560,457	9204996,746	0,049	0,507	Sedang
P4	696601,746	9205667,335	0,072	0,129	Aman
P5	696602,191	9205671,444	0,032	0,692	Sedang
P6	696602,934	9205681,137	0,046	0,148	Aman
P7	696541,544	9204832,783	0,047	0,210	Sedang
P8	696606,672	9205752,434	0,048	0,161	Aman
P9	696608,033	9205753,737	0,056	0,261	Bahaya
P10	696607,640	9205750,384	0,069	0,354	Bahaya

Berdasarkan Tabel 5 hasil klasifikasi tingkat bahaya pada periode 3, terlihat bahwa kondisi lubang (*pothole*)

pada permukaan jalan didominasi oleh kategori Sedang dan Aman, dengan sebagian kecil masuk dalam kategori Bahaya. Lubang dengan kategori Aman memiliki kedalaman relatif kecil (< 25 mm), sehingga secara umum masih dapat dilintasi tanpa memberikan dampak signifikan terhadap kenyamanan maupun keselamatan pengguna jalan. Sementara itu, kategori Sedang menunjukkan bahwa beberapa lubang telah mencapai kedalaman yang perlu diwaspadai (25–50 mm). Pada kondisi ini, lubang berpotensi berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius apabila tidak segera dilakukan penanganan. Jumlah lubang pada kategori ini cukup dominan, yang mengindikasikan bahwa sebagian area perkerasan mulai mengalami degradasi awal hingga menengah.

Adapun kategori Bahaya ditemukan pada beberapa titik dengan kedalaman lebih dari 50 mm. Lubang pada kategori ini berpotensi membahayakan pengguna jalan karena dapat menyebabkan gangguan stabilitas kendaraan, terutama pada kecepatan tinggi. Keberadaan lubang dengan tingkat bahaya tinggi ini menunjukkan bahwa pada periode 3 telah terdapat kerusakan lokal yang cukup signifikan dan memerlukan penanganan segera. Secara keseluruhan, distribusi klasifikasi ini menggambarkan bahwa kondisi perkerasan pada periode 3 berada pada tahap degradasi bertahap, dimana sebagian besar masih dalam kondisi aman hingga sedang, namun sudah mulai muncul titik-titik kerusakan kritis yang berpotensi berkembang lebih lanjut jika tidak dilakukan pemeliharaan. Selanjutnya adalah hasil klasifikasi kerusakan jalan pada periode 5 sebagai berikut.

Tabel 6. Klasifikasi kerusakan jalan pada periode 5

Kode Lubang	Periode 5				
	Koordinat Lubang		Kedalaman Lubang (m)	Luas Lubang (m^2)	Tingkat Bahaya
	T (m)	U (m)			
P1	696603,924	9205694,680	0,054	0,203	Bahaya
P2	696569,021	9205272,099	0,024	0,136	Aman
P3	696560,457	9204996,746	0,055	0,507	Bahaya
P4	696601,746	9205667,335	-0,014	0,129	Aman
P5	696602,191	9205671,444	0,046	0,692	Sedang
P6	696602,934	9205681,137	0,000	0,148	Aman
P7	696541,544	9204832,783	-0,015	0,210	Aman
P8	696606,672	9205752,434	0,062	0,161	Aman
P9	696608,033	9205753,737	-0,002	0,261	Aman
P10	696607,640	9205750,384	0,089	0,354	Bahaya

Berdasarkan Tabel 6 hasil klasifikasi pada periode 5, terlihat bahwa kondisi perkerasan jalan mengalami dinamika perubahan yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan periode 3, baik berupa peningkatan maupun penurunan kedalaman lubang.

Pada beberapa titik, terjadi peningkatan kedalaman lubang yang menunjukkan bahwa proses degradasi

perkerasan masih berlangsung. Sebagai contoh, pada titik pertama kedalaman meningkat dari 0,049 m menjadi 0,054 m, titik kedua dari 0,010 m menjadi 0,024 m, dan titik ketiga dari 0,049 m menjadi 0,054 m. Peningkatan juga terjadi pada beberapa titik lain, seperti dari 0,0322 m menjadi 0,046 m serta dari 0,070 m menjadi 0,089 m. Kondisi ini menunjukkan bahwa kerusakan pada beberapa area masih berkembang akibat beban lalu lintas berulang, getaran kendaraan, dan kelemahan struktural perkerasan jalan. Secara umum, rata-rata kedalaman lubang pada periode ke-3 sebesar $\pm 0,048$ m dan meningkat menjadi $\pm 0,050$ m pada periode ke-5. Berdasarkan klasifikasi tingkat bahaya, pada periode ke-3 terdapat 5 titik kategori Aman, 3 titik kategori Sedang, dan 2 titik kategori Bahaya, sedangkan pada periode ke-5 terdapat 5 titik kategori Aman, 1 titik kategori Sedang, dan 4 titik kategori Bahaya. Sementara itu, total luas kerusakan pada kedua periode relatif tidak mengalami perubahan signifikan karena sebagian besar perubahan terjadi pada aspek kedalaman dibandingkan pelebaran area lubang.

Di sisi lain, beberapa titik menunjukkan penurunan kedalaman yang signifikan yang mengindikasikan adanya aktivitas perbaikan jalan. Hal ini diperkuat oleh interpretasi *orthophoto* yang memperlihatkan perubahan tekstur dan warna permukaan pada lokasi yang sama. Sebagai contoh, pada salah satu titik terjadi penurunan dari 0,072 m menjadi -0,014 m, sedangkan titik lain mengalami perubahan dari 0,046 m menjadi 0 m, dari 0,047 m menjadi -0,016 m, serta dari 0,056 m menjadi -0,002 m. Nilai negatif tersebut menunjukkan bahwa elevasi permukaan hasil perbaikan menjadi sedikit lebih tinggi dibandingkan kondisi sebelumnya, yang mengindikasikan adanya proses *patching* atau *overlay*. Secara keseluruhan, perubahan kondisi perkerasan pada penelitian ini lebih dominan terjadi pada aspek vertikal berupa perubahan kedalaman lubang dibandingkan perubahan luas area kerusakan. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi awal perkerasan cenderung berkembang dalam bentuk penurunan elevasi lokal akibat tekanan beban kendaraan dan penurunan lapisan permukaan sebelum mengalami pelebaran area secara signifikan. Dengan demikian, data elevasi LiDAR menjadi lebih sensitif dalam mendeteksi perubahan mikro-topografi permukaan jalan dibandingkan perubahan geometrik horizontal, sehingga efektif digunakan untuk analisis deformasi perkerasan secara multitemporal.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis perbandingan antar periode, dapat disimpulkan bahwa kondisi perkerasan jalan pada lokasi penelitian mengalami dinamika perubahan yang ditandai oleh proses degradasi dan perbaikan secara bersamaan. Peningkatan kedalaman lubang pada beberapa titik menunjukkan kerusakan yang bersifat progresif,

sementara penurunan kedalaman hingga mencapai nilai nol atau negatif mengindikasikan adanya intervensi perbaikan yang telah terverifikasi melalui data *orthophoto*. Selain itu, hasil klasifikasi tingkat bahaya menunjukkan adanya perubahan kategori kerusakan dari sedang atau tinggi menjadi rendah, yang mencerminkan keberhasilan perbaikan pada beberapa titik, meskipun masih terdapat area dengan tingkat bahaya tinggi yang memerlukan penanganan lebih lanjut. Perubahan kondisi perkerasan juga lebih dominan terjadi pada aspek vertikal (kedalaman) dibandingkan dengan perubahan luas area, sehingga deformasi yang terjadi bersifat mikro-topografi. Secara keseluruhan, integrasi analisis data LiDAR multitemporal, *orthophoto*, dan acuan geometrik *Detailed Engineering Design* (DED) terbukti efektif dalam mengidentifikasi, mengukur, dan mengevaluasi perubahan kondisi perkerasan jalan secara kuantitatif dan visual. Pendekatan ini mampu memberikan informasi yang akurat dalam mendukung penilaian kondisi jalan serta perencanaan pemeliharaan yang lebih tepat sasaran dan berbasis data. Ke depan, metode ini berpotensi dikembangkan lebih lanjut melalui penambahan jumlah periode akuisisi untuk analisis temporal yang lebih detail, serta integrasi metode otomatis berbasis *machine learning* dan *deep learning* guna meningkatkan efisiensi dan otomatisasi deteksi kerusakan perkerasan jalan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Terraflow atas bantuan dalam pengambilan data. Penelitian ini didanai oleh Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) atas nama Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia dan dikelola di bawah Program EQUITY (No. Kontrak 4299/B3/DT.03.08/2025 & No. 3029/PKS/ITS/2025).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Q. Gao, L. Fan, S. Wei, Y. Li, Y. Du, dan C. Liu, "Differences evaluation of pavement roughness distribution based on LiDAR data," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 14, 2023, doi: 10.3390/app13148080.
- [2] M. Yadav, B. Lohani, dan A. K. Singh, "Road surface detection from mobile LiDAR data," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. IV-5, pp. 95–101, 2018, doi: 10.5194/isprs-annals-IV-5-95-2018.
- [3] A. A. Zhang dkk., "Intelligent pavement condition survey: Overview of current researches and practices," *Journal of Road Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 257–281, 2024, doi: 10.1016/j.jreng.2024.04.003.
- [4] K. Guo, C. He, M. Yang, dan S. Wang, "A pavement distresses identification method optimized for YOLOv5s," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-07527-3.

- [5] Z. Feng dkk., "Pavement distress detection using terrestrial laser scanning point clouds – Accuracy evaluation and algorithm comparison," *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 3, 2022, doi: 10.1016/j.ojphoto.2021.100010.
- [6] I. Hermawan dkk., "Implementasi mobile laser scanner untuk penilaian International Roughness Index (IRI) jalan tol Trans Sumatera," *Prosiding FIT ISI*, vol. 1, 2021.
- [7] B. Al-Mistarehi, A. Shtayat, R. Imam, dan A. Abdallah, "An automated assessment technique for pavement defects using a laser scanner and deep machine learning," *Civil Engineering Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 1088–1105, 2025, doi: 10.28991/CEJ-2025-011-03-015.
- [8] W. Lin, X. Li, H. Han, Q. Yu, dan Y. H. Cho, "A novel approach for pavement distress detection and quantification using RGB-D camera and deep learning algorithm," *Construction and Building Materials*, vol. 407, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133593.
- [9] W. Tang, S. Huang, Q. Zhao, R. Li, dan L. Huangfu, "An iteratively optimized patch label inference network for automatic pavement distress detection," *arXiv*, 2022. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2005.13298>
- [10] M. Lovrinčević dkk., "Methods of rut depth measurements on forwarder trails in lowland forest," *Forests*, vol. 15, no. 6, 2024, doi: 10.3390/f15061021.
- [11] F. Samadzadegan, F. D. Javan, F. A. Mahini, M. Gholamshahi, dan F. Nex, "Automatic road pavement distress recognition using deep learning networks from unmanned aerial imagery," *Drones*, vol. 8, no. 6, 2024, doi: 10.3390/drones8060244.
- [12] J. A. Mahlberg, H. Li, B. Zachrisson, J. K. Mathew, a dan D. M. Bullock, "Applications of using connected vehicle data for pavement quality analysis," *Frontiers in Future Transportation*, vol. 4, 2024, doi: 10.3389/ffutr.2023.1239744.
- [13] J. K. Mathew, J. Desai, R. S. Sakhare, J. Hunter, dan D. M. Bullock, "Spatiotemporal analysis of pavement roughness using connected vehicle data for asset management," *Journal of Transportation Technologies*, vol. 15, no. 1, pp. 1–16, 2025, doi: 10.4236/jtts.2025.151001.
- [14] H. Yang dkk., "A large-scale image repository for automated pavement distress analysis dan degradation trend prediction," *Scientific Data*, vol. 12, no. 1, 2025, doi: 10.1038/s41597-025-05748-5.
- [15] Z. Lv, Z. Hao, Y. Zhu, dan C. Lu, "A review on automated detection and identification algorithms for highway pavement distress," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 11, 2025, doi: 10.3390/app15116112.
- [16] Consortium of Chinese Contractors, *Suramadu Bridge, Indonesia: Main Bridge (K2+129.50–K2+947.50) – Detailed Design (For Construction), Volume 1 of 4*. Beijing, China, 2006.
- [17] J. S. Miller dan W. Y. Bellinger, *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program*. McLean, VA, USA: Federal Highway Administration (FHWA), 2014. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/13092/13092.pdf>