

ANALISIS INSPEKSI JENIS KERUSAKAN JALAN MENGGUNAKAN DATA PETA ORTHOFOTO HASIL PEMOTRETAN PESAWAT TANPA AWAK (UAV-PHOTOGRAMMETRY)

Helik Susilo¹⁾, Martince Novianti Bani¹⁾, Muhammad Tri Aditya¹⁾, Eri Cahyani¹⁾, Achendri M. Kurniawan¹⁾

¹Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang
Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur.
email: susilohelik@polinema.ac.id

ABSTRAK

Survei data kerusakan jalan bisa dilaksanakan melalui berbagai metode, salah satunya dengan metode survei langsung yaitu pemeriksaan manual. Cara ini cukup lama dan membutuhkan banyak tenaga, sehingga tidak efektif dan efisien. Penelitian ini berfokus pada survei kerusakan jalan menggunakan teknologi drone dengan pengambilan foto udara menggunakan metode UAV-Photogrammetry. Pemotretan udara dilakukan disepanjang jalan yang menjadi wilayah studi. Hasil foto udara yang parsial diolah menggunakan perangkat lunak image processing sehingga menjadi peta orthofoto dan digital elevation model (DEM). Dari data peta ortofoto dan peta DEM dilakukan interpretasi visual dengan mengukur dimensi (panjang, lebar, kedalaman) berbagai macam model kerusakan jalan. Sehingga hasil penelitian menunjukkan model kerusakan jalan yang teridentifikasi dari data peta orthofoto dan peta DEM pada wilayah studi yaitu lubang, retak blok, retak sambung dan tambalan. Akurasi dari dimensi kerusakan jalan yang dihasilkan dari peta orthofoto dan peta DEM dibandingkan dengan dimensi kerusakan jalan yang diukur secara langsung dilapangan mempunyai nilai perbedaan untuk dimensi horizontal sebesar 0,001 - 0,088 m dan dimensi vertikal sebesar 0,010 - 0,019 m, nilai RMSE berkisar antara 0,005 sampai 0,058. Hasil uji statistik t-test memperlihatkan tidak ada perbedaan yang signifikan antara pengukuran dimensi kerusakan jalan dari data peta orthofoto dan peta DEM dengan hasil pengukuran langsung dilapangan.

Kata kunci: Inspeksi, Kerusakan jalan, UAV-Fotogrametri.

ABSTRACT

Survey of road damage data can be conducted by the direct survey method or manual inspection, but that method is quite long and requires a lot of employers, so it is not effective and efficient. This research focuses on the inspection of road damage using drone technology by taking aerial photos using the UAV-Photogrammetry method. Aerial photography was carried out along the roads in the study area. The partial aerial photos are processed using image processing software to become the orthophoto map and digital elevation model (DEM). Road damage data identification was carried out by measuring the dimensions (length, width, and depth) from the orthophoto map and DEM by the visual interpretation method. The research results show that the types of road damage identified from the orthophoto map and DEM in the study area are potholes, block cracks, continuous cracks, and patches. The accuracy of the dimensions of road damage produced from the orthophoto map and DEM compared to the dimensions of road damage measured directly has different values for horizontal of 0.001 - 0.088 m and vertical of 0.010 - 0.019 m, RMSE values range from 0.005 to 0.058. The results of the t-test statistical test show that there is no significant difference between measurements of road damage dimensions from the orthophoto map and DEM and the results of direct measurements.

Keys Word: Inspection, Road Damage, UAV-Photogrammetry.

PENDAHULUAN

Drone merupakan pesawat udara tak berawak *unmanned aerial vehicle* (UAV) yang terbang ribuan kilometer dan drone kecil yang terbang di ruang terbatas. Kendaraan udara yang tidak membawa operator manusia, terbang jarak jauh atau mandiri, dan membawa muatan mematikan atau tidak mematikan dianggap sebagai drone. Kendaraan balistik atau semi balistik, rudal jelajah, proyektil artileri, torpedo, ranjau, dan satelit tidak dapat dianggap sebagai drone. Kemajuan dalam fabrikasi, navigasi, kemampuan kendali jarak jauh, dan sistem penyimpanan daya telah memungkinkan pengembangan berbagai macam drone yang dapat digunakan dalam berbagai situasi di mana kehadiran manusia sulit, tidak mungkin, atau berbahaya. Tergantung pada misi penerbangan drone, ukuran dan jenis peralatan yang dipasang berbeda-beda.

Keuntungan besar dari drone telah menyebabkan banyak sekali penelitian yang fokus pada optimalisasi dan peningkatan kinerja drone ini. Sesuai dengan karakteristik yang disebutkan di atas, drone mempunyai potensi untuk melakukan berbagai operasi termasuk pengintaian, patroli, perlindungan, pengangkutan muatan, dan aerologi. Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan pesawat nirawak/ drone menjadi pilihan alternatif dalam menginspeksi lokasi atau objek tertentu. *Drone* adalah instrumen penyedia data berbasis video atau foto. Dalam penggunaannya untuk inspeksi, *drone* dinilai lebih memberikan nilai efektif serta efisien perihal waktu dan biaya, juga dapat dioperasikan lebih dekat dengan objek untuk mendapatkan citra objek dengan resolusi beberapa sentimeter [1]. Selain itu, *drone* juga dapat digunakan untuk mengumpulkan data di area yang luas dalam waktu yang lebih singkat. *Drone* dapat dikendalikan dari jarak jauh atau melalui rencana penerbangan yang dikendalikan oleh perangkat lunak yang terintegrasi dengan GPS (*Global Positioning System*).

Jalan termasuk dalam infrastruktur transportasi yang penting untuk mendukung pertumbuhan ekonomi dan kegiatan lainnya. Ketahanan pembangunan jalan yang direncanakan tidak sesuai dengan jangka waktu yang direncanakan, dan jalan mengalami kerusakan sebelum mencapai akhir umur pakainya. Faktor-faktor seperti cuaca, suhu, kelembaban, dan berat lalu lintas kendaraan dapat merubah serta merusak struktur perkerasan lentur dan menimbulkan berbagai tegangan yang dapat merusak permukaan jalan, tidak hanya mempengaruhi penggunaan jalan tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi. [2]. Survei dan pendataan kerusakan jalan bisa dilakukan melalui berbagai cara, salah satunya yaitu metode survei dengan menyusuri jalan dan mengukur kerusakan jalan dengan inspeksi manual [3]. Cara ini cukup lama dan memerlukan tenaga yang besar sehingga tidak efektif dan efisien [4]. Untuk mengatasi keterbatasan proses penilaian visual, beberapa upaya telah dilakukan untuk mengembangkan alat teknis untuk mengakuisisi dan deteksi kerusakan permukaan jalan [5]. Dalam beberapa dekade terakhir, pengembangan dan penggunaan metode *computer vision* dalam aplikasi teknik perkerasan telah mengalami pertumbuhan yang sangat cepat [6].

Data kerusakan jalan dapat dikumpulkan melalui rekaman video dengan kamera yang dipasang pada kendaraan [7], selain itu pengumpulan data berbasis kamera juga dapat menggunakan wahana drone atau yang disebut dengan metode UAV-Photogrammetry. Pengoperasian sistem UAV membuka berbagai aplikasi baru dalam domain jarak dekat, menggabungkan fotogrametri udara dan terestrial. Ini adalah aplikasi baru yang hampir real-time dan alternatif berbiaya rendah dibandingkan fotogrametri udara berawak klasik. Fitur utama fotogrametri UAV dipertimbangkan sehubungan dengan biaya (biaya rendah), ketinggian terbang (rendah-tinggi), kemampuan akuisisi gambar secara real-time sehingga kualitasnya bergantung pada fitur sensor, kinerja penerbangan. Membandingkan penggunaan UAV dan pesawat berawak, UAV dapat digunakan dalam pemetaan situasi berisiko tinggi (misalnya, daerah bencana, zona pegunungan dan vulkanik, banjir, gempa bumi dan berbagai daerah kecelakaan, dll.), tanpa menimbulkan bahaya terhadap kehidupan manusia. pilot. Dengan sistem UAV, karena ukurannya yang kecil, gambar dapat diambil sangat dekat dengan suatu objek dalam ruang yang sangat kecil atau di wilayah yang terlindung oleh pepohonan atau badan air, jalan kota yang sempit, dll. Kendaraan UAV yang murah bersifat ringan, oleh karena itu kendaraan amatir kamera dapat diintegrasikan sedemikian rupa sehingga resolusi dan kualitas gambar mungkin tidak selalu memenuhi kebutuhan pengguna.

Kemungkinan penerapan UAV untuk pemetaan meluas ke kebutuhan yang sangat khusus, misalnya analisis kerusakan jalan.

Penerapan metode ini memiliki kecenderungan untuk menjadi lebih ekonomis, konsisten, serta memungkinkan pemeriksaan yang lebih cepat yang mencakup area yang lebih besar [8]. Analisis [9] bahwa data orthofoto hasil pemotretan menggunakan metode UAV-Photogrammetry dapat mendeteksi sampai 6 jenis hasil kerusakan jalan yaitu kerusakan retak kulit buaya, lubang, tambalan, amblas, sungkur, dan retak tepi. Penelitian ini berfokus pada survei kerusakan jalan menggunakan teknologi *drone* dengan melakukan foto udara dengan metode UAV-Photogrammetry dan mengkomparasikan antara dimensi kerusakan yang diukur di atas peta orthofoto dengan dimensi hasil pengecekan kerusakan dilapangan. Survei kerusakan dengan metode ini diharapkan dapat mengurangi waktu survey dan juga jumlah personil pada pekerjaan survey kerusakan jalan sehingga lebih efisien dan efektif.

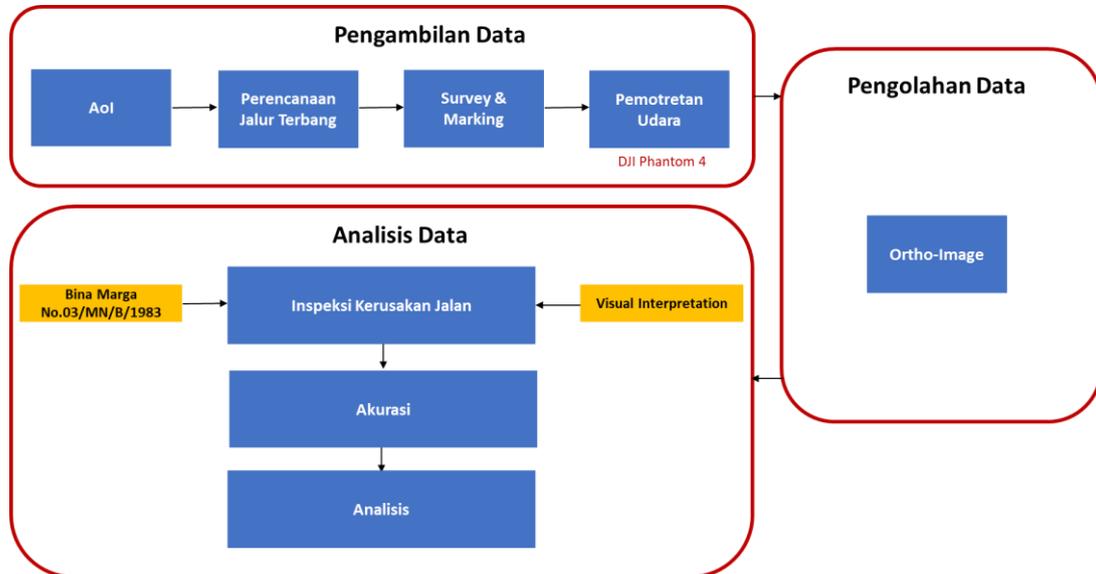
METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada jalan raya Tegalweru, Kecamatan Dau, Kabupaten Malang, **Gambar 1** berikut menampilkan lokasi penelitian. Dari survei awal, diketahui jenis pad konstruksi perkerasan jalan tersebut yaitu konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*), serta terlihat kondisi jalan tersebut mengalami beberapa jenis kerusakan, sehingga lokasi tersebut layak menjadi objek penelitian ini.



Gambar 1. Lokasi Penelitian.

Penelitian ini dilakukan dengan tiga tahapan yaitu, tahap pengumpulan data, tahap pengolahan data, serta tahap evaluasi data atau analisis data. Gambar 2 menampilkan diagram tahapan penelitian.



Gambar 2. Tahapan penelitian.

Proses pengumpulan data diawali dengan perencanaan jalur penerbangan. Pengambilan data foto udara memerlukan perencanaan jalur penerbangan agar foto yang dihasilkan berkualitas baik. Jalur penerbangan direncanakan berdasarkan daerah penelitian, sehingga dapat ditentukan bentuk dan ukuran lokasi pengambilan gambar. **Tabel 1** menampilkan parameter perencanaan jalur terbang yang digunakan untuk pengambilan data foto udara. Parameter pada **Tabel 1** dimasukan ke dalam perangkat lunak navigasi *drone* berbasis android untuk otomasi jalur terbang.

Tabel 1. Parameter Pemotretan Udara.

Parameter Pemotretan Udara		
1	Tinggi Terbang (<i>Flight Altitude</i>)	45 m
2	GSD (<i>Ground Sample Distance</i>)	1 cm / px
3	Tampalan Depan (<i>Front Lap</i>)	80 %
4	Tampalan Samping (<i>Side Lap</i>)	75 %
5	Kecepatan Terbang (<i>Flight Speed</i>)	3 m/s
6	Sudut Kamera (<i>Gimbal Angle</i>)	-90
7	Arah Terbang (<i>Flight Direction</i>)	167

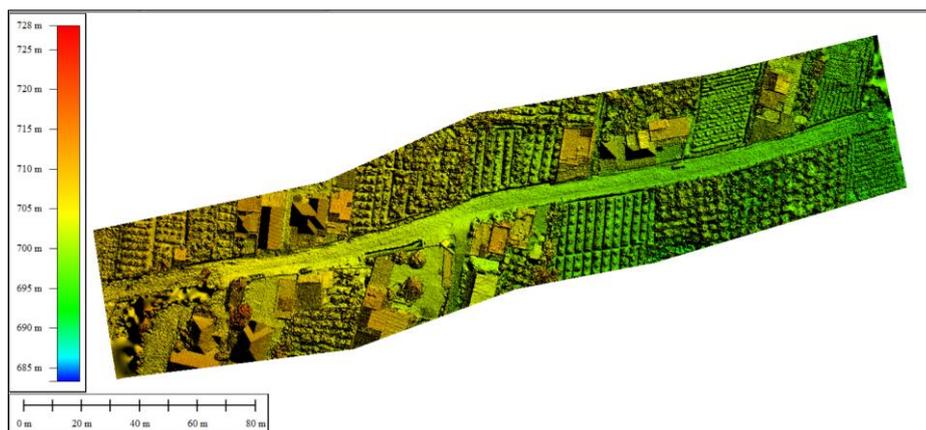
Pemotretan udara dilakukan sepanjang area studi secara otomatis berdasarkan parameter pada **Tabel 1** yang sudah dimasukan ke dalam perangkat lunak navigasi berbasis android. Pemotretan udara menghasilkan foto parsial sebanyak 170 buah, selanjutnya hasil pemotretan udara dari *drone* berupa foto-foto parsial kemudian diproses mejadi peta foto udara yang utuh (peta orthofoto) dan mempunyai geometri sistem koordinat. Pada **Gambar 3** menampilkan peta orthofoto dari hasil pemotretan udara menggunakan metode UAV-Fotogrametri. Peta orthofoto tersebut mempunya *ground sample distance* (GSD) sebesar 1 cm/px, peta tersebut dapat digunakan untuk melakukan inspeksi atau identifikasi berbagai jenis kerusakan jalan menggunakan metode

intepretasi visual. Inspeksi atau identifikasi jenis kerusakan jalan tersebut juga dapat mengukur dimensi panjang (p), lebar (l) dan kedalaman (d) dari masing-masing jenis kerusakan.



Gambar 3. Peta orthofoto.

Hasil dari peta orthofoto pada Gambar 3. selanjutnya dikonversi menjadi bentuk peta *Digital Elevation Model* (DEM). Peta DEM merupakan representasi model elevasi digital yang dimungkinkan untuk mengukur ketinggian relatif dari berbagai titik di permukaan dalam format *raster/grid* yang dapat diturunkan menjadi informasi elevasi atau ketinggian. Gambar 4. Menampilkan peta DEM hasil pemotretan udara menggunakan metode UAV-Fotogrametri. Dari data peta DEM dapat digunakan untuk mengukur dimensi vertikal atau kedalaman dari kerusakan jalan seperti lubang, depresi, dll.

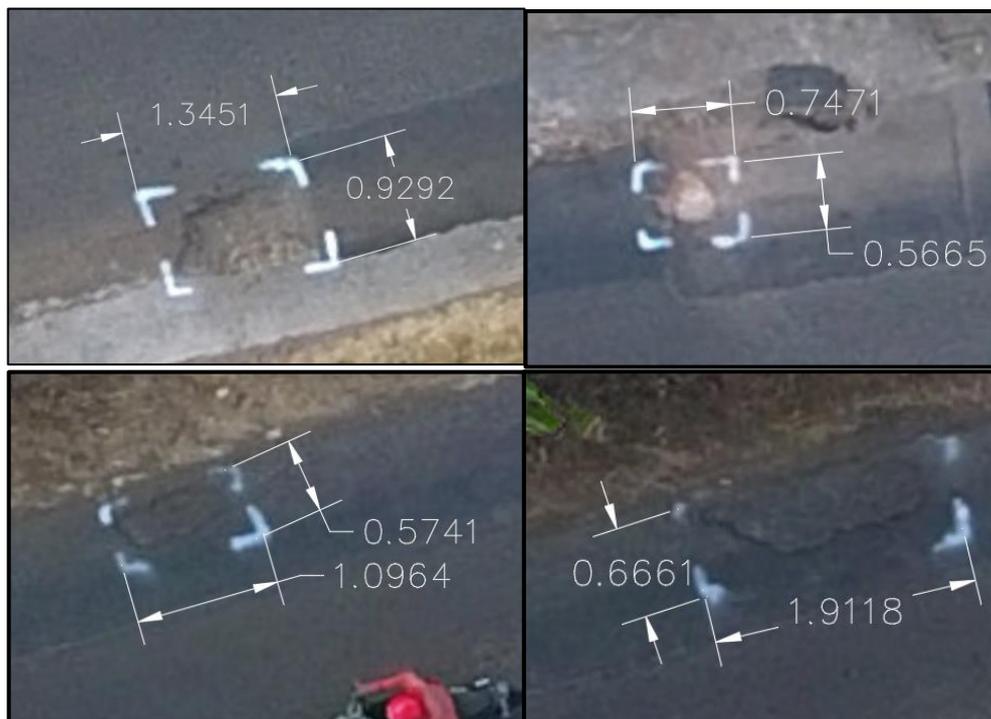


Gambar 4. Peta *Digital Elevation Model*.

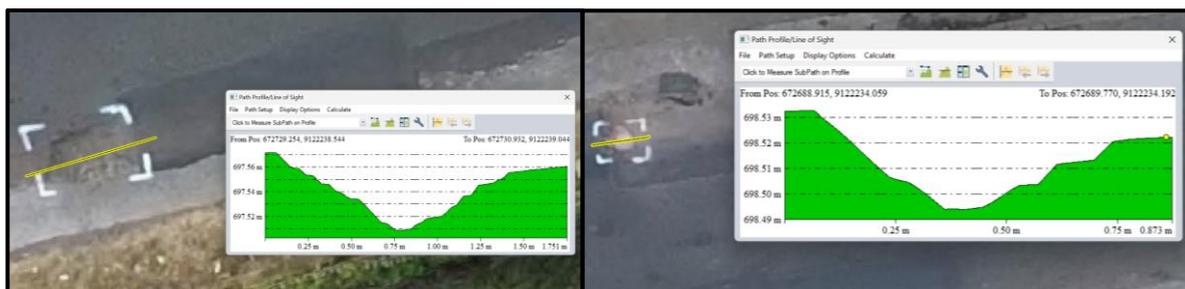
Identifikasi jenis kerusakan jalan dari data peta ortofoto dan peta DEM dilakukan melalui Teknik interpretasi visual. Interpretasi citra adalah suatu metode memperoleh informasi tentang objek berlandaskan dengan identifikasi dan interpretasinya pada foto udara atau mosaik ortofoto. Interpretasi masalah adalah penerjemahan konten yang berbeda berdasarkan persepsi pengguna [10]. Kerusakan diinterpretasi dari data peta orthofoto untuk dimensi horizontal dan peta DEM untuk dimensi vertikal. Berikut jenis kerusakan jalan yang dapat diinterpretasi pada area studi,

1. Lubang (Potholes)

Lubang merupakan kerusakan berbentuk mangkuk yang dapat menampung dan menyerap air pada jalan. Dari data peta ortofoto, lubang bisa diidentifikasi dengan metode interpretasi visual, identifikasi tersebut berupa dimensi panjang, lebar dan kedalaman. Pengukuran data dimensi horizontal (panjang x lebar) menggunakan perangkat lunak *Autocad* seperti pada **Gambar 5**. dan untuk dimensi kedalaman menggunakan perangkat lunak *global mapper* seperti pada **Gambar 6**.



Gambar 5. Interpretasi visual kerusakan jalan jenis lubang.





Gambar 6. Pengukuran kedalaman kerusakan jalan jenis lubang dari data DEM.

2. Retak Blok (*Block Cracking*)

Retakan kotak-kotak/balok ini berbentuk balok-balok atau bujur sangkar pada perkerasan jalan. Retakan ini umumnya terjadi pada lapisan tambahan (overlay) yang mencerminkan pola retakan perkerasan di bawahnya. Dari data peta orthofoto retak blok dapat diidentifikasi melalui metode intpretasi visual, identifikasi tersebut berupa dimensi panjang dan lebar. Pengukuran data dimensi horizontal (panjang x lebar) menggunakan perangkat lunak Autocad seperti pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Intepretasi visual kerusakan jalan jenis retak blok.

3. Retak Sambung (*Joint Reflection Cracking*)

Kerusakan ini biasa terjadi pada perkerasan aspal yang diletakkan di atas perkerasan beton. Kerusakan ini biasa terjadi pada perkerasan aspal yang diletakkan di atas perkerasan beton semen Portland. Retakan yang muncul pada lapisan aspal tambahan (overlay), mencerminkan pola retakan yang berbeda pada perkerasan beton lama di bawahnya.. Melalui data peta orthofoto retak sambung dapat diidentifikasi melalui metode intpretasi visual, identifikasi tersebut berupa dimensi panjang dan lebar. Pengukuran data dimensi horizontal (panjang x lebar) menggunakan perangkat lunak Autocad seperti pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Intepretasi visual kerusakan jalan jenis retak sambung.

4. Tambalan (*Patching and Utility Cut Patching*)

Tamblan/Penambalan merupakan suatu bidang perkerasan yang bertujuan untuk memulihkan perkerasan yang rusak dengan material baru untuk memperbaiki perkerasan eksisting. Penambalan merupakan suatu pertimbangan untuk mengganti kerusakan dengan material baru yang lebih baik untuk memperbaiki perkerasan sebelumnya. Penambalan dilakukan terhadap seluruh atau sebagian kondisi kerusakan pada badan jalan. Dari data peta ortofoto, patch dapat diidentifikasi dengan menggunakan metode interpretasi visual, identifikasinya berupa dimensi panjang dan lebar. Pengukuran data dimensi horizontal (panjang x lebar) menggunakan perangkat lunak Autocad seperti pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Intepretasi visual kerusakan jalan jenis retak tambalan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dari akurasi dimensi kerusakan jalan yang diukur dari data peta orthofoto dan peta DEM menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE). RMSE adalah akar kuadrat dari rata-rata kuadrat selisih dimensi dari pengukuran dari data orthofoto dan peta DEM dengan hasil pengukuran langsung di lapangan yang akurasi lebih tinggi. Persamaan 1 merupakan rumus dasar yang dipakai untuk memperoleh RMSE.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(M_{Orthofoto} - M_{Lapangan})^2}{N-1}} \quad (1)$$

Dimana:

$M_{Orthofoto}$: Dimensi dari pengukuran orthofoto

$M_{Lapangan}$: Dimensi dari pengukuran lapangan

N : Jumlah sampel

Pengukuran dimensi dari kerusakan jalan di atas peta orthofoto dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Autocad, Gambar 9. menampilkan proses pengukuran dimensi kerusakan dari data peta orthofoto.



Gambar 9. Pengukuran dimensi kerusakan jalan jenis retak tambalan dari data peta orthofoto.

Hasil sampel pengukuran dimensi kerusakan jalan dari data peta *orthofoto* terdapat pada **Tabel 2** Pada sampel tersebut jenis kerusakan jalan yaitu lubang, lubang di ukur panjang (p), lebar (l), dan kedalaman (d).

Tabel 2. Identifikasi Pada Peta Orthofoto

No	Jenis Kerusakan	p (m)	l (m)	L (m ²)	d (m)
1	Lubang I	1,345	0,929	1,250	0,075
2	Lubang II	0,934	0,541	0,505	0,039
3	Lubang III	0,747	0,567	0,424	0,041
4	Lubang IV	1,097	0,574	0,630	0,069
5	Lubang V	1,912	0,666	1,273	0,050

Pengukuran dimensi kerusakan jalan dilapangan dilakukan secara langsung di lapangan, **Gambar 10** Menampilkan proses pengukuran langsung di lapangan.



Gambar 10. Pengukuran dimensi kerusakan jalan dilapangan.

Hasil sampel pengukuran dimensi kerusakan yang dilakukan secara langsung di lapangan terdapat pada **Tabel 3**. Pada sampel tersebut tersebut jenis kerusakan jalan yaitu lubang, lubang di ukur panjang (p), lebar (l), dan kedalaman (d).

Tabel 3. Identifikasi Dilapangan

No	Jenis Kerusakan	p	l	L	d
1	Lubang I	1,400	0,900	1,260	0,090
2	Lubang II	0,860	0,540	0,464	0,050
3	Lubang III	0,780	0,730	0,569	0,060
4	Lubang IV	1,070	0,580	0,621	0,055
5	Lubang V	2,000	0,700	1,400	0,040

Perbedaan antara hasil pengukuran di atas peta orthofoto dengan pengukuran langsung dilapangan terdapat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Error

p	l	L	d
-0,055	0,029	-0,010	-0,015
0,074	0,001	0,041	-0,011
-0,033	-0,163	-0,146	-0,019
0,027	-0,006	0,009	0,014
-0,088	-0,034	-0,127	0,010

Dari data **Tabel 4**, dapat dilihat bahwa perbedaan nilai untuk dimensi panjang berkisar antara 0,027 m sampai 0,088, untuk dimensi lebar berkisar antara 0,001 sampai 0,034, untuk luas berkisar antara 0,009 sampai 0,0127, dan untuk kedalam lubang berkisar antara 0,010 sampai 0,019. Selisih untuk dimensi horisontal (p x l) masih dimungkinkan lebih akurat, hal tersebut bergantung pada kualitas pada waktu melakukan digitasi dimensi di atas peta orthofoto, semakin teliti melakukan digitasi maka akan semakin akurat. Untuk nilai RMSE ditampilkan pada tabel 5 berikut.

Tabel 5. Nilai RMSE

Sampel	RMSE
Panjang	5 0,019
Lebar	5 0,043
Luas	5 0,058
Kedalaman	5 0,005

Dari data **Tabel 5** dapat dilihat bahwa nilai RMSE dari data panjang, lebar, luas dan kedalaman berkisar antara 0,005 sampai 0,058. Nilai RMSE yang paling kecil terdapat pada dimensi kedalaman dan nilai RMSE paling besar terdapat pada dimensi luas. Perbedaan dimensi antara identifikasi di atas peta orthofoto dengan identifikasi di lapangan diuji secara statistik dengan memakai uji *t-test*. Uji *t-test* untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara hasil dimensi hasil identifikasi di atas peta orthofoto dengan dimensi hasil identifikasi dilapangan. Uji statistik dilakukan secara sederhana menggunakan *one sample t-test* untuk perbedaan panjang, lebar, luas dan kedalaman antara metode orthofoto terhadap metode pengukuran langsung dilapangan, dengan hipotesis seperti berikut:

Ho =Tidak terdapat perbedaan signifikan antara hasil identifikasi dimensi kerusakan jalan metode orthofoto dengan identifikasi langsung di lapangan.

H1 =Terdapat perbedaan signifikan antara hasil identifikasi dimensi kerusakan jalan metode orthofoto dengan identifikasi langsung di lapangan.

Hasil estimasi uji statistik *t-test* dapat dilihat pada tabel 6 berikut ini,

Tabel 6. Hasil *t-test*

	t hitung	t tabel	kesimpulan
Panjang	-0,024	2,306	diterima
Lebar	-0,103	2,306	diterima
Luas	-0,053	2,306	diterima
Kedalaman	-0,119	2,306	diterima

Dari data tabel 6. hasil uji *t-test*, jika t hitung lebih kecil daripada t tabel maka nilai Ho diterima. Dari data **Tabel 6** tersebut menunjukkan nilai t hitung lebih kecil dari t tabel pada semua jenis dimensi ukuran, dari hasil tersebut menyatakan tidak ada perbedaan yang signifikan antara data dimensi hasil pengukuran diatas peta orthofoto dengan dimensi hasil pengukuran langsung di lapangan. Hasil tersebut juga linier dengan hasil penelitian dari [11]

SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa survei data kerusakan jalan dapat dilakukan dengan menggunakan drone dengan metode UAV-Fotogrametri. Jenis kerusakan jalan yang teridentifikasi dari data peta orthofoto dan peta DEM pada wilayah studi yaitu lubang, retak blok, retak sambung dan tambalan. Akurasi dari dimensi kerusakan jalan yang dihasilkan dari peta orthofoto dan peta DEM dibandingkan dengan dimensi kerusakan jalan yang diukur secara langsung dilapangan mempunyai nilai perbedaan untuk dimensi horizontal dengan nilai 0,001 - 0,088 m dan dimensi vertikal sebesar 0,010 – 0,019 m, nilai RMSE berkisar antara 0,005 sampai 0,058. Hasil uji statistik *t-test* memperlihatkan tidak ada perbedaan yang signifikan antara pengukuran dimensi kerusakan jalan dari data peta orthofoto dan peta DEM dengan hasil pengukuran langsung dilapangan.

REFERENSI

- [1] H. Eisenbeiß, "UAV Photogrammetry," 2009.
- [2] D. A. Roberts and M. Herold, "Mapping asphalt road conditions with hyperspectral remote sensing," 2005. [Online]. Available: <http://www.ncgia.ucsb.edu/ncrst/>,
- [3] P. L. Y. Tiong, M. Mustaffar, and M. B. Rosli, "Road surface assessment of pothole severity by close range digital photogrammetry method PTSF on Two-lane Highways View project Sustainable Performance of Formwork System in Malaysia View project," 2012, doi: 10.5829/idosi.wasj.2012.19.06.3353.
- [4] G. Leonardi, V. Barrile, R. Palamara, F. Suraci, and G. Candela, "3D mapping of pavement distresses using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system," in *Smart Innovation, Systems and Technologies*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2019, pp. 164–171. doi: 10.1007/978-3-319-92102-0_18.
- [5] A. Ragnoli, M. R. De Blasiis, and A. Di Benedetto, "Pavement distress detection methods: A review," *Infrastructures*, vol. 3, no. 4. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Dec. 19, 2018. doi: 10.3390/infrastructures3040058.
- [6] C. Koch, K. Georgieva, V. Kasireddy, B. Akinci, and P. Fieguth, "A review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 29, no. 2, pp. 196–210, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.aei.2015.01.008.
- [7] S. C. Radopoulou, I. Brilakis, K. Doycheva, and C. Koch, "A Framework for Automated Pavement Condition Monitoring," in *Construction Research Congress 2016: Old and New Construction Technologies Converge in Historic San Juan - Proceedings of the 2016 Construction Research Congress*,

- CRC 2016, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2016, pp. 770–779. doi: 10.1061/9780784479827.078.
- [8] E. Schnebele, B. F. Tanyu, G. Cervone, and N. Waters, “Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment,” *European Transport Research Review*, vol. 7, no. 2, Jun. 2015, doi: 10.1007/s12544-015-0156-6.
- [9] I. Mandaya and Harintaka, “Pemanfaatan Teknologi UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Untuk Identifikasi Dan Klasifikasi - Jenis Kerusakan Jalan,” *Rekayasa Sipil*, vol. 14, no. 3, 2020, Accessed: Sep. 23, 2023. [Online]. Available: <https://rekayasasipil.ub.ac.id/index.php/rs/article/view/698>
- [10] H. Svatonova, “Analysis of visual interpretation of satellite data,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, pp. 675–681. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B2-675-2016.
- [11] M. Zeybek, S. Bicici, T. Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi, and S. Biçici, “Road Distress Measurements Using UAV Application of LiDAR Systems in Forest Ecosystems View project Road Surface Monitoring with UAV View project Turkish Journal of Remote Sensing and GIS Road Distress Measurements Using UAV İHA Kullanarak Yol Bozukluk Ölçmeleri,” 2020.