

TINJAUAN SISTEMATIS KOMPARASI PCI DAN VISI KOMPUTER UNTUK EVALUASI KERUSAKAN JALAN

**Andi Sahrul Hidayat¹, Ilyas Ichsan², Nasir Bumulo³*

^{1,2,3}Universitas Gorontalo, Indonesia

**andi_sahrul93@yahoo.com*

Abstrak: Tinjauan Sistematis Komparasi PCI dan Visi Komputer untuk Evaluasi Kerusakan Jalan

Penelitian ini bertujuan menganalisis secara komparatif metode *Pavement Condition Index* (PCI) konvensional dan pendekatan berbasis visi komputer dalam evaluasi kerusakan perkerasan jalan di Indonesia. Metode yang digunakan adalah *Systematic Literature Review* (SLR) berdasarkan pedoman PRISMA 2020. Data dikumpulkan melalui penelusuran terstruktur pada basis data Scopus dan Google Scholar terhadap 27 studi terpilih yang memenuhi kriteria inklusi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PCI memiliki akurasi tinggi dan telah diakui secara internasional untuk mengevaluasi 20 jenis kerusakan, tetapi memerlukan waktu, biaya, dan tenaga besar serta mengandung subjektivitas. Sebaliknya, visi komputer dengan algoritma *deep learning* mampu memberikan hasil yang cepat, objektif, dan skalabel dengan akurasi 76–95%, meskipun masih terbatas pada jenis kerusakan tertentu dan dipengaruhi faktor lingkungan. Penelitian ini merekomendasikan pendekatan hibrida yang mengintegrasikan kedua metode serta pemanfaatan teknologi berbiaya rendah, seperti *smartphone* dan UAV berbasis SIG, guna mendukung pemeliharaan infrastruktur jalan yang lebih efisien di Indonesia.

Kata kunci: **Evaluasi Perkerasan; Kerusakan Jalan; Metode PCI; Tinjauan Literatur; Visi Komputer.**

Abstract: A Systematic Review Comparing PCI and Computer Vision for Road Damage Evaluation

This study aims to conduct a comparative analysis of the conventional Pavement Condition Index (PCI) method and a computer vision-based approach in evaluating road pavement damage in Indonesia. The method used was a Systematic Literature Review (SLR) based on the PRISMA 2020 guidelines. Data were collected through a structured search of the Scopus and Google Scholar databases, identifying 27 selected studies that met the inclusion criteria. The results show that PCI has high accuracy and is internationally recognized for evaluating 20 types of damage, but it requires significant time, cost, and manpower and involves subjectivity. Conversely, computer vision using deep learning algorithms can provide fast, objective, and scalable results with 76–95% accuracy, although it is still limited to specific types of damage and is influenced by environmental factors. This study recommends a hybrid approach that integrates both methods, along with the use of low-cost technologies, such as smartphones and GIS-based UAVs, to support more efficient road infrastructure maintenance in Indonesia.

Keywords: Pavement Evaluation; Road Damage; PCI Method; Literature Review; Computer Vision.

History & License of Article Publication:

Received: 06/05/2026 Revision: 11/05/2026 Published: 01/06/2026

DOI: <https://doi.org/10.37971/radial.vXXiXX.XXX>



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

PENDAHULUAN

Infrastruktur jalan merupakan komponen vital dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan konektivitas antarwilayah (Hafel et al., 2023). Jalan menjadi infrastruktur yang menjamin konektivitas antar wilayah tetap terjadi, sehingga kualitas jalan yang baik akan menjamin kelancaran pergerakan moda transportasi yang melintas (Hafel et al., 2023). Seiring waktu, tingkat pelayanan jalan mengalami penurunan signifikan yang disebabkan oleh akumulasi beban kendaraan berat, faktor degradasi iklim tropis, maupun keausan material konstruksi (Hafel et al., 2023). Penurunan kualitas ini terwujud dalam kerusakan fisik seperti lubang (*potholes*), tambalan (*patches*), retak buaya (*alligator cracks*), retak memanjang (*longitudinal cracks*), dan retak melintang (*transverse cracks*) yang pada akhirnya mengancam keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan (Abdo et al., 2024; Setyanto et al., 2024).

Guna mengatasi laju degradasi tersebut, penilaian dan pemantauan kondisi permukaan jalan menjadi tahapan krusial sebelum program pemeliharaan atau rehabilitasi jalan ditetapkan (Setyanto et al., 2024). Metode asesmen tradisional saat ini sangat bergantung pada pengamatan visual manusia, di mana *Pavement Condition Index* (PCI) menjadi standar emas (*gold standard*) yang diakui secara internasional (Martinelli et al., 2022). Namun, terdapat kesenjangan (*research gap*) antara kebutuhan asesmen infrastruktur yang berskala luas dengan keterbatasan metode konvensional; inspeksi manual PCI terbukti padat karya, menelan biaya dan waktu yang signifikan (Mukti & Tahar, 2022), serta sangat rentan terhadap kesalahan (*human error*) dan bias subjektivitas penilai (Malekloo et al., 2024).

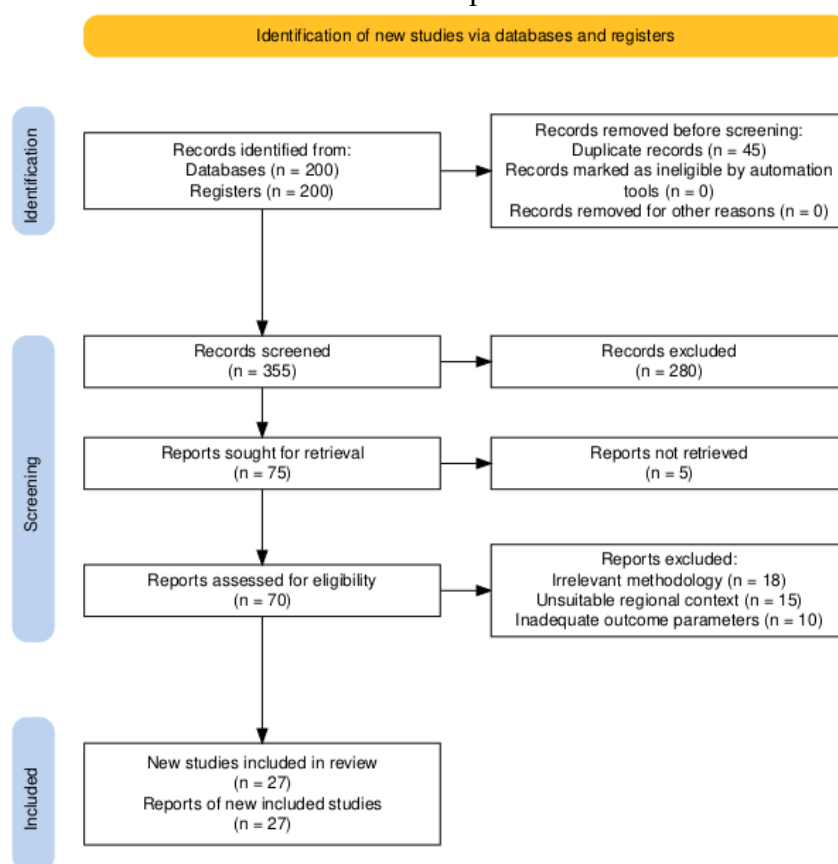
Menjawab keterbatasan tersebut, kemajuan teknologi global mengarah pada implementasi kecerdasan buatan (AI) dan visi komputer sebagai alternatif deteksi kerusakan perkerasan otomatis yang lebih objektif dan cepat (Malekloo et al., 2024). Meskipun literatur mengenai algoritma deteksi gambar telah banyak diterbitkan, kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada sintesis komparatif yang menempatkan teknologi canggih tersebut berhadapan-hadapan dengan metode PCI konvensional secara spesifik dalam konteks Indonesia negara berkembang dengan tantangan geografis luas, variasi tipe perkerasan, dan keterbatasan anggaran pemeliharaan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komparatif kapabilitas metode PCI dan visi komputer dalam evaluasi kerusakan perkerasan jalan, guna mengidentifikasi kelebihan, keterbatasan, serta merumuskan strategi integrasi yang paling adaptif bagi manajemen infrastruktur jalan di Indonesia.

METODE

Penelitian ini menerapkan metode Tinjauan Literatur Sistematis (*Systematic Literature Review*) untuk mengomparasi kapabilitas PCI dan visi komputer. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran artikel pada basis data Scopus dan Google Scholar (Jan et al., 2023) dengan instrumen kata kunci yang dikombinasikan melalui operator Boolean (Ali et al., 2022). Berdasarkan prosedur PRISMA 2020, pencarian awal mengidentifikasi 400 artikel yang kemudian disaring secara ketat hingga menyisakan 27 studi terpilih untuk disintesis. Seluruh sumber pustaka yang diacu telah dipastikan berasal dari publikasi 10 tahun terakhir guna menjaga kebaruan informasi.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran literatur pada basis data bibliografi yang diakui secara luas, yaitu Scopus dan Google Scholar (Jan et al., 2023). Instrumen yang digunakan berupa kata kunci pencarian yang dikombinasikan dengan operator Boolean secara eksplisit. Untuk basis data Scopus, *string* pencarian yang digunakan adalah: ("pavement condition index" OR "PCI") and ("computer vision" OR "deep learning" OR "crack detection") and ("road pavement") and ("Indonesia" OR "developing countries") (Ali et al., 2022). Sementara itu, penyesuaian sintaks serupa dilakukan pada Google Scholar guna memperluas cakupan pencarian literatur abu-abu (*grey literature*).

Prosedur pelaksanaan penelitian dimulai dari perumusan pertanyaan penelitian, pengembangan strategi pencarian, serta penetapan kriteria inklusi dan eksklusi. Proses seleksi studi mengikuti alur PRISMA 2020 secara sistematis (lihat Gambar 1). Dari 400 artikel hasil pencarian awal, 45 duplikat dieliminasi, sehingga tersisa 355 artikel untuk disaring berdasarkan judul dan abstrak. Sebanyak 280 artikel dieliminasi karena tidak relevan secara topik. Pada tahap telaah naskah lengkap terhadap 70 artikel, 42 artikel dieliminasi dengan alasan spesifik: (1) metodologi tidak sesuai karena bukan merupakan studi primer evaluasi perkerasan ($n=18$); (2) konteks wilayah tidak relevan karena tidak dapat digeneralisasi untuk negara berkembang ($n=15$); dan (3) parameter hasil tidak memadai karena tidak mencantumkan metrik akurasi kuantitatif ($n=10$). Pada akhirnya, 27 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dipilih untuk dianalisis.



Gambar 1. Diagram Alir PRISMA 2020 Proses Seleksi Studi

Sumber: Hasil Pengolahan Data Peneliti, 2026

Proses ekstraksi data dilakukan secara terstruktur menggunakan matriks formulir yang memuat tujuan studi, metode deteksi, parameter akurasi, dan kondisi pengujian. Data tersebut diekstraksi dan diverifikasi silang oleh dua peneliti untuk meminimalkan bias. Kualitas studi dinilai secara kritis menggunakan instrumen *Quality Assessment* (QA) kustom yang diadaptasi untuk studi eksperimental, guna mengevaluasi keandalan metode, kondisi pengujian, validitas *dataset*, serta kelengkapan dokumentasi algoritmanya. Analisis data dilakukan secara kualitatif komparatif. Hasil analisis kemudian disintesis untuk mengidentifikasi kelebihan, keterbatasan, serta peluang integrasi kedua metode dalam evaluasi kondisi perkerasan jalan.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Berdasarkan literatur yang dikaji, *Pavement Condition Index* (PCI) merupakan skala numerik (0-100) berbasis ASTM D6433-23 yang dikembangkan oleh *U.S. Army Corps of Engineers* untuk menilai kondisi struktural dan operasional perkerasan (Mei et al., 2022; Rengifo et al., 2024). Perhitungan PCI didasarkan pada formulasi matematika akurat yang mengidentifikasi 20 jenis kerusakan, tingkat keparahan, dan kuantitasnya dari hasil inspeksi visual (Bergera et al., 2021; Rengifo et al., 2024). Di Indonesia, metode ini terbukti memberikan informasi detail untuk menetapkan prioritas preservasi jalan; misalnya, studi di Raya Lambah Maninjau menghasilkan PCI 62 (kondisi baik), sedangkan di jalan Palur-Sragen-Mantingan menunjukkan PCI rata-rata 42,56 akibat dominasi kerusakan sungkur dan lubang (AS, 2021; Setyanto et al., 2024). Namun, eksekusi PCI di lapangan memiliki hambatan mendasar: sebagaimana ditunjukkan oleh studi (Mukti & Tahar, 2022), sulit dilakukan tanpa dukungan staf terlatih (Muslikah & Yuliana, 2023), proses inspeksi manual memakan waktu berminggu-minggu, menelan biaya tinggi, serta berisiko terhadap keselamatan teknisi (Martinelli et al., 2022). Lebih lanjut, perhitungan PCI sangat rentan terhadap inkonsistensi akibat diskriminasi visual yang subjektif antar penilai (Chen et al., 2024; Ibragimov et al., 2024).

Sebagai solusi alternatif, evaluasi berbasis visi komputer berkembang pesat dari teknik ekstraksi fitur tradisional menuju arsitektur *deep learning* (Qureshi et al., 2022; S. Xu et al., 2025). Algoritma termutakhir seperti *Convolutional Neural Networks* (CNN), YOLO, dan *Vision Transformer* (ViT) terbukti mampu menyegmentasi gambar kerusakan secara lebih cepat (Al-sabaei et al., 2024; Ijari & Paternina-Arboleda, 2024; Sun et al., 2025; Zhang et al., 2024). Tren aplikasi visi komputer saat ini banyak memanfaatkan sensor berbiaya rendah. Gambar yang diambil dari kamera *smartphone* dapat dikombinasikan dengan data akselerometer kendaraan untuk mengestimasi korelasi vibrasi dengan PCI ($R^2 = 0,85-0,9$) secara *real-time* (Al-sabaei et al., 2024; Martinelli et al., 2022). Di sisi lain, *Unmanned Aircraft Systems* (UAS/UAV) yang dikawinkan dengan perangkat lunak *Faster-RCNN* mampu menangkap keadaan jalan berskala luas secara aman dan otomatis (Chen et al., 2024; Rengifo et al., 2024). Deskripsi komparasi parameter teknis antara kedua metode dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Ringkas Metode PCI Konvensional dan Visi Komputer

Parameter	PCI Konvensional	Visi Komputer (Deep Learning)
Akurasi Identifikasi	Komprehensif untuk 20 jenis kerusakan jalan (Hafel et al., 2023)	Cukup tinggi (76-95%), bergantung pada kualitas model (Abbas & Ismael, 2021; Ibragimov et al., 2024)
Subjektivitas Data	Tinggi, rawan inkonsistensi penilai (Ibragimov et al., 2024)	Rendah, sangat konsisten dan objektif (Ibragimov et al., 2024)
Biaya & Waktu	Biaya alat rendah, namun biaya pekerja tinggi dan lambat (Mukti & Tahar, 2022; Qureshi et al., 2022)	Biaya <i>setup</i> tinggi, namun operasional rendah dan sangat cepat (Rengifo et al., 2024)
Cakupan Kerusakan	Sempurna (mengcover 20 tipe kerusakan) (Wasiq & Golroo, 2024)	Terbatas (fokus pada <i>crack</i> dan lubang berpola sederhana) (Wasiq & Golroo, 2024)
Sensitivitas Eksternal	Fleksibel terhadap ragam kondisi lingkungan (Abdo et al., 2024).	Sangat sensitif terhadap cuaca ekstrem dan pencahayaan buruk (Bergera et al., 2021)

Sumber: Hasil Pengolahan Data Peneliti, 2026

Pembahasan Hasil Penelitian

Dari hasil ekstraksi data, sintesis mendalam menunjukkan bahwa metode PCI konvensional belum dapat ditinggalkan sepenuhnya karena memegang status *gold standard* untuk standarisasi penilaian kondisi perkerasan. Kemampuan ahli (manusia) dalam menghitung dimensi kerusakan berpola kompleks (seperti tonjolan, kerutan, dan ambles) masih melampaui algoritma segmentasi mesin, sebagaimana dilaporkan oleh (Wasiq & Golroo, 2024) di mana AI gagal mendeteksi perbedaan kedalaman deformasi aspal. Namun, visi komputer hadir menutupi celah efisiensi PCI pada jaringan jalan berskala makro. Model *deep learning* dan fitur mekanisme atensi mampu mereproduksi indeks kerusakan dengan sangat cepat (Sun et al., 2025). Terdapat variasi hasil yang signifikan antar studi; misalnya, (Zhang et al., 2024) melaporkan akurasi di atas 90% menggunakan arsitektur *Transformer Networks*, namun studi lain seperti (Abbas & Ismael, 2021) menemukan penurunan akurasi yang drastis pada jenis retak rambut yang saling tumpang tindih.

Kesenjangan (*gap*) penerapan visi komputer di Indonesia sangat bergantung pada konteks pengujiannya. Beberapa studi hanya menguji algoritma dalam kondisi laboratorium dengan pencahayaan ideal dan sudut pandang tetap (Ibragimov et al., 2024), sementara pengujian empiris di lapangan terbuka membuktikan bahwa algoritma visi sangat rentan terganggu oleh faktor gangguan cuaca seperti genangan air hujan atau bayangan pohon (Bergera et al., 2021; Nwelee, 2024). Selain itu, akurasi *machine learning* mutlak membutuhkan *dataset* berlabel yang merepresentasikan variasi perkerasan lokal, yang ketersediaannya secara publik masih sangat minim (Qureshi et al., 2022).

Menyikapi temuan ini, kerangka kerja terpadu atau *hybrid approach* menjadi sintesis inovasi (*novelty*) yang paling logis. Metode visi komputer berbiaya rendah (kamera *smartphone* pada dasbor kendaraan atau *drone*) dapat dialokasikan untuk pemantauan penyaringan massal jaringan jalan lintas provinsi (Al-sabaei et al., 2024; Rengifo et al., 2024). Data tersebut kemudian diintegrasikan ke dalam Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk memetakan *hotspot* (Hafel et al., 2023). Inspektur manusia dengan instrumen manual PCI baru diturunkan ke titik-titik krisis (*hotspot*) yang memerlukan keputusan rehabilitasi struktural mendalam (Abbas & Ismael, 2021). Ke depan, tren riset mengarah pada pendekatan makro menggunakan citra penginderaan jauh (seperti GF-2) untuk estimasi penuaan aspal area luas (Wang et al., 2023), fusi multi sensor untuk mengatasi kendala cuaca (Shen et al., 2025), serta pengembangan *Digital Twin* jalan raya yang dioperasikan secara otonom (J. Xu et al., 2024).

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode PCI dan visi komputer tidak bersifat substitutif mutlak, melainkan saling melengkapi (*komplementer*). PCI sangat unggul dalam komprehensi dan validitas penilaian detail untuk 20 jenis kerusakan, namun tidak efisien secara waktu dan rentan terhadap bias subjektivitas. Sebaliknya, otomasi visi komputer unggul dalam pemindaian jaringan jalan masif secara cepat dan objektif, namun masih terbelenggu oleh sensitivitas cahaya dan ketidakmampuan mengidentifikasi kedalaman deformasi aspal. Strategi paling ideal bagi otoritas pemeliharaan di Indonesia adalah menerapkan model manajemen jalan hibrid yang mengawinkan penyaringan otomatis berbasis AI dengan validasi forensik manual.

Adapun keterbatasan dari tinjauan literatur sistematis ini meliputi ruang lingkup pencarian yang hanya dibatasi pada basis data Scopus dan Google Scholar, serta tidak dilakukannya penilaian risiko bias (*risk of bias assessment*) secara kuantitatif formal pada studi-studi yang disertakan. Selain itu, sebagian besar literatur belum sepenuhnya mendokumentasikan implementasi di iklim tropis ekstrem. Berangkat dari keterbatasan tersebut, disarankan agar penelitian selanjutnya melakukan SLR yang lebih komprehensif dengan penambahan basis data teknik seperti *Web of Science*. Riset aplikatif ke depan juga mendesak untuk segera menyusun *database* citra jalan raya beriklim tropis Indonesia guna mengoptimalkan pelatihan algoritma fusi multi-sensor dan *Large Language Models* (LLM) di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, I. H., & Ismael, M. Q. (2021). Automated Pavement Distress Detection Using Image Processing Techniques. *Engineering Technology & Applied Science Research*, 11(5), 7702–7708. <https://doi.org/10.48084/etasr.4450>
- Abdo, A., Eleshebi, N., & Hasan, F. (2024). Improving Road Safety with AI: An Automated Pothole Detection based on Vision-based Approaches. *International Journal of Computer Applications*, 186(57), 44–49. <https://doi.org/10.5120/ijca2024924325>
- Al-sabaei, A. M., Souliman, M. I., & Jagadeesh, A. (2024). Smartphone applications for pavement condition monitoring: A review. *Construction and Building Materials*, 410(November 2023), 134207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134207>

- Ali, L., Alnajjar, F., Khan, W., Serhani, M. A., & Assmi, H. A. (2022). Crack Detection Literature Published between 2010 and 2022. *Buildings*, 12(4), 432. <https://doi.org/10.3390/buildings12040432>
- AS, M. P. H. (2021). Analisa Tingkat Kerusakan Perkerasan Lentur Pada Ruas Jalan Raya Lambah Maninjau Kabupaten Agam. *Ekasakti Jurnal Penelitian & Pengabdian*, 2(1), 28–41. <https://doi.org/10.31933/ejpp.v2i1.401>
- Bergera, C., Crist, P., Humanes, P., Kumar, U., Masterson, S., Merk, O., Pierce, I., Ponziani, A., Pouts, C., Rossi, L., Maria, A. S., Alfageme, S., & Ventejol, P. (2021). *Data-driven Transport Infrastructure Maintenance*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/a1cc71cc-en>
- Chen, X., Liu, C., Chen, L., Zhu, X., Zhang, Y., & Wang, C. (2024). *A Pavement Crack Detection and Evaluation Framework of UAV inspection System Based on Deep Learning*. <https://doi.org/10.20944/preprints202401.1925.v1>
- Hafel, R., Marsaoly, N., & Rauf, I. (2023). Penaksiran Kerusakan Jalan Dengan Metode Pavement Condition Index Berbasis Spasial. *Techno Com*, 22(2), 264–275. <https://doi.org/10.33633/tc.v22i2.7520>
- Ibragimov, E., Kim, Y., Lee, J. H., Cho, J., & Lee, J. (2024). Automated Pavement Condition Index Assessment with Deep Learning and Image Analysis : An End-to-End Approach. *Sensors*, 7, 2333. <https://doi.org/10.3390/s24072333>
- Ijari, K., & Paternina-Arboleda, C. D. (2024). applied sciences Sustainable Pavement Management : Harnessing Advanced Machine Learning for Enhanced Road Maintenance. *Applied Sciences*, 14(15), 6640. <https://doi.org/10.3390/app14156640>
- Jan, M., Khattak, K. S., & Altamimi, A. B. (2023). Crowdsensing for Road Pavement Condition Monitoring : Trends , Limitations , and Opportunities. *IEEE Access*, 11, 133143–133159. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3332667>
- Malekloo, A., Liu, X. C., & Sacharny, D. (2024). AI-enabled airport runway pavement distress detection using dashcam imagery. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39, 2481–2499. <https://doi.org/10.1111/mice.13200>
- Martinelli, A., Meocci, M., Dolfi, M., Branzi, V., Morosi, S., Argenti, F., Berzi, L., & Consumi, T. (2022). Road Surface Anomaly Assessment Using Low-Cost Accelerometers : A Machine Learning Approach. *Sensors*, 10, 3788. <https://doi.org/10.3390/s22103788>
- Mei, A., Zampetti, E., Mascio, P. D., Fontinovo, G., Papa, P., & D’Andrea, A. (2022). ROADS — Rover for Bituminous Pavement Distress Survey : An Distress Evaluation. *Sensors Article*, 22, 3414. <https://doi.org/10.3390/s22093414>
- Mukti, S. N. A., & Tahar, K. N. (2022). Detection of potholes on road surfaces using photogrammetry and remote sensing methods (review). *Scientific And Technical Journal Of Information Technologies, Mechanics And Optics*, 22(3), 459–471. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-3-459-471>
- Muslikah, S., & Yuliana, I. (2023). Analisis Kemantapan Jalan Kayuagung-Pedamaran Timur Dengan Metode Iri Menggunakan Aplikasi Road Bump Pro. *Cantilever Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 11(2), 93–100. <https://doi.org/10.35139/cantilever.v11i2.150>
- Nwelee, N. H. (2024). Detection Of Road Damages(Cracks) In Iraq Based On Machine

- Learning. *Al-Salam Journal for Engineering and Technology*, 3(2), 12–23. <https://doi.org/10.55145/ajest.2024.03.02.02>
- Qureshi, W. S., Hassan, S. I., Mckeever, S., Power, D., Mulry, B., Feighan, K., & Sullivan, D. O. (2022). An Exploration of Recent Intelligent Image Analysis Techniques for Visual Pavement Surface Condition Assessment. *Sensors*, 22, 9019. <https://doi.org/10.3390/s22229019>
- Rengifo, D. M. O., Salinas, J. C., Caicedo, J. A. P., & Manzano, M. A. R. (2024). Unmanned Aircraft Systems in Road Assessment: A Novel Approach to the Pavement Condition Index and VIZIR Methodologies. *Drones*, 8(3), 99. <https://doi.org/10.3390/drones8030099>
- Setyanto, A., Wulansari, Fifi Wisma, Chasanah, U., & Soehartono, S. (2024). Studi Kelayakan Jalan Ditinjau Dari Kerusakan Perkerasan Lentur Jalan Palur-Sragen-Mantingan Di Sragen Km. 17+800 S/D Km. 25+925. *Jurnal Teknik Sipil Unpad*, 1(2), 77–91. <https://doi.org/10.69796/gzelxe23>
- Shen, Y., Jing, K., Sun, K., Liu, C., Yang, Y., & Liu, Y. (2025). Review of Uneven Road Surface Information Perception Methods for Suspension Preview Control. *Sensors*, 18, 5884. <https://doi.org/10.3390/s25185884>
- Sun, Y., Zhou, C., Zhou, S., & Lan, T. (2025). Pavement crack detection algorithm using fused attention mechanism and densely connected feature. *Measurement Science and ...*, 36(4), 046014. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/adbfb1>
- Wang, H., Yang, D., Xie, Z., Wang, J., Hao, Z., Zhou, F., & Wang, X. (2023). *Assessment of asphalt pavement aging condition based on GF-2 high-resolution remote sensing image*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2632783/v1>
- Wasiq, S., & Golroo, A. (2024). Smartphone-Based Cost-Effective Pavement Performance Model Development Using a Machine Learning Technique with. *Infrastructures*, 9(1), 9. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9010009>
- Xu, J., Anvo, N. Z. R., Taha-abdalgadir, H., Avigneau, A. M., Palin, D., Wei, R., Hadjidemetriou, G. M., Schaefer, S., Silva, L. de, Al-Tabbaa, A., Iida, F., & Brilakis, I. (2024). Highway digital twin-enabled Autonomous Maintenance Plant: a perspective. *Data-Centric Engineering*, 5(e24), 1–16. <https://doi.org/10.1017/dce.2024.34>
- Xu, S., Zhao, K., Loney, J., Li, Z., & Visentin, A. (2025). Image-based large language model approach to road pavement monitoring. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 40(26), 4448–4464. <https://doi.org/10.1111/mice.70075>
- Zhang, Z., Song, W., Zhuang, Y., Zhang, B., & Wu, J. (2024). applied sciences Automated Multi-Type Pavement Distress Segmentation and Quantification Using Transformer Networks for Pavement Condition Index Prediction. *Applied Sciences*, 14, 4709. <https://doi.org/10.3390/app14114709>

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Gorontalo atas dukungan penuh terhadap pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga ditujukan kepada tim editor dan *reviewer* yang telah memberikan kritik serta saran konstruktif guna penyempurnaan artikel ini hingga layak diterbitkan.