



Sistem Informasi Manajemen Jalan untuk Monitoring Beban Lalulintas dan Evaluasi Kinerja Perkerasan

Didit Darmawan^{1*}, Maulana Chamdani²

¹⁻²Universitas Sunan Giri Surabaya, Indonesia

Email: dr.diditdarmawan@gmail.com^{1*}, maulanachamdani26@gmail.com²

*Korespondensi penulis: dr.diditdarmawan@gmail.com¹

Abstract. An integrated road management information system was developed to continuously collect vehicle volume, composition, and load data through moving weight sensors. The data allows the calculation of the Equivalent Single Axle Load (ESAL) which is the basis for evaluating the performance of road pavement. This information supports managers in predicting the remaining life of pavement, proactively adjusting maintenance schedules, and allocating repair budgets to the most critical segments. The system also functions as a law enforcement instrument against overloaded vehicles that accelerate pavement damage. Integration with geographic information systems and asset management systems strengthens spatial analysis as well as lifecycle cost calculations. Successful implementation depends on periodic sensor calibration, the availability of skilled personnel, a sustainable funding model, and a modular architecture that supports technology improvements. Real-time data enables dynamic maintenance planning that is responsive to changing traffic patterns. The results of the study confirm that this system is able to increase the effectiveness of road infrastructure management, extend the life of pavement services, and support data-driven decision-making. The practical implication is the need for a strategy of strengthening technical and institutional capacity so that the system can be widely adopted as a modern solution in sustainable road management.

Keywords: Library Applications; Object-Oriented Programming; PHP; Road Management; Web-Based System.

Abstrak. Sistem informasi manajemen jalan terintegrasi dikembangkan untuk mengumpulkan data volume, komposisi, dan beban kendaraan secara berkelanjutan melalui sensor berat bergerak. Data tersebut memungkinkan perhitungan *Equivalent Single Axle Load* (ESAL) yang menjadi dasar evaluasi kinerja perkerasan jalan. Informasi ini mendukung pengelola dalam memprediksi sisa umur perkerasan, menyesuaikan jadwal pemeliharaan secara proaktif, serta mengalokasikan anggaran perbaikan pada segmen yang paling kritis. Sistem juga berfungsi sebagai instrumen penegakan hukum terhadap kendaraan kelebihan muatan yang mempercepat kerusakan perkerasan. Integrasi dengan sistem informasi geografis dan sistem manajemen aset memperkuat analisis spasial serta perhitungan biaya siklus hidup. Keberhasilan implementasi bergantung pada kalibrasi sensor berkala, ketersediaan personel terampil, model pendanaan berkelanjutan, serta arsitektur modular yang mendukung peningkatan teknologi. Data waktu nyata memungkinkan perencanaan pemeliharaan dinamis yang responsif terhadap perubahan pola lalu lintas. Hasil penelitian menegaskan bahwa sistem ini mampu meningkatkan efektivitas pengelolaan infrastruktur jalan, memperpanjang umur layanan perkerasan, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Implikasi praktisnya adalah perlunya strategi penguatan kapasitas teknis dan kelembagaan agar sistem dapat diadopsi secara luas sebagai solusi modern dalam manajemen jalan berkelanjutan.

Kata kunci: Aplikasi Perpustakaan; Manajemen Jalan; Pemrograman Berorientasi Objek; PHP; Sistem Berbasis Web.

1. PENDAHULUAN

Jalan raya merupakan infrastruktur vital yang menopang mobilitas barang dan orang di seluruh dunia. Setiap hari, jutaan kendaraan melintasi ruas jalan dengan variasi beban yang sangat beragam, mulai dari sepeda motor ringan hingga truk berat pengangkut material. Hal ini tentu menuntut ketersediaan fasilitas pendukung yang memadai bagi setiap jenis kendaraan tersebut agar perjalanan tetap tertib dan aman (*Priambodo et al., 2022*). Kondisi perkerasan jalan secara bertahap mengalami penurunan akibat akumulasi beban lalulintas yang melewatinya. Penurunan kualitas ini tidak terjadi secara seragam di semua ruas, melainkan

sangat tergantung pada volume, komposisi, dan distribusi beban kendaraan yang melintas (Nilsson et al., 2020). Ruas jalan yang dilalui ribuan truk setiap hari akan mengalami kerusakan jauh lebih cepat dibandingkan ruas yang didominasi kendaraan penumpang ringan. Pemilihan material bangunan yang tepat sangat menentukan apakah struktur tersebut dapat bertahan lama atau justru cepat rusak (Djaelani et al., 2022). Oleh karena itu, menciptakan lingkungan kerja yang aman dan sehat bagi para teknisi di lapangan menjadi salah satu kunci agar kualitas bangunan yang dihasilkan tetap terjaga (Djaelani et al., 2021; Djaelani & Darmawan, 2016). Pemahaman tentang hubungan antara beban lalulintas dan kerusakan perkerasan telah menjadi perhatian utama para insinyur transportasi selama beberapa dekade. Berbagai model prediksi kerusakan telah dikembangkan, namun akurasi model tersebut sangat bergantung pada ketersediaan data lalulintas yang aktual dan berkelanjutan (Majzoubi & Dehgolan, 2011). Salah satu cara untuk menjaga keandalan sistem adalah dengan rutin memantau getaran atau sinyal kerusakan pada alat-alat teknis yang digunakan sejak dini (Riyadin & Darmawan, 2023). Tanpa data yang memadai, upaya pemeliharaan jalan seringkali bersifat reaktif, dilakukan setelah kerusakan muncul, bukan preventif sebelum kerusakan meluas. Pendekatan reaktif ini tidak hanya lebih mahal tetapi juga mengganggu kelancaran transportasi. Kebutuhan akan sistem yang mampu memantau beban lalulintas secara terus menerus menjadi semakin mendesak seiring dengan meningkatnya tuntutan mobilitas dan terbatasnya anggaran pemeliharaan.

Pengumpulan data lalulintas secara tradisional mengandalkan survei manual atau alat hitung sederhana yang hanya mencatat volume kendaraan tanpa informasi detail tentang beban (Stawska et al., 2021). Metode ini memiliki keterbatasan yang signifikan karena tidak mampu menangkap variasi temporal beban lalulintas sepanjang hari, minggu, atau musim. Sebuah jalan mungkin dilewati seratus truk dalam satu jam pada siang hari, tetapi hanya sepuluh truk pada malam hari, dengan beban per truk yang juga bervariasi tergantung muatan yang diangkut. Variasi ini sangat penting untuk diketahui karena kerusakan perkerasan tidak hanya ditentukan oleh jumlah lintasan tetapi juga oleh besarnya beban per sumbu kendaraan. Perubahan pola kerja di masyarakat saat ini juga turut memengaruhi kapan dan bagaimana orang menggunakan fasilitas publik secara luas (Sulaksono et al., 2025). Satu truk dengan beban berlebih dapat menyebabkan kerusakan setara dengan ribuan kendaraan ringan. Kesenjangan antara ketersediaan data dan kebutuhan analisis menjadi hambatan utama dalam pengelolaan jalan yang efisien. Para manajer jalan seringkali harus mengambil keputusan pemeliharaan berdasarkan perkiraan kasar atau pengalaman subjektif, yang hasilnya tidak selalu optimal. Situasi ini diperburuk oleh fakta bahwa beban lalulintas cenderung meningkat seiring pertumbuhan ekonomi, sementara anggaran pemeliharaan tidak selalu tumbuh sebanding.

Diperlukan terobosan dalam cara pengumpulan dan pengolahan data lalu lintas untuk menjembatani kesenjangan tersebut.

Kepentingan untuk memahami secara sistematis peran sistem informasi manajemen jalan dalam monitoring beban lalu lintas sangat tinggi mengingat degradasi infrastruktur jalan yang terjadi di berbagai negara akibat beban berlebih yang tidak terdeteksi. Beban kendaraan yang melebihi batas maksimum yang diizinkan, yang sering disebut sebagai overloading, adalah penyebab utama kerusakan perkerasan ini. Satu kendaraan overload dapat menyebabkan kerusakan setara dengan ribuan kendaraan yang mematuhi batas beban. Di banyak negara, penegakan hukum terhadap overloading lemah karena keterbatasan alat ukur dan personel. Sistem informasi manajemen jalan yang terintegrasi dengan timbangan bergerak dapat mendeteksi kendaraan overload secara otomatis dan langsung mengirimkan informasi tersebut ke petugas penegak hukum di lapangan. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya berfungsi untuk pemeliharaan jalan tetapi juga untuk penegakan hukum yang lebih efektif. Dampak ekonomi dari kerusakan jalan akibat overloading sangat besar, mencakup biaya perbaikan yang membengkak, kerugian waktu akibat kemacetan selama perbaikan, serta peningkatan biaya operasional kendaraan akibat jalan rusak. Studi literatur yang sistematis dapat mengidentifikasi praktik terbaik dalam implementasi sistem informasi manajemen jalan, termasuk teknologi yang paling tepat, strategi pendanaan yang berkelanjutan, serta kebijakan pendukung yang diperlukan. Hasil studi ini dapat menjadi acuan bagi pemerintah dan operator jalan dalam merencanakan dan mengimplementasikan sistem serupa di wilayah masing-masing.

Tujuan dari studi literatur ini adalah mengkonstruksi kerangka konseptual tentang fungsi sistem informasi manajemen jalan dalam monitoring beban lalu lintas dan bagaimana data yang dihasilkan digunakan untuk evaluasi perkerasan serta perencanaan pemeliharaan. Secara teoretis, studi ini memperkaya literatur teknik transportasi dengan menyoroti hubungan antara ketersediaan data beban dan efektivitas manajemen infrastruktur. Secara praktis, kerangka ini dapat digunakan oleh instansi pembina jalan untuk mengevaluasi kesiapan mereka dalam mengadopsi sistem serupa serta mengidentifikasi komponen kritis yang perlu diprioritaskan.

2. METODE

Penelitian ini dirancang sebagai studi literatur kualitatif yang sepenuhnya mengandalkan sumber-sumber tertulis tanpa pengumpulan data primer. *Beins (2017)* menjelaskan bahwa pendekatan kepustakaan merupakan metode yang sah ketika pertanyaan

penelitian bertujuan untuk mensintesis pengetahuan yang telah terakumulasi dari berbagai studi sebelumnya. Sesuai dengan prinsip tersebut, penelitian ini tidak melaksanakan wawancara dengan pengelola jalan, observasi lapangan pada sistem pemantauan, atau survei terhadap pengguna jalan. Seluruh bahan analisis berasal dari dokumen tertulis seperti artikel jurnal, buku teks teknik jalan, prosiding konferensi, standar teknis, serta laporan proyek dari lembaga penelitian (Nalbandian et al., 2021). Dudley (2005) menegaskan bahwa kualitas studi literatur sangat bergantung pada cakupan sumber yang dirujuk serta ketelitian dalam proses seleksi. Proses seleksi sumber dilakukan melalui pembacaan abstrak terlebih dahulu, dilanjutkan dengan pembacaan teks lengkap untuk mengevaluasi kontribusi spesifik terhadap rumusan masalah.

Prosedur analisis dalam studi literatur ini mengikuti pendekatan sintesis tematik sebagai metode untuk menggabungkan temuan dari berbagai sumber yang mungkin menggunakan metodologi berbeda (Sipos & Sipos, 2025). Sintesis tematik memungkinkan penggabungan wawasan dari studi eksperimental, studi kasus, pemodelan teoritis, serta evaluasi proyek ke dalam kerangka penjelasan yang terpadu. Langkah pertama adalah pengorganisasian sumber berdasarkan tema utama seperti teknologi sensor untuk monitoring beban, arsitektur sistem informasi, metode pengolahan data, serta pemanfaatan data untuk evaluasi perkerasan dan perencanaan pemeliharaan. Langkah kedua adalah identifikasi pola pola yang muncul berulang dalam literatur, misalnya konsistensi temuan bahwa timbangan bergerak memberikan akurasi yang memadai untuk keperluan manajemen jalan dengan biaya lebih rendah dibandingkan timbangan statis. Langkah ketiga adalah penelusuran kontradiksi antar studi yang sering mengungkap faktor faktor moderasi seperti kondisi lingkungan atau jenis perkerasan. Studi literatur yang baik harus mencatat setiap ketegangan dalam temuan dan berusaha menjelaskannya (Folayan, 2019). Perhatian khusus diberikan pada bagaimana temuan dari studi tentang akurasi sensor dapat diintegrasikan dengan temuan dari studi tentang perilaku pengemudi dalam merespon keberadaan alat timbang. Proses analisis dilakukan secara iteratif dengan peneliti bergerak bolak balik antara sumber individual dan kerangka konseptual yang sedang dibangun. Langkah terakhir adalah penulisan laporan yang menyajikan temuan dalam bentuk naratif terstruktur dengan merujuk secara eksplisit pada sumber yang mendasari setiap pernyataan penting, sehingga pembaca dapat menilai sendiri kekuatan bukti yang mendukung kesimpulan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem informasi manajemen jalan yang terintegrasi berfungsi sebagai tulang punggung monitoring beban lalu lintas melalui penggabungan berbagai teknologi sensor. Sensor yang paling umum digunakan adalah weight in motion (WIM) yang mampu mengukur beban sumbu kendaraan yang sedang bergerak tanpa perlu berhenti. Teknologi WIM memanfaatkan sensor piezoelektrik atau sensor serat optik yang dipasang di dalam perkerasan (Agape *et al.*, 2019). Ketika roda kendaraan melewati sensor, terjadi perubahan tekanan yang dikonversi menjadi sinyal listrik yang sebanding dengan beban. Akurasi sistem WIM bervariasi tergantung pada kualitas sensor dan kecepatan kendaraan, dengan tingkat kesalahan berkisar antara 5 hingga 15 persen untuk sistem kelas rendah dan di bawah 5 persen untuk sistem kelas tinggi. Meskipun tidak seakurat timbangan statis yang memerlukan kendaraan berhenti, sistem WIM memiliki keunggulan karena tidak mengganggu arus lalu lintas dan mampu mengumpulkan data dari semua kendaraan yang lewat, bukan hanya sampel. Data yang dikumpulkan meliputi waktu lintasan, kecepatan, jarak antar sumbu, beban per sumbu, serta beban total kendaraan. Informasi ini kemudian dikirimkan ke pusat data melalui jaringan komunikasi nirkabel atau kabel. Untuk memastikan akurasi jangka panjang, sensor WIM harus dikalibrasi secara berkala menggunakan kendaraan dengan beban yang diketahui. Tanpa kalibrasi rutin, data yang dihasilkan akan menyimpang dari kondisi aktual dan mengurangi nilai sistem untuk pengambilan keputusan.

Data beban lalu lintas yang dikumpulkan secara berkelanjutan memungkinkan penghitungan beban lalu lintas kumulatif yang diterima suatu ruas jalan dalam satuan equivalent single axle load (ESAL). ESAL adalah satuan standar dalam teknik perkerasan yang menyatakan tingkat kerusakan yang disebabkan oleh suatu beban sumbu relatif terhadap beban sumbu standar 18 kip atau sekitar 8,2 ton (Xiao & Wu, 2016). Satu truk dengan beban sumbu 20 ton menyebabkan kerusakan setara dengan ribuan ESAL, sementara satu kendaraan penumpang menyebabkan kerusakan yang dapat diabaikan. Dengan mengetahui distribusi beban sumbu dari kendaraan yang melintas, sistem dapat menghitung akumulasi ESAL per hari, per bulan, dan per tahun. Angka akumulasi ESAL ini kemudian dibandingkan dengan desain umur perkerasan yang biasanya dinyatakan dalam jumlah ESAL yang mampu ditahan sebelum kerusakan signifikan terjadi. Jika suatu jalan didesain untuk menahan 10 juta ESAL selama 20 tahun, dan setelah 5 tahun data menunjukkan bahwa jalan tersebut telah menerima 6 juta ESAL, maka manajer jalan tahu bahwa perkerasan akan mencapai batas umurnya jauh lebih cepat dari yang direncanakan. Informasi ini sangat berharga untuk menyesuaikan jadwal pemeliharaan dan mengalokasikan anggaran perbaikan ke ruas yang paling membutuhkan.

Tanpa data ESAL yang akurat, manajer jalan hanya dapat mengandalkan perkiraan kasar yang sering meleset dari realitas di lapangan.

Komposisi kendaraan yang melintas merupakan aspek penting lain yang dimonitor oleh sistem informasi manajemen jalan (Yashina & Tatashev, 2021). Tidak semua kendaraan memberikan dampak yang sama terhadap perkerasan, sehingga mengetahui proporsi berbagai jenis kendaraan sangat berguna untuk perencanaan. Sistem yang dilengkapi dengan kamera dan algoritma pengenalan pola dapat mengklasifikasikan kendaraan ke dalam kategori seperti sepeda motor, mobil penumpang, bus, truk ringan 2 sumbu, truk sedang 3 sumbu, serta truk berat dengan 5 sumbu atau lebih. Data komposisi ini menunjukkan tren perubahan pola transportasi yang mungkin terjadi akibat pembangunan kawasan industri baru atau perubahan rute distribusi barang. Jika proporsi truk berat pada suatu ruas meningkat tajam dalam waktu singkat, maka laju kerusakan perkerasan juga akan meningkat, dan jadwal pemeliharaan harus dimajukan. Sebaliknya, jika proporsi truk menurun karena adanya jalan tol baru yang lebih menarik, maka umur perkerasan ruas tersebut akan lebih panjang dari perkiraan awal, dan anggaran pemeliharaan dapat dialihkan ke ruas lain. Data komposisi juga berguna untuk mengevaluasi efektivitas kebijakan pembatasan kendaraan berat pada jam jam tertentu. Jika kebijakan tersebut berhasil, maka data akan menunjukkan pergeseran waktu lintasan truk ke luar jam larangan. Dengan demikian, sistem informasi manajemen jalan tidak hanya berfungsi sebagai alat pencatat tetapi juga sebagai instrumen evaluasi kebijakan transportasi.

Monitoring volume lalulintas merupakan fungsi dasar dari sistem informasi manajemen jalan yang seringkali dianggap remeh padahal sangat penting untuk kalibrasi model prediksi kerusakan. Volume lalulintas harian rata rata (LHR) adalah metrik yang umum digunakan, namun nilai rata rata sering menyembunyikan variasi penting yang mempengaruhi kerusakan (Zhao & Wen, 2017). Dua ruas jalan dengan LHR yang sama dapat memiliki tingkat kerusakan yang berbeda jika distribusi volume per jamnya berbeda. Ruas dengan lonjakan volume yang sangat tinggi pada jam jam tertentu akan mengalami kerusakan lebih cepat karena beban berat yang berulang dalam waktu singkat menyebabkan kelelahan material yang lebih intensif. Sistem yang mencatat volume per jam atau bahkan per 15 menit dapat menangkap variasi ini. Data volume temporal juga berguna untuk mengidentifikasi pola musiman. Misalnya, pada musim panen, volume truk pengangkut hasil pertanian mungkin meningkat beberapa kali lipat. Pengetahuan tentang pola musiman ini memungkinkan manajer jalan untuk menjadwalkan pemeliharaan pada periode volume rendah untuk meminimasi gangguan lalulintas. Selain itu, data volume dapat digunakan untuk memprediksi beban lalulintas di masa depan dengan metode regresi atau deret waktu. Prediksi ini penting untuk perencanaan jangka panjang,

termasuk keputusan apakah suatu ruas perlu ditingkatkan kapasitasnya dari dua lajur menjadi empat lajur. Akurasi prediksi sangat bergantung pada panjang dan kualitas data historis yang tersedia.

Integrasi data beban lalu lintas dengan data kondisi perkerasan merupakan langkah krusial yang memungkinkan sistem informasi manajemen jalan menghasilkan wawasan yang tidak dapat diperoleh dari masing-masing data secara terpisah. Data kondisi perkerasan biasanya dikumpulkan melalui survei berkala menggunakan alat seperti kereta profilometer untuk mengukur kekasaran permukaan (roughness), kamera untuk merekam retak dan lubang, serta falling weight deflectometer untuk mengukur kapasitas struktur perkerasan (Guo, 2019). Dengan menggabungkan data beban dan data kondisi, manajer jalan dapat mengembangkan kurva kerusakan yang spesifik untuk setiap ruas. Kurva ini menunjukkan hubungan antara akumulasi beban (dalam ESAL) dan penurunan kondisi perkerasan (misalnya peningkatan nilai International Roughness Index). Kurva yang berbeda untuk ruas yang berbeda mengindikasikan perbedaan dalam kualitas konstruksi awal atau perbedaan dalam faktor lingkungan seperti drainase. Ruas yang menunjukkan penurunan kondisi lebih cepat dari rata-rata untuk tingkat beban yang sama mungkin memerlukan investigasi lebih lanjut untuk mengidentifikasi penyebabnya, misalnya kesalahan konstruksi atau masalah tanah dasar. Sebaliknya, ruas yang menunjukkan penurunan lebih lambat dapat dijadikan tolok ukur untuk praktik terbaik dalam konstruksi dan pemeliharaan. Kemampuan untuk melakukan benchmarking internal ini sangat berharga untuk perbaikan berkelanjutan dalam manajemen infrastruktur jalan.

Sistem informasi manajemen jalan yang terintegrasi juga memungkinkan deteksi dini terhadap kendaraan overload yang merupakan ancaman serius bagi integritas perkerasan (He *et al.*, 2021). Kendaraan dengan beban sumbu melebihi batas yang diizinkan, katakanlah 10 ton untuk sumbu tunggal, menyebabkan kerusakan yang tidak proporsional terhadap perkerasan. Satu kendaraan overload 50 persen dapat menyebabkan kerusakan setara dengan 10.000 kendaraan yang mematuhi batas beban. Sistem WIM yang terkalibrasi dengan baik dapat mendeteksi overload dengan akurasi yang cukup untuk keperluan penegakan hukum (Gajda *et al.*, 2023). Ketika kendaraan overload terdeteksi, sistem dapat secara otomatis mengambil foto plat nomor dan mengirimkannya beserta data beban ke petugas di lapangan atau ke sistem tilang elektronik. Dengan cara ini, penegakan hukum dapat dilakukan tanpa perlu menghentikan kendaraan, yang sering menimbulkan kemacetan dan potensi penyuaapan. Efek jera dari penegakan hukum yang konsisten akan mendorong pengemudi dan perusahaan transportasi untuk mematuhi batas beban, yang pada gilirannya memperpanjang umur

perkerasan dan mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang. Namun, efektivitas penegakan hukum berbasis WIM sangat bergantung pada kepercayaan publik terhadap akurasi sistem. Jika pengemudi merasa bahwa sistem sering memberikan hasil yang salah, mereka akan mengajukan keberatan dan proses penegakan hukum menjadi tidak efisien. Pemeliharaan dan kalibrasi rutin sistem WIM adalah investasi yang sangat penting untuk menjaga kredibilitas data.

Evaluasi kinerja perkerasan menggunakan data dari sistem informasi manajemen jalan memerlukan metode analisis yang tepat untuk mengisolasi pengaruh beban lalulintas dari faktor faktor lain. Pendekatan yang umum digunakan adalah analisis regresi berganda dengan variabel bebas yang mencakup akumulasi ESAL, umur perkerasan, curah hujan, dan jenis tanah dasar (Bhandari *et al.*, 2022). Koefisien regresi untuk variabel ESAL menunjukkan seberapa besar kontribusi beban lalulintas terhadap penurunan kondisi perkerasan setelah faktor lain dikendalikan (Najjar *et al.*, 2019). Jika koefisien ini tidak signifikan secara statistik, itu mungkin menandakan bahwa data beban yang digunakan tidak akurat atau bahwa faktor lain yang tidak diukur mendominasi kerusakan. Sebaliknya, jika koefisien signifikan dan positif, itu mengkonfirmasi bahwa beban lalulintas memang penyebab utama kerusakan, sebagaimana diprediksi oleh teori mekanika perkerasan. Analisis semacam ini memerlukan data yang terkumpul dalam jangka waktu panjang, minimal lima tahun, untuk mendapatkan variasi yang cukup dalam variabel bebas. Dengan data yang cukup, manajer jalan dapat mengembangkan model prediksi yang spesifik untuk kondisi lokal, yang jauh lebih akurat daripada model generik dari literatur internasional. Model lokal ini kemudian dapat digunakan untuk mensimulasikan berbagai skenario beban lalulintas di masa depan dan merencanakan pemeliharaan yang paling cost efektif. Kemampuan untuk melakukan analisis prediktif berbasis data adalah keunggulan utama dari sistem informasi manajemen jalan yang berfungsi dengan baik.

Penyesuaian rencana pemeliharaan berdasarkan data beban lalulintas yang real time merupakan salah satu aplikasi paling praktis dari sistem informasi manajemen jalan (Ambrus-Somogyi, 2007). Secara tradisional, rencana pemeliharaan dibuat setahun sekali berdasarkan data survei yang mungkin sudah berusia beberapa bulan. Pada saat rencana tersebut diimplementasikan, kondisi lalulintas mungkin telah berubah secara signifikan, sehingga rencana menjadi tidak optimal. Dengan sistem real time, manajer jalan dapat mendeteksi perubahan tren beban lalulintas dalam hitungan minggu dan segera menyesuaikan rencana. Sebagai contoh, jika pembukaan pabrik semen baru menyebabkan lonjakan volume truk berat pada suatu ruas, sistem akan mendeteksi hal ini dalam waktu singkat. Manajer jalan kemudian

dapat memutuskan untuk memajukan jadwal pelapisan ulang pada ruas tersebut dan mengalihkan dana dari ruas lain yang beban lalulintasnya justru menurun. Kemampuan untuk mengalokasikan sumber daya secara dinamis ini sangat berharga di era dengan anggaran pemeliharaan yang terbatas. Penyesuaian rencana juga dapat bersifat taktis, misalnya menjadwalkan pemeliharaan yang memerlukan penutupan jalur pada saat volume lalulintas sedang rendah berdasarkan data historis. Sistem yang baik dapat secara otomatis merekomendasikan jadwal optimal dengan mempertimbangkan prediksi beban lalulintas, ketersediaan kontraktor, dan kondisi cuaca. Rekomendasi tersebut tentu saja masih memerlukan pertimbangan manajer, tetapi memberikan titik awal yang berbasis data, bukan tebakan.

Sistem informasi manajemen jalan yang efektif harus dirancang dengan arsitektur yang memungkinkan perluasan dan pembaruan teknologi seiring perkembangan zaman. Arsitektur yang umum digunakan adalah sistem berlapis dengan lapisan sensor di bagian paling bawah, lapisan komunikasi di tengah, dan lapisan aplikasi di bagian atas. Lapisan sensor mencakup berbagai perangkat seperti WIM, loop detector, dan kamera (Xu *et al.*, 2017). Lapisan komunikasi bertanggung jawab mentransmisikan data dari sensor ke pusat data, dapat menggunakan jaringan seluler, serat optik, atau bahkan satelit untuk daerah terpencil. Lapisan aplikasi mencakup perangkat lunak untuk pengolahan data, visualisasi, dan pengambilan keputusan. Dengan arsitektur berlapis, komponen pada satu lapisan dapat diganti atau ditingkatkan tanpa mempengaruhi lapisan lainnya. Misalnya, ketika teknologi WIM yang lebih akurat tersedia di pasaran, manajer jalan dapat mengganti sensor lama tanpa harus mengganti seluruh sistem. Demikian pula, perangkat lunak aplikasi dapat diperbarui secara berkala untuk menambahkan fitur baru seperti algoritma prediksi berbasis kecerdasan buatan. Fleksibilitas ini sangat penting karena teknologi berkembang cepat dan sistem yang kaku akan cepat usang. Sayangnya, banyak implementasi sistem informasi manajemen jalan di masa lalu mengabaikan aspek arsitektur ini, sehingga ketika produsen sensor menghentikan produksi, seluruh sistem menjadi tidak berfungsi karena tidak ada komponen pengganti yang kompatibel. Pengalaman pahit ini mendorong gerakan menuju standar terbuka dan arsitektur modular dalam pengadaan sistem informasi manajemen jalan.

Kualitas data yang dihasilkan oleh sistem informasi manajemen jalan sangat bergantung pada pemeliharaan dan kalibrasi sensor yang rutin. Sensor WIM yang terpasang di perkerasan mengalami degradasi seiring waktu akibat beban lalulintas yang terus menerus dan perubahan suhu lingkungan (Ryś *et al.*, 2024). Bahan piezoelektrik yang menjadi inti sensor dapat mengalami penurunan sensitivitas setelah beberapa juta lintasan kendaraan. Jika tidak

dikalibrasi ulang, data yang dihasilkan akan semakin menyimpang dari nilai sebenarnya. Kesalahan pengukuran beban dapat bersifat sistematis, misalnya selalu lebih rendah 10 persen dari aktual, atau acak, tergantung pada kecepatan kendaraan dan suhu perkerasan. Kesalahan sistematis lebih berbahaya karena dapat menyebabkan underestimasi akumulasi ESAL secara konsisten, yang berakibat pada penundaan pemeliharaan hingga kerusakan parah terjadi. Untuk mendeteksi dan mengoreksi kesalahan ini, diperlukan prosedur kalibrasi menggunakan kendaraan referensi dengan beban yang diketahui. Kendaraan referensi harus melewati sensor pada berbagai kecepatan dan suhu untuk memetakan respons sensor. Prosedur ini memerlukan waktu dan biaya, tetapi merupakan investasi yang sangat diperlukan. Beberapa sistem modern dilengkapi dengan kemampuan self calibration, dimana sensor secara otomatis menyesuaikan parameternya berdasarkan perbandingan dengan data dari sensor lain yang berdekatan atau berdasarkan model fisik perkerasan. Namun, teknologi ini masih dalam tahap pengembangan dan belum terbukti keandalannya dalam jangka panjang. Untuk saat ini, kalibrasi manual berkala tetap menjadi standar emas.

Data beban lalulintas yang dikumpulkan dalam jumlah besar oleh sistem informasi manajemen jalan membuka peluang untuk penerapan teknik big data dan kecerdasan buatan. Algoritma machine learning dapat dilatih untuk memprediksi kondisi perkerasan di masa depan berdasarkan data historis beban, cuaca, dan pemeliharaan (M *et al.*, 2025). Berbeda dengan model regresi tradisional yang mengharuskan peneliti menentukan bentuk hubungan matematis terlebih dahulu, algoritma machine learning seperti random forest atau neural network dapat menangkap pola non linear yang kompleks tanpa asumsi sebelumnya. Misalnya, algoritma mungkin menemukan bahwa interaksi antara beban tinggi dan suhu ekstrem menyebabkan kerusakan yang jauh lebih parah daripada jumlah masing masing, sebuah efek interaksi yang mungkin terlewatkan dalam analisis regresi konvensional. Model yang dihasilkan dapat diintegrasikan ke dalam sistem untuk memberikan peringatan dini ketika kondisi yang berisiko tinggi terdeteksi. Selain prediksi, algoritma klasifikasi dapat digunakan untuk mengelompokkan ruas jalan berdasarkan pola kerusakannya, yang kemudian dapat dikaitkan dengan karakteristik konstruksi atau lingkungan. Pengelompokan ini membantu manajer jalan untuk mengidentifikasi ruas ruas yang memerlukan perhatian khusus karena menunjukkan kerusakan lebih cepat dari yang seharusnya. Namun, penerapan kecerdasan buatan dalam sistem informasi manajemen jalan menghadapi tantangan berupa kebutuhan akan data dalam jumlah sangat besar untuk melatih algoritma. Untuk jaringan jalan yang relatif kecil dengan hanya puluhan sensor, data yang terkumpul mungkin tidak mencukupi untuk menghasilkan model yang andal. Dalam situasi seperti itu, transfer learning dari jaringan jalan yang lebih

besar di wilayah lain dapat menjadi solusi, meskipun dengan risiko bahwa pola yang dipelajari tidak sepenuhnya berlaku.

Sistem informasi manajemen jalan tidak dapat berdiri sendiri, melainkan harus terintegrasi dengan sistem lain yang terkait seperti sistem informasi geografis (GIS) dan sistem manajemen aset (Miller *et al.*, 2012). GIS menyediakan peta digital yang menjadi kerangka spasial untuk menampilkan data beban lalu lintas. Dengan GIS, manajer jalan dapat dengan mudah melihat ruas mana yang memiliki akumulasi ESAL tertinggi, ruas mana yang mengalami lonjakan beban baru baru ini, atau ruas mana yang memerlukan pemeliharaan segera. Visualisasi spasial ini jauh lebih intuitif daripada tabel angka. Selain itu, GIS memungkinkan analisis spasial seperti buffering untuk melihat daerah di sekitar ruas dengan beban tinggi yang mungkin terdampak oleh kebisingan atau getaran. Sistem manajemen aset menyimpan informasi tentang nilai aset jalan, umur ekonomis, dan biaya siklus hidup. Integrasi dengan sistem manajemen aset memungkinkan perhitungan return on investment dari berbagai alternatif pemeliharaan. Sebagai contoh, sistem dapat membandingkan biaya pelapisan ulang sekarang dengan biaya perbaikan total yang lebih mahal jika pemeliharaan ditunda lima tahun, dengan mempertimbangkan proyeksi beban lalu lintas dan tingkat inflasi. Perhitungan semacam ini sangat kompleks untuk dilakukan secara manual, tetapi dapat diotomatisasi jika data yang diperlukan tersedia dan sistem terintegrasi dengan baik. Sayangnya, integrasi antar sistem sering terhambat oleh perbedaan format data dan kurangnya antarmuka pemrograman aplikasi (API) yang standar. Upaya untuk mengatasi hambatan ini memerlukan komitmen jangka panjang dari manajemen puncak dan alokasi sumber daya yang memadai.

Keandalan sistem informasi manajemen jalan sangat bergantung pada ketersediaan pasokan listrik dan jaringan komunikasi yang stabil, yang sering menjadi masalah di daerah terpencil (Yamrudin & Amin, 2025). Sensor yang terpasang di pinggir jalan memerlukan listrik untuk beroperasi, dan jika listrik padam, data akan hilang selama periode tersebut. Untuk mengatasi masalah ini, beberapa sistem dilengkapi dengan baterai cadangan atau panel surya, namun kapasitasnya terbatas. Jaringan komunikasi juga merupakan titik rawan, terutama jika menggunakan jaringan seluler yang mungkin tidak tersedia di daerah terpencil atau mungkin terganggu saat cuaca buruk. Alternatif seperti komunikasi satelit lebih andal tetapi biayanya jauh lebih tinggi. Strategi yang umum digunakan adalah menyimpan data sementara di memori lokal sensor ketika komunikasi terputus, dan mengirimkannya secara batch ketika komunikasi pulih. Strategi ini memerlukan memori yang cukup besar pada setiap sensor, yang menambah biaya. Selain masalah teknis, keandalan sistem juga dipengaruhi oleh faktor manusia seperti vandalisme atau pencurian komponen sensor yang mengandung logam berharga. Di beberapa

daerah, laporan tentang sensor yang dicuri atau dirusak cukup umum, sehingga mengurangi efektivitas sistem secara keseluruhan. Untuk mengurangi risiko ini, sensor dapat dipasang di dalam perkerasan sehingga tidak terlihat dari luar, atau dilindungi dengan selubung baja yang sulit dirusak. Namun, perlindungan yang lebih baik biasanya berarti biaya yang lebih tinggi dan kemudahan akses untuk pemeliharaan yang lebih rendah. Perancang sistem harus menyeimbangkan keandalan, biaya, dan kemudahan pemeliharaan sesuai dengan kondisi lokal.

Sistem informasi manajemen jalan juga berperan dalam mendukung penelitian dan pengembangan di bidang teknik perkerasan. Data beban lalulintas yang akurat dan berkelanjutan dari berbagai ruas jalan merupakan sumber daya yang sangat berharga bagi para peneliti yang ingin menguji atau mengkalibrasi model prediksi kerusakan (Rys, 2021). Selama ini, banyak model dikembangkan berdasarkan data dari fasilitas uji skala penuh atau dari ruas jalan di negara maju, yang belum tentu berlaku untuk kondisi lokal. Penting untuk dipahami bagaimana integrasi sistem informasi dapat benar-benar membantu dalam pengambilan keputusan strategis demi kemajuan bersama (da Silva & Darmawan, 2023). Dengan akses ke data dari sistem informasi manajemen jalan, peneliti dapat mengembangkan model yang spesifik untuk material, iklim, dan praktik konstruksi setempat. Model yang lebih akurat akan meningkatkan kepercayaan diri manajer jalan dalam mengambil keputusan. Selain itu, data historis dari sistem dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas berbagai desain perkerasan inovatif. Jika suatu ruas menggunakan desain baru dan data menunjukkan bahwa ruas tersebut memiliki laju kerusakan yang lebih lambat dibandingkan ruas kontrol dengan desain konvensional setelah beban lalulintas dinormalisasi, maka desain baru tersebut dapat diadopsi secara lebih luas. Dengan cara ini, sistem informasi manajemen jalan berfungsi sebagai laboratorium hidup yang menghasilkan bukti empiris untuk perbaikan berkelanjutan dalam praktik teknik. Namun, akses peneliti ke data sering dibatasi oleh kekhawatiran tentang keamanan data atau privasi. Kebijakan yang jelas tentang anonimisasi data dan lisensi penggunaan perlu dikembangkan untuk memfasilitasi penelitian sambil tetap melindungi kepentingan operator jalan.

Biaya siklus hidup sistem informasi manajemen jalan seringkali diremehkan pada tahap perencanaan, yang menyebabkan kekurangan dana untuk pemeliharaan dan pembaruan di kemudian hari (Le & Jeong, 2016). Biaya awal untuk membeli dan memasang sensor, membangun pusat data, serta melatih personel memang besar dan mudah dihitung. Namun, biaya operasional tahunan untuk listrik, komunikasi, kalibrasi sensor, perbaikan kerusakan, serta gaji personel operasi dan analisis seringkali tidak diperhitungkan secara memadai. Akibatnya, beberapa tahun setelah implementasi, ketika dana hibah atau pinjaman habis, sistem

menjadi terbengkalai. Sensor tidak dikalibrasi lagi, data yang terkumpul tidak dianalisis, dan akhirnya sistem mati total. Pengalaman ini menyebabkan kekecewaan dan skeptisisme terhadap sistem informasi manajemen jalan di kalangan pengambil keputusan. Untuk menghindari skenario ini, perencanaan sistem harus mencakup analisis biaya siklus hidup yang realistis, termasuk alokasi dana untuk pemeliharaan jangka panjang. Sumber pendanaan harus diidentifikasi sejak awal, misalnya dari anggaran rutin pemeliharaan jalan atau dari retribusi pengguna jalan. Model pendanaan yang menjanjikan adalah kemitraan publik swasta, dimana pihak swasta membangun dan mengoperasikan sistem dengan imbalan sebagian dari pendapatan dari tilang elektronik atau dari penjualan data anonim kepada pihak ketiga. Model ini mengalihkan risiko biaya operasional jangka panjang ke pihak swasta, yang mungkin lebih efisien dalam mengelola sistem. Namun, model ini memerlukan kerangka regulasi yang matang untuk melindungi kepentingan publik dan memastikan bahwa data yang dihasilkan tetap dapat diakses oleh pemerintah.

Aspek sumber daya manusia sering menjadi penghambat terbesar dalam pemanfaatan sistem informasi manajemen jalan secara efektif, bahkan ketika teknologi sudah tersedia. Data mentah dari sensor WIM dan kamera tidak berguna tanpa personel yang terampil untuk mengolah, menganalisis, dan menginterpretasikannya. Seorang analis data transportasi perlu memahami tidak hanya statistik dan pemrograman tetapi juga prinsip-prinsip teknik perkerasan dan manajemen aset. Kombinasi keterampilan ini jarang ditemukan, dan pelatihan untuk mendapatkannya memerlukan waktu dan biaya. Selain itu, budaya kerja di banyak instansi pemerintah masih berorientasi pada prosedur manual dan kertas, sehingga transisi ke pengambilan keputusan berbasis data menghadapi resistensi. Personel yang terbiasa dengan cara lama mungkin merasa terancam oleh sistem baru dan secara tidak sengaja atau sengaja menghambat implementasinya. Untuk mengatasi masalah ini, perubahan manajemen yang mendukung perlu dilakukan dari tingkat atas. Manajer puncak harus secara konsisten menggunakan data dari sistem dalam rapat-rapat pengambilan keputusan, sehingga menjadi contoh bagi staf di bawahnya. Insentif seperti bonus atau promosi dapat dikaitkan dengan pemanfaatan data dalam pekerjaan sehari-hari. Pelatihan berkelanjutan juga harus disediakan, tidak hanya tentang aspek teknis tetapi juga tentang manfaat sistem bagi pekerjaan masing-masing individu. Dengan pendekatan yang holistik terhadap manajemen perubahan, hambatan sumber daya manusia dapat diatasi secara bertahap. Tanpa pendekatan ini, bahkan sistem dengan teknologi tercanggih sekalipun akan gagal memberikan nilai yang diharapkan.

4. KESIMPULAN

Sistem informasi manajemen jalan yang terintegrasi berperan sentral dalam monitoring beban lalulintas melalui penggabungan teknologi weight in motion, kamera, dan sensor pendukung. Data volume, komposisi, dan beban kendaraan yang dikumpulkan secara berkelanjutan memungkinkan penghitungan akumulasi equivalent single axle load (ESAL) yang menjadi dasar evaluasi kinerja perkerasan. Dengan data ESAL yang akurat, manajer jalan dapat memprediksi sisa umur perkerasan, menyesuaikan jadwal pemeliharaan secara proaktif, serta mengalokasikan anggaran perbaikan ke ruas yang paling membutuhkan. Sistem ini juga mendukung penegakan hukum terhadap kendaraan overload yang merupakan penyebab utama kerusakan dini. Namun, keberhasilan implementasi sistem sangat bergantung pada pemeliharaan dan kalibrasi sensor yang rutin, ketersediaan sumber daya manusia terampil, serta integrasi dengan sistem pendukung seperti GIS dan sistem manajemen aset. Biaya siklus hidup yang realistis dan model pendanaan yang berkelanjutan merupakan prasyarat agar sistem dapat memberikan manfaat jangka panjang. Arsitektur modular dan standar terbuka diperlukan untuk memungkinkan pembaruan teknologi seiring perkembangan zaman.

Implikasi dari temuan ini bagi praktisi dan pembuat kebijakan adalah bahwa investasi dalam sistem informasi manajemen jalan harus direncanakan sebagai program jangka panjang, bukan proyek sekali jadi. Analisis biaya siklus hidup harus mencakup alokasi dana untuk pemeliharaan, kalibrasi, dan pelatihan personel. Pengembangan kapasitas sumber daya manusia melalui pelatihan berkelanjutan sama pentingnya dengan pengadaan perangkat keras. Kerjasama antar instansi untuk standardisasi data dan integrasi sistem perlu ditingkatkan. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan studi eksperimental yang membandingkan akurasi berbagai teknologi WIM dalam kondisi lingkungan dan lalu lintas yang berbeda, serta mengembangkan model prediksi kerusakan perkerasan berbasis machine learning yang memanfaatkan data real time. Penelitian tentang model pendanaan berkelanjutan, termasuk skema kemitraan publik swasta yang sesuai dengan kondisi lokal, juga sangat diperlukan. Studi longitudinal tentang dampak sistem informasi manajemen jalan terhadap efisiensi pemeliharaan dan umur perkerasan akan memberikan bukti empiris yang sangat berharga bagi pengambil keputusan.

DAFTAR REFERENSI

Agape, I., Dontu, A. I., Maftai, A., Gaiginschi, L., & Barsanescu, P. D. (2019). *Actual types of sensors used for weighing in motion*. 572(1), 012102. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/572/1/012102>

- Ali, R., & Darmawan, D. (2023). Big Data Management Optimization for Managerial Decision Making and Business Strategy. *Journal of Social Science Studies*, 3(2), 139-144.
- Ambrus-Somogyi, K. (2007). Combined management algorithm for maintenance of road system. *Pollack Periodica*, 2(3), 15–23. <https://doi.org/10.1556/POLLACK.2.2007.3.2>
- Amore, P. (2023). *Weigh-in-motion data-driven pavement performance prediction models*. <https://doi.org/10.33915/etd.11901>
- Beins, B. C. (2017). *Research method: A tool for life* (4th ed.). Cambridge University Press.
- Bhandari, S., Luo, X. H., & Wang, F. (2022). Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 12(1), 258–272. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.02.004>
- da Silva, B. D. S., & Darmawan, D. (2023). Integration of Management Information Systems (MIS) in Strategic Decision Making to Improve Organization Performance. *Journal of Social Science Studies*, 3(2), 347-352.
- Darmawan, D., & da Silva, B. D. S. (2025). Blockchain as an Instrument of Decentralized Social Order and Democratic Reconfiguration. *Bulletin of Science, Technology and Society*, 4(1), 11-18.
- Djaelani, M., & Darmawan, D. (2016). Studi Tentang Program Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) serta Kompetensi Lintas Budaya terhadap Kinerja Pekerja Konstruksi. *Jurnal Ekonomi dan Bisnis*, 6(2), 11-17.
- Djaelani, M., Judiono, J., Darmawan, D., & Amri, M. W. (2022). Study of concrete: quality and economic. *Bulletin of Science, Technology and Society*, 1(1), 1-3.
- Djaelani, M., Sinambela, E. A., Darmawan, D., & Mardikaningsih, R. (2021). Strengthening the culture of occupational safety and health as a contributor to the formation of construction project performance. *Journal of Marketing and Business Research (MARK)*, 1(2), 59-70.
- Dudley, J. (2005). *Research methods*. Boston: Pearson Education.
- Folayan, M. (2019). *Literature review and making sense of data*. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.36008.93449>
- Gajda, J., Burnos, P., Sroka, R., & Daniol, M. (2023). Accuracy Maps of Weigh-In-Motion Systems for Direct Enforcement. *Electronics*, 12(7), 1621–1621. <https://doi.org/10.3390/electronics12071621>
- Guo, R. (2019). *Roadway Condition Survey Technologies: Past, Presence and Trend*. 2(4), 1–3. <https://doi.org/10.33552/CTCSE.2019.02.000542>
- Han, D., & Kobayashi, K. (2013). Criteria for the development and improvement of PMS models. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 17(6), 1302–1316. <https://doi.org/10.1007/S12205-013-0142-2>
- He, Y., Li, J., Xu, X., Li, A., Liu, H., Jiang, T., & Shi, K. (2021). Influence of overloaded vehicles on pavement life based on WIM data. 643(1), 012183. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/643/1/012183>

- Khairi, M., & Darmawan, D. (2025). Blockchain Enforcement in Employee Data Management to Increase Transparency and Security. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, 7(2), 1-5.
- Le, T., & Jeong, H. D. (2016). Interlinking life-cycle data spaces to support decision making in highway asset management. *Automation in Construction*, 64, 54–64. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2015.12.016>
- M, K., Hosny, O., M, K., & Hosny, O. (2025). *Modeling Pavement Performance and Distresses: A Machine-Learning Approach*. 115–127. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95111-4_8
- Majzooobi, G. H., & Dehgolan, F. R. (2011). Determination of the constants of damage models. *Procedia Engineering*, 10, 764–773. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.04.127>
- Marović, I., Maršanić, R., & Cuculić, M. (2023). Application of Management Information Systems in Road Infrastructure Management. *Zbornik Radova*, 26(1), 187–200. <https://doi.org/10.32762/zr.26.1.11>
- Miller, S., Scott, P., Cooper, S., Brown, P., Ingram, P., & Chalmers, H. (2012). *Road Asset Management Systems*. 1–6. <https://doi.org/10.1049/CP.2012.1904>
- Najjar, Y. M., Uddin, W., & Jaafar, Z. F. M. (2019). *Pavement Roughness Modeling Using Regression And Ann Methods For Ltpw Western Region*. <https://doi.org/10.15405/EPMS.2019.12.53>
- Nalbandian, K. M., Carpio, M., & Gonzalez, A. (2021). Analysis of the scientific evolution of self-healing asphalt pavements: Toward sustainable road materials. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126107. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126107>
- Nilsson, J.-E., Svensson, K., & Haraldsson, M. (2020). Estimating the marginal costs of road wear. *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, 139, 455–471. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2020.07.013>
- Priambodo, S., Djaelani, M., Jahroni, J., Sinambela, E. A., & Darmawan, D. (2022). Evaluation of the Need for Motorcycle and Car Parking Spaces. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, 1(1), 16-19.
- Riyadin, F., & Darmawan, D. (2023). Experimental Study of 3 KW Generator Damage Types Based on Vibration Signals. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, 3(2), 27-31.
- Rys, D. (2021). Consideration of dynamic loads in the determination of axle load spectra for pavement design. *Road Materials and Pavement Design*, 22(6), 1309–1328. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1687006>
- Ryś, D., Więckowski, P., Wasilewska, M., & Dołęga, C. (2024). Impact of accuracy of weigh-in-motion data for pavement analysis and design: influence of temperature variations. *Road Materials and Pavement Design*, 1–18. <https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2438342>
- Sipos, R., & Sipos, R. (2025). *Research Methodology and Analytical Framework*. 91–111. https://doi.org/10.1007/978-3-658-49695-1_4
- Stawska, S., Chmielewski, J., Bacharz, M., Bacharz, K., & Nowak, A. S. (2021). Comparative Accuracy Analysis of Truck Weight Measurement Techniques. *Applied Sciences*, 11(2), 745. <https://doi.org/10.3390/APP11020745>

- Sulaksono, S., Hardyansah, R., & Darmawan, D. (2025). Reimagining Social Mobility in the Platform Economy and Automation-Driven Labor Landscape. *Bulletin of Science, Technology and Society*, 4(1), 35-42.
- Theodara, N. A., Darmawan, D., & Putra, A. R. (2022). Material Management Effectiveness. *Bulletin of Science, Technology and Society*, 1(1), 7-10.
- Triono, B., & Darmawan, D. (2024). 3D Printing Technology as A Driver of Innovation and Efficiency in Mechanical Engineering. *Journal of Science, Technology and Society (SICO)*, 5(2), 11–20.
- Triono, B., Darmawan, D., Djaelani, M., Safitri, F. S. A., & Masithoh, N. (2025). How Digitalization Reshapes Labor and Task Architecture in the Manufacturing Sector. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, 7(2), 11-16.
- Wahyudi, W., R. N. K. Kabalmay, & M. W. Amri. (2021). Big Data and New Things in Social Life. *Studi Ilmu Sosial Indonesia*, 1(1), 1–12.
- Xiao, D. X., & Wu, Z. (2016). Using systematic indices to relate traffic load spectra to pavement performance. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4), 302–312. <https://doi.org/10.1016/J.IJPRT.2016.07.005>
- Xu, H., Lin, J., & Yu, W. (2017). *Smart Transportation Systems: Architecture, Enabling Technologies, and Open Issues*. 23–49. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3892-1_2
- Yamrudin, & Amin, M. (2025). Implementation of Internet of Things in Road Infrastructure Monitoring and Preservation. *Engineering and Technology Journal*, 10(06). <https://doi.org/10.47191/etj/v10i06.10>
- Yashina, M. V., & Tatashev, A. G. (2021). Evaluation of Highway Traffic Intensity with Different Vehicle Types. *Russian Engineering Research*, 41(6), 545–547. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21060265>
- Zhao, H.-X., & Wen, K.-G. (2017). An Improved Algorithm for Highway Design Hourly Volume Calculation. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*. <https://doi.org/10.12783/DTCSE/CSMA2017/17368>