Respons Mekanistik dan Akomodasi Struktur Perkerasan Lentur akibat Elektrifikasi Traktor–Semitrailer Berat

Berlian Kushari*, [1], Aisyah Nur Jannah[2], Zainal Arifin[3]

[1]Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia
Jln. Kaliurang KM 14,5 Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55584, Indonesia
[2]Department of Civil and Infrastructure Engineering, Royal Melbourne Institute of Technology
124 La Trobe St, Melbourne Victoria, 3000, Australia
[3]Pendidikan Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta
Jln. Colombo No. 1, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55281, Indonesia

*E-mail: bkushari@uii.ac.id

Diterima: 13 Januari 2026, direvisi: 11 Maret 2026, disetujui: 22 Mei 2026,
tersedia daring: 26 Juni 2026, diterbitkan: 30 Juni 2026

Abstrak

Elektrifikasi kendaraan berat dapat mengubah tidak hanya massa kendaraan, tetapi juga distribusi beban pada sumbu dan ban, sehingga konsekuensinya terhadap perkerasan tidak cukup dinilai dari berat kotor kendaraan saja. Penelitian ini menganalisis perubahan respons mekanistik perkerasan lentur akibat elektrifikasi traktor–semitrailer berat dan menentukan tambahan ketebalan lapis aspal ekuivalen secara mekanistik yang diperlukan untuk memulihkan kondisi respons kendaraan diesel acuan. Konfigurasi traktor–semitrailer diesel/ *Internal Combustion Engine* (ICE) dan listrik baterai/ *Battery Electric Vehicle* (BEV) dianalisis pada dua kondisi terkendali, yaitu berat kombinasi bruto yang sama (*equal*-GCW) untuk memisahkan pengaruh arsitektur pembebanan dan muatan yang sama *(equal-payload*) untuk merepresentasikan arsitektur pembebanan bersama tambahan massa tara kendaraan listrik. Reaksi sumbu diterjemahkan menjadi 12 kontak ban individual dan dianalisis pada satu struktur perkerasan lentur acuan melalui lintasan kendaraan lengkap pada beberapa kedalaman respons. Konsistensi hasil diperiksa pada 25 kombinasi parameter pembebanan, kemudian dilakukan analisis invers untuk memperoleh tambahan ketebalan yang memenuhi kriteria regangan tarik dasar aspal dan regangan tekan bagian atas tanah dasar. Pada kondisi *equal*-GCW, defleksi permukaan BEV lebih kecil pada seluruh 25 kasus, tetapi regangan tarik aspal dan regangan tekan tanah dasar menunjukkan pengurutan ICE–BEV yang berubah menurut kombinasi pembebanan. Sebanyak 21 dari 25 kasus memerlukan tambahan ketebalan positif sebesar 1,5–40,0 mm, dengan median 18,5 mm. Pada kondisi *equal-payload*, 23 dari 25 kasus memerlukan tambahan 17,3–59,5 mm, dengan median 36,6 mm. Seluruh 44 kasus dengan tambahan ketebalan positif dikendalikan oleh regangan tekan tanah dasar, dan seluruh 50 kasus analisis invers memenuhi pemeriksaan ulang pada lintasan kendaraan lengkap. Hasil ini menunjukkan bahwa arsitektur pembebanan merupakan bagian penting dari persoalan mekanistik elektrifikasi kendaraan berat dan dapat menghasilkan kebutuhan akomodasi struktur bahkan tanpa peningkatan berat kombinasi total.

Kata kunci: Akomodasi struktur, elektrifikasi kendaraan berat, kendaraan listrik, perkerasan lentur, respons mekanistik.

Abstract

Flexible-Pavement Mechanistic Responses and Structural Accommodation under Heavy-Duty Tractor–Semitrailer Electrification: *Heavy-duty vehicle electrification can alter not only vehicle mass but also axle- and tire-level load distribution; consequently, its pavement effects cannot be assessed from gross vehicle weight alone. This study investigates changes in flexible-pavement mechanistic responses caused by heavy tractor–semitrailer electrification and determines the mechanistically equivalent additional asphalt thickness required to restore the response condition of a diesel reference vehicle. Diesel and battery-electric tractor–semitrailer configurations were analysed under two controlled conditions: equal gross combination weight (equal-GCW), which isolates the effect of loading architecture, and equal payload, which represents loading-architecture changes together with the BEV tare-mass penalty. Axle reactions were translated into 12 individual tire contacts and analysed over complete vehicle passages on a single reference flexible-pavement structure at multiple response depths. Consistency across loading configurations was examined using 25 parameter combinations, followed by an inverse analysis to determine the additional asphalt thickness required to satisfy both asphalt-bottom tensile-strain and subgrade-top compressive-strain criteria. Under equal-GCW, BEV surface deflection was lower in all 25 cases, whereas asphalt tensile strain and subgrade compressive strain exhibited ICE–BEV orderings that varied with the loading configuration. Positive additional thickness was required in 21 of 25 cases, ranging from 1.5 to 40.0 mm, with a median of 18.5 mm. Under equal payload, 23 of 25 cases required 17.3–59.5 mm, with a median of 36.6 mm. All 44 cases requiring positive additional thickness were governed by subgrade compressive strain, and all 50 inverse-analysis cases satisfied complete-passage re-verification. The results show that loading architecture is an integral part of the mechanistic consequences of heavy-duty electrification and can generate structural-accommodation requirements even without an increase in total combination weight.*

Keywords**:** *Electric vehicle, flexible pavement, heavy-duty electrification, mechanistic response, structural accommodation.*

http://dx.doi.org/10.25104/jptd.v28i1.3044
2579-8731/ 1410-8593 ©2026 Badan Kebijakan Transportasi, diterbitkan oleh Sekretariat Badan Kebijakan Transportasi.
Artikel ini *open access* dibawah lisensi CC BY-NC-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)
Jurnal Penelitian Transportasi Darat telah terakreditasi Sinta 2.

1. Pendahuluan

Elektrifikasi transportasi jalan telah menjadi bagian dari arah pengembangan sistem transportasi Indonesia [1][2]. Pada tingkat kendaraan, pengujian tipe fisik kendaraan dengan penggerak listrik juga telah memiliki regulasi [3]. Dari sisi infrastruktur, beban kendaraan aktual dan data beban gandar, termasuk hasil penimbangan atau *weigh-in-motion* merupakan bagian penting dalam penentuan beban rencana perkerasan [4]. Dengan demikian, perkembangan kendaraan berat listrik tidak hanya menimbulkan pertanyaan mengenai teknologi kendaraan, energi, dan pengisian daya, tetapi juga mengenai bagaimana perubahan karakteristik pembebanannya diterima oleh struktur jalan yang ada dan yang akan dirancang.

Persoalan tersebut menjadi lebih penting pada kendaraan berat karena sistem baterai menambah massa tara dan dapat mengurangi kapasitas muatan ketika batas berat kendaraan harus dipertahankan. Hubungan antara kapasitas baterai, massa kendaraan, kapasitas muatan, dan batas berat telah ditunjukkan dalam berbagai kajian kendaraan berat listrik [5][6][7]. Dalam penelitian ini, konsekuensi tersebut diperiksa melalui dua kondisi pembandingan. Pada pasangan kendaraan yang digunakan, massa tara traktor diesel dan listrik masing-masing 7,50 dan 10,90 ton, dengan semitrailer bersama 6,49 ton. Pada berat kombinasi bruto yang sama sebesar 40,00 ton, muatan diesel dan listrik masing-masing 26,01 dan 22,61 ton; sedangkan pada muatan yang sama sebesar 22,61 ton, berat kombinasi diesel menjadi 36,60 ton dan kendaraan listrik tetap 40,00 ton. Kedua kondisi tersebut memisahkan perubahan arsitektur pembebanan pada berat total yang sama dari pengaruh gabungan arsitektur pembebanan dan tambahan massa tara pada layanan angkutan yang sama.

Kajian mengenai interaksi kendaraan listrik dan perkerasan menunjukkan bahwa tambahan massa kendaraan berat listrik dapat meningkatkan respons dan potensi kerusakan perkerasan, dengan konsekuensi terhadap umur layanan, lingkungan, dan biaya siklus hidup [8][9][10]. Pada tingkat pembebanan, lokasi baterai dan distribusi massa memengaruhi beban sumbu, gaya kontak ban–perkerasan, dan respons struktur, bahkan pada kendaraan yang dibandingkan dengan berat kotor yang sama [11][12][13]. Penelitian mutakhir selanjutnya menunjukkan bahwa pengaruh tersebut dapat berkembang menjadi kerusakan pada berbagai kedalaman perkerasan dan memerlukan penilaian yang mempertimbangkan konfigurasi kendaraan, distribusi beban, serta karakteristik struktur [14][15][16][17][18]. Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa konsekuensi elektrifikasi kendaraan berat tidak cukup dijelaskan melalui berat kotor kendaraan saja.

Konteks Indonesia memperkuat kebutuhan untuk mempertahankan informasi distribusi beban secara rinci. Data *weigh-in-motion* menunjukkan bahwa distribusi beban sumbu aktual dapat berbeda dari asumsi standar dan memengaruhi beban ekuivalen maupun umur rencana perkerasan; studi kendaraan bermuatan berlebih juga menunjukkan konsekuensi struktural pada perkerasan lentur [19][20][21]. Meskipun tidak membahas kendaraan listrik, hasil tersebut menunjukkan bahwa distribusi beban sumbu merupakan persoalan nyata dalam perencanaan perkerasan Indonesia. Karena itu, dampak elektrifikasi kendaraan berat perlu ditelusuri tidak hanya dari berat total, tetapi juga dari cara beban diteruskan melalui sumbu, ban, dan struktur perkerasan.

Meskipun hubungan antara elektrifikasi, tambahan massa, distribusi baterai, respons, dan kerusakan perkerasan telah banyak dibahas, masih terdapat ruang metodologis yang belum terjawab secara terpadu. Studi yang ada umumnya membandingkan perubahan berat atau beberapa skenario distribusi baterai pada satu dasar pembandingan. Studi [12] merupakan salah satu yang paling dekat karena membandingkan kendaraan diesel dan listrik pada berat kotor yang sama. Namun, belum banyak kajian yang sekaligus memisahkan pengaruh arsitektur pembebanan dari tambahan massa, mempertahankan pembebanan sampai tingkat ban dan lintasan kendaraan lengkap, mengevaluasi respons pada beberapa kedalaman, serta menerjemahkan perbedaannya secara invers menjadi penyesuaian struktur.

Penelitian ini mengisi ruang tersebut melalui kondisi *equal*-GCW dan *equal-payload*. Reaksi sumbu diterjemahkan menjadi pembebanan tingkat ban dan dianalisis pada satu struktur perkerasan lentur acuan sepanjang lintasan kendaraan lengkap. Kebaruannya terletak pada pemisahan kedua mekanisme pembebanan dan penerjemahan respons secara invers menjadi tambahan ketebalan lapis aspal ekuivalen

secara mekanistik yang mengembalikan regangan kritis BEV ke kondisi acuan ICE. Besaran tersebut merupakan ukuran kesetaraan respons mekanistik, bukan rekomendasi ketebalan konstruksi atau prediksi umur layanan.

Berdasarkan kerangka pemikiran tersebut, penelitian ini memiliki tiga tujuan. Pertama, mengidentifikasi perubahan respons mekanistik perkerasan lentur akibat perubahan distribusi beban sumbu dan ban pada elektrifikasi traktor–semitrailer berat. Kedua, membedakan konsekuensi perubahan arsitektur pembebanan dari konsekuensi tambahan massa kendaraan melalui kondisi *equal*-GCW dan *equal-payload*. Ketiga, menentukan tambahan ketebalan lapis aspal ekuivalen secara mekanistik yang diperlukan untuk memulihkan kondisi respons acuan ICE. Hasil penelitian diharapkan memberikan dasar mekanistik bagi penilaian kesiapan infrastruktur jalan terhadap elektrifikasi kendaraan berat, tanpa mengubah hasil satu struktur acuan dan satu pasangan kendaraan menjadi rekomendasi desain yang berlaku umum.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan analisis numerik dalam dua tahap. Tahap pertama menghitung respons mekanistik perkerasan akibat kendaraan diesel dan listrik pada lintasan kendaraan lengkap; tahap kedua menggunakan analisis invers untuk menentukan tambahan ketebalan lapis aspal yang mengembalikan regangan tarik dasar aspal dan regangan tekan bagian atas tanah dasar akibat BEV ke batas respons acuan ICE. Besaran tersebut dinyatakan sebagai tambahan ketebalan aspal ekuivalen secara mekanistik, Δh^*, dan tidak dimaksudkan sebagai rekomendasi tebal hamparan, prediksi umur layanan, atau kebutuhan rehabilitasi lapangan. Kerangka analisis mempertahankan mata rantai massa kendaraan → reaksi sumbu → gaya tiap ban → tekanan kontak → respons mekanistik → akomodasi struktur ekuivalen (Gambar 1).

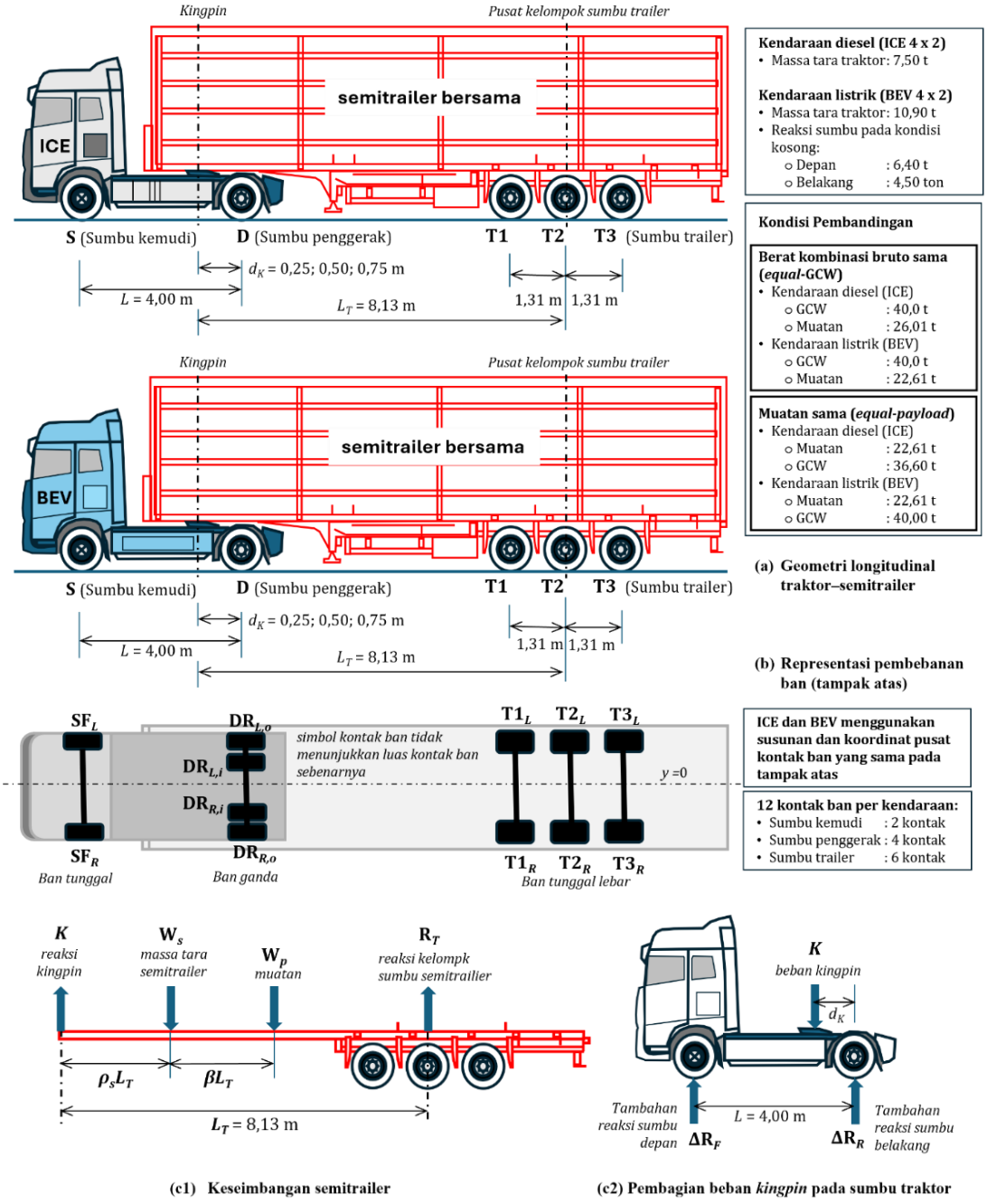


Gambar 1. Kerangka analisis penelitian dari pembandingan kendaraan diesel dan listrik, pembentukan pembebanan Tingkat ban, evaluasi respons mekanistik lintasan penuh, hingga penentuan tambahan ketebalan aspal ekuivalen secara mekanistik.

2.1. Data Kendaraan dan Kondisi Pembandingan

Kendaraan pembanding terdiri atas traktor diesel SANY 4×2, traktor listrik baterai SANY e263 4×2, serta semitrailer tiga sumbu Schmitz S.CS yang digunakan bersama oleh kedua traktor tersebut [22][23][24]. Pemilihan pasangan tersebut didasarkan pada kesamaan konfigurasi dasar dan ketersediaan data teknis yang memadai sehingga perbedaan utama dapat difokuskan pada massa tara dan distribusi pembebanan. Kedua traktor mempunyai jarak sumbu 4,00 m. Massa kosong traktor diesel sebesar 7,50 ton, sedangkan traktor listrik sebesar 10,90 ton, sehingga terdapat selisih massa tara sebesar 3,40 ton.

Pada traktor listrik, data pabrikan memberikan reaksi sumbu kosong sebesar 6,40 ton pada sumbu depan dan 4,50 ton pada sumbu belakang. Semitrailer mempunyai massa kosong 6,49 ton, tiga sumbu masing-masing berkapasitas 9 ton, jarak antarsumbu 1,31 m, dan jarak *kingpin* ke pusat efektif kelompok sumbu sebesar 8,13 m.



Gambar 2. Geometri longitudinal kendaraan pembanding, representasi pembebanan tingkat ban, dan keseimbangan statik traktor–semitrailer. **(a)** Traktor ICE dan BEV 4×2 menggunakan semitrailer tiga sumbu yang sama; dua kondisi pembandingan adalah berat kombinasi bruto yang sama dan muatan yang sama. **(b)** Susunan pusat kontak ban terdiri atas dua kontak pada sumbu kemudi, empat kontak pada sumbu penggerak dengan ban ganda, dan enam kontak pada tiga sumbu semitrailer dengan ban tunggal lebar, sehingga setiap kendaraan direpresentasikan oleh 12 kontak ban. **(c1)** dan **(c2)** Diagram keseimbangan semitrailer dan pembagian tambahan reaksi pada sumbu traktor akibat beban kingpin. **Sumber:** disusun penulis berdasarkan data teknis pabrikan dan model penelitian.

Dua kondisi pembandingan digunakan dalam studi ini, yaitu kondisi berat kombinasi bruto yang sama (*equal*-GCW) dan kondisi muatan yang sama (*equal-payload*). Pada kondisi berat kombinasi bruto yang sama (*equal*-GCW), kedua kombinasi kendaraan mempunyai berat total 40,00 ton. Muatan kendaraan diesel sebesar 26,01 ton, sedangkan kendaraan listrik membawa 22,61 ton. Kondisi ini digunakan untuk mengamati konsekuensi perubahan arsitektur distribusi pembebanan tanpa perubahan berat kombinasi total. Pada kondisi muatan yang sama (*equal-payload*), kedua kendaraan membawa muatan 22,61 ton. Berat kombinasi kendaraan diesel menjadi 36,60 ton, sedangkan kendaraan listrik tetap 40,00 ton. Kondisi

ini merepresentasikan layanan angkutan yang sama sehingga perubahan arsitektur pembebanan bekerja bersama tambahan massa tara kendaraan listrik sebesar 3,40 ton. Geometri kendaraan, lima garis sumbu, representasi 12 kontak ban, serta diagram benda bebas ditunjukkan pada Gambar 2.

2.2. Keseimbangan Statik dan Ruang Parameter Pembebanan

Reaksi statik kendaraan dihitung dari keseimbangan gaya dan momen. Pada geometri kendaraan yang digunakan dalam penelitian ini, jarak sumbu traktor adalah $L = 4{,}00$ m, sedangkan jarak antara kingpin dan pusat efektif kelompok sumbu semitrailer adalah $L_T = 8{,}13$ m. Massa kosong semitrailer dinyatakan sebagai W_s, massa muatan sebagai W_p, posisi relatif titik berat semitrailer sebagai ρ_s, dan posisi relatif titik berat muatan sebagai β.

Perhitungan keseimbangan terlebih dahulu dilakukan dalam bentuk massa-ekuivalen. Dengan demikian, faktor percepatan gravitasi g_0 yang terdapat pada setiap suku gaya dapat dieliminasi dari persamaan keseimbangan, dan seluruh besaran pada Persamaan (1)–(4) di bawah ini dinyatakan dalam ton. Keseimbangan momen terhadap *kingpin* dituliskan sebagai $R_T L_T = W_s(\rho_s L_T) + W_p(\beta L_T)$, sehingga reaksi kelompok sumbu semitrailer dituliskan sebagaimana pada (1):

$$R_T = W_s \rho_s + W_p \beta \tag{1}$$

Reaksi pada *kingpin* dihitung dengan (2):

$$K = W_s + W_p - R_T \tag{2}$$

Jika d_K adalah jarak longitudinal *kingpin* di depan sumbu belakang traktor, reaksi sumbu depan dan belakang traktor masing-masing dihitung sebagaimana (3) dan (4):

$$R_F = R_{F0} + K\frac{d_K}{L} \tag{3}$$

$$R_R = R_{R0} + K\left(1 - \frac{d_K}{L}\right) \tag{4}$$

Pada Persamaan (1)–(4), R_{F0} dan R_{R0} adalah reaksi sumbu depan dan belakang traktor pada kondisi kosong. Perhitungan keseimbangan dilakukan terlebih dahulu dalam satuan massa-ekuivalen ton, kemudian dikonversikan menjadi gaya menggunakan percepatan gravitasi $g_0 = 9{,}80665\ \mathrm{m/s^2}$. Empat besaran yang tidak tersedia secara lengkap dari data pabrikan diperlakukan pada penelitian ini sebagai parameter rekayasa dengan rentang yang dibatasi, bukan sebagai variabel acak ataupun selang kepercayaan statistik (Tabel 1).

Tabel 1. Parameter rekayasa dengan rentang dibatasi, nilai masing-masing, dan dasar penetapannya

Parameter	Rendah	Tengah	Tinggi	Dasar penetapan
Reaksi sumbu depan kosong ICE, $\alpha = R_{F0,\mathrm{ICE}}$	4,50 t	5,00 t	5,50 t	Rentang distribusi massa kosong traktor diesel
Posisi relatif titik berat semitrailer, ρ_s	0,45	0,55	0,65	Rentang posisi titik berat tara semitrailer
Jarak *kingpin* dari sumbu belakang, d_K	0,25 m	0,50 m	0,75 m	Rentang geometri pemasangan
Posisi relatif titik berat muatan, β	0,76	0,80	0,84	Rentang posisi muatan yang tetap memenuhi batas kapasitas

Rentang α setara dengan posisi titik berat traktor diesel kosong sekitar 1,067–1,600 m di belakang sumbu depan. Rentang ρ_s menempatkan titik berat kosong semitrailer pada 45–65% jarak kingpin–pusat kelompok sumbu. Rentang d_K digunakan karena posisi longitudinal *fifth wheel* tidak tersedia secara lengkap pada data traktor. Rentang β ditetapkan sebagai rentang posisi muatan yang tetap memenuhi batas kapasitas sumbu, berat kendaraan, *kingpin*, dan kelompok sumbu trailer.

Keempat parameter tersebut membentuk ruang rancangan empat faktor dengan tiga tingkat. Dari $3^4 = 81$ kombinasi yang mungkin, dipilih 25 kasus kombinasi rancangan yang terdiri atas 16 kombinasi sudut ditambah 8 kombinasi aksial dan 1 kombinasi pusat. Susunan ini mempertahankan seluruh kombinasi ekstrem dari keempat parameter sekaligus menyediakan perubahan satu faktor di sekitar kombinasi pusat,

dengan jumlah analisis yang lebih kecil daripada rancangan faktorial penuh. Sebelum digunakan dalam analisis mekanistik, seluruh 81 kombinasi diperiksa terhadap keseimbangan vertikal, non-negativitas reaksi, serta batas kapasitas sumbu, *kingpin*, berat kendaraan, dan kelompok sumbu semitrailer.

2.3. Pembebanan Tingkat Ban dan Struktur Perkerasan Acuan

Reaksi sumbu tidak diteruskan kepada model perkerasan sebagai satu beban sumbu ekuivalen. Namun setiap reaksi diterjemahkan menjadi gaya pada masing-masing ban sesuai konfigurasi fisik kendaraan. Pada sumbu kemudi dengan dua ban tunggal, gaya tiap ban dihitung sebagai (5):

$$P_S = \frac{R_F g_0}{2} \tag{5}$$

Pada sumbu penggerak dengan konfigurasi ban ganda, gaya tiap ban adalah (6):

$$P_D = \frac{R_R g_0}{4}. \tag{6}$$

Kelompok tiga sumbu semitrailer diasumsikan membagi reaksi secara sama pada ketiga sumbu serta secara sama antara sisi kiri dan kanan. Karena setiap sumbu trailer direpresentasikan oleh dua ban tunggal lebar, gaya tiap ban trailer dihitung sebagai (7):

$$P_T = \frac{R_T g_0}{3 \times 2} = \frac{R_T g_0}{6}. \tag{7}$$

Dengan demikian, setiap kendaraan terdiri atas 12 kontak ban, yaitu dua kontak pada sumbu kemudi, empat pada sumbu penggerak, dan enam pada kelompok tiga sumbu semitrailer. Untuk 25 kasus kombinasi desain, dua kondisi pembandingan, dan dua tipe kendaraan diperoleh 100 identitas konfigurasi pembebanan atau 1.200 kontak ban. Setiap kontak ban direpresentasikan sebagai tekanan normal seragam pada area lingkaran dengan tekanan kontak sebesar 700 kPa. Nilai tersebut digunakan sebagai kondisi pemodelan terkendali dan tidak dimaksudkan sebagai tekanan inflasi spesifik pabrikan. Jari-jari kontak ekuivalen ban ke-i dihitung dengan (8):

$$a_i = \sqrt{\frac{P_i}{\pi p_c}}, \tag{8}$$

dengan $P_i$adalah gaya vertikal ban dan p_c adalah tekanan kontak.

Struktur perkerasan dibuat sama pada seluruh pasangan pembandingan agar perbedaan respons hanya berasal dari perubahan pembebanan kendaraan. Struktur acuan terdiri atas lapis aspal setebal 0,200 m dengan modulus elastisitas 3.000 MPa dan rasio Poisson 0,35; lapis fondasi setebal 0,300 m dengan modulus 600 MPa dan rasio Poisson 0,35; serta tanah dasar semi-tak hingga dengan modulus 100 MPa dan rasio Poisson 0,45. Seluruh lapisan diasumsikan homogen, isotropik, elastik linear, dan terikat sempurna. Struktur ini dipilih karena telah digunakan dalam pengembangan dan pengujian model numerik yang menjadi dasar penelitian ini serta mempunyai respons acuan yang dapat direproduksi. Penggunaan struktur yang sama pada seluruh pasangan kendaraan menjaga kondisi pembandingan tetap terkendali sehingga perubahan respons dapat ditelusuri terutama kepada perubahan arsitektur pembebanan. Struktur ini digunakan sebagai kasus acuan analisis dan tidak dimaksudkan untuk mewakili satu ruas jalan atau satu desain perkerasan tertentu.

2.4. Analisis Mekanistik dan Keandalan Perhitungan

Respons mekanistik perkerasan dihitung menggunakan PaVIA, perangkat analisis perkerasan multilapis yang dikembangkan untuk menghitung perpindahan, tegangan, dan regangan akibat sistem beban ban pada permukaan perkerasan. PaVIA versi 1.5 diimplementasikan dalam Python dan menerapkan teori elastis multilapis berbasis formulasi Burmister [25][26][27]. Setiap kontak ban dihitung sebagai beban lingkaran bertekanan seragam. Respons akibat masing-masing ban terlebih dahulu dihitung terhadap posisi titik pengamatan, kemudian ditransformasikan ke sistem koordinat global dan dijumlahkan berdasarkan prinsip superposisi. Dengan cara ini, susunan banyak ban dipertahankan sebagai

sistem beban spasial yang terpisah dan tidak digantikan oleh satu beban sumbu ekuivalen. Untuk analisis invers yang menentukan tambahan ketebalan lapis aspal, digunakan modul invers pada PaVIA. Modul tersebut tetap menggunakan mesin mekanika yang sama dan hanya menambahkan prosedur pencarian ketebalan. Dengan demikian, perhitungan respons langsung dan analisis invers tetap didasarkan pada formulasi mekanika yang sama.

Mesin mekanistik yang terintegrasi dalam PaVIA versi 1.5 telah melalui serangkaian pengujian numerik dan pengujian berbasis prinsip mekanika sebelum digunakan dalam penelitian ini. Pemeriksaan tersebut meliputi ketelitian penyelesaian sistem persamaan, kestabilan transformasi numerik, sifat linear, superposisi beban, kesinambungan kondisi antarlapis, penyamaan struktur berlapis menjadi medium homogen, pembandingan dengan solusi analitik medium setengah ruang, serta resiprositas Maxwell–Betti. Seluruh pengujian memenuhi batas penerimaan yang telah ditetapkan sebelum rangkaian perhitungan dilakukan. Struktur perkerasan acuan yang digunakan dalam penelitian ini juga termasuk dalam struktur yang digunakan pada pengujian tersebut.

Rangkaian pengembangan, formulasi, dan verifikasi PaVIA telah didokumentasikan secara lebih rinci dalam kajian terpisah. Karena penelitian ini berfokus pada penerapan model terhadap pembebanan kendaraan berat, bagian ini hanya merangkum bukti verifikasi yang paling berkaitan dengan analisis yang dilakukan (Tabel 2).

Tabel 2. Hasil pengujian verifikasi numerik dan mekanistik PaVIA yang relevan

Pengujian	Hasil	Batas penerimaan
Residu penyelesaian sistem persamaan	$6{,}64 \times 10^{-17}$	$< 1 \times 10^{-13}$
Galat konfigurasi baku transformasi Hankel balik	$3{,}58 \times 10^{-7}$	$< 1 \times 10^{-5}$
Galat superposisi linear	$8{,}21 \times 10^{-14}$	$< 5 \times 10^{-10}$
Selisih respons pada antarmuka	$1{,}05 \times 10^{-15}$	$< 1 \times 10^{-8}$
Galat pada uji medium homogen	$3{,}19 \times 10^{-16}$	$< 2 \times 10^{-5}$
Galat terhadap solusi analitik medium setengah ruang	$1{,}65 \times 10^{-15}$	$< 1 \times 10^{-6}$
Residu resiprositas Maxwell–Betti	$2{,}29 \times 10^{-6}$	$< 2 \times 10^{-4}$

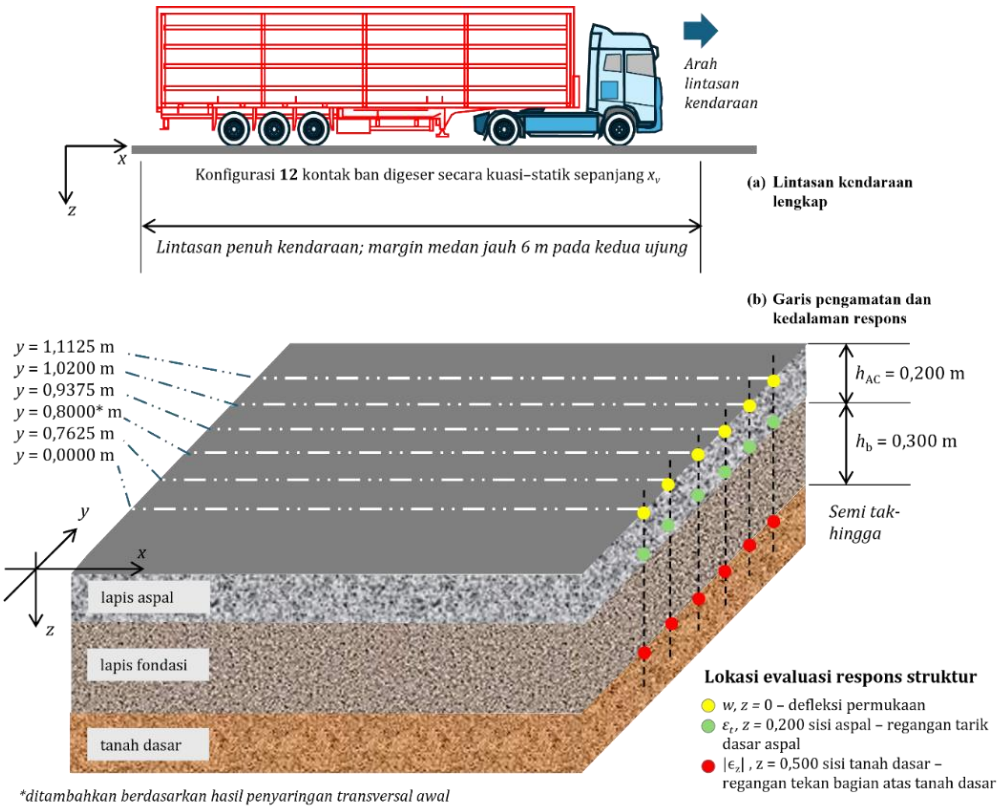
Pengujian tersebut menunjukkan bahwa implementasi numerik memenuhi perilaku mekanika yang diharapkan dalam ruang lingkup model yang digunakan. Namun, pengujian tersebut merupakan verifikasi komputasi, bukan validasi empiris terhadap perkerasan lapangan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini ditafsirkan sebagai respons mekanistik dari model perkerasan elastis multilapis yang digunakan, bukan sebagai prediksi langsung perilaku ruas jalan tertentu.

2.5. Evaluasi Lintasan Kendaraan Lengkap dan Ekstraksi Respons Kritis

Setiap kendaraan digeser secara kuasistatik sebagai satu konfigurasi 12 kontak ban melalui bidang pengamatan. Analisis ini tidak memasukkan efek kecepatan, interaksi dinamik kendaraan–perkerasan, ketidakseimbangan suspensi, pengereman, atau gaya horizontal ban. Batas lintasan ditentukan dari posisi sumbu trailer terakhir dengan tambahan jarak medan jauh 6 m sebelum dan setelah seluruh kendaraan melewati bidang pengamatan. Langkah awal posisi longitudinal kendaraan adalah 0,10 m. Di sekitar tiap kandidat ekstremum, perhitungan diperhalus pada rentang $\pm 0{,}15$ m menggunakan langkah 0,02 m dan selanjutnya 0,01 m. Ekstremum diterima apabila perubahan besar respons tidak melebihi 0,2% dan perubahan posisi kritis tidak melebihi 0,02 m. Jika salah satu syarat tidak terpenuhi, dilakukan penghalusan lanjutan dengan langkah 0,005 m.

Posisi pengamatan transversal ditentukan terlebih dahulu melalui penyaringan pada kombinasi pusat. Evaluasi awal dilakukan pada $0 \leq y \leq 1{,}30$ m dengan interval 0,05 m. Lima garis kandidat awal adalah $y = \{0;\ 0{,}7625;\ 0{,}9375;\ 1{,}0200;\ 1{,}1125\}$ m, yang masing-masing mewakili garis tengah kendaraan, lintasan ban dalam pada pasangan ban ganda, titik tengah pasangan ban ganda, lintasan ban tunggal kemudi/trailer, dan lintasan ban luar pada pasangan ban ganda. Penyaringan menunjukkan bahwa lima garis tersebut belum menangkap puncak regangan tarik dasar aspal BEV secara memadai; nilai maksimum yang diperoleh masih 1,039% lebih rendah daripada hasil penyaringan transversal yang lebih rapat, melebihi batas 0,5% yang telah ditetapkan sebelumnya. Oleh karena itu, garis $y = 0{,}8000$ m ditambahkan ke dalam himpunan garis pengamatan yang digunakan pada seluruh 25 kasus konfigurasi

parameter. Enam garis pengamatan yang digunakan dalam seluruh analisis selanjutnya adalah $y = \{0;\ 0{,}7625;\ 0{,}8000;\ 0{,}9375;\ 1{,}0200;\ 1{,}1125\}$ m. Hanya sisi $y \geq 0$ yang perlu dihitung karena geometri kendaraan dan pembagian beban kiri–kanan bersifat simetris. Prosedur lintasan kendaraan dan lokasi respons ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema evaluasi respons mekanistik sepanjang lintasan kendaraan. (a) Konfigurasi 12 kontak ban digeser secara kuasi-statik sepanjang lintasan penuh kendaraan dengan margin medan jauh 6 m pada kedua ujung. (b) Respons dievaluasi pada enam garis pengamatan transversal untuk defleksi permukaan w, regangan tarik dasar aspal ϵ_t, dan regangan tekan bagian atas tanah dasar $|\epsilon_z|$. Garis $y = 0{,}8000$ m ditambahkan berdasarkan hasil penyaringan transversal awal. **Sumber:** disusun penulis berdasarkan model penelitian

Tiga besaran respons dianalisis. Defleksi vertikal maksimum permukaan w dievaluasi pada $z = 0$. Regangan tarik utama horizontal maksimum ϵ_t dievaluasi pada dasar lapis aspal, yaitu $z = 0{,}200$ m dari sisi lapis aspal. Regangan tekan vertikal tanah dasar ϵ_z dievaluasi pada $z = 0{,}500$ m dari sisi tanah dasar dan dinyatakan berdasarkan besar nilai tekanannya. Kendaraan diesel dan kendaraan listrik diperbolehkan mempunyai posisi longitudinal dan transversal kritis yang berbeda. Dengan demikian, lokasi respons kritis merupakan keluaran analisis, bukan titik yang ditentukan terlebih dahulu. Pemeriksaan konvergensi pada seluruh rangkaian analisis menunjukkan bahwa perubahan respons maksimum antara langkah 0,02 dan 0,01 m adalah sekitar 0,141%, sedangkan perubahan maksimum lokasi ekstremum sebesar 0,010 m. Keduanya memenuhi batas penerimaan yang telah ditetapkan.

2.6. Perbandingan Respons Mekanistik

Untuk setiap respons j, perbandingan antara kendaraan listrik dan kendaraan diesel dinyatakan sebagaimana pada (9).

$$RR_j = \frac{R_{j,\mathrm{BEV}}}{R_{j,\mathrm{ICE}}} \tag{9}$$

Nilai $RR_j > 1$ menunjukkan bahwa respons kendaraan listrik lebih besar, sedangkan nilai $RR_j < 1$ menunjukkan bahwa respons kendaraan diesel lebih besar.

Batas kesetaraan praktis dalam membandingkan respons mekanistik ditetapkan sebagai $\tau_{\mathrm{ord}} = \max(0{,}005,\ 2e_{\mathrm{num}})$, dengan e_{num} adalah perbedaan relatif konvergensi spasial terbesar pada pasangan

respons kendaraan diesel dan kendaraan listrik. Dalam seluruh rangkaian analisis nilai $2e_{\mathrm{num}}$ lebih kecil daripada 0,005, sehingga batas kesetaraan praktis sebesar 0,5% menjadi nilai yang digunakan. Dengan demikian, respons diklasifikasikan sebagai praktis setara apabila $0{,}995 \leq RR_j \leq 1{,}005$. Klasifikasi dilakukan secara terpisah untuk defleksi permukaan, regangan tarik dasar aspal, dan regangan tekan tanah dasar. Tidak dibentuk satu indeks gabungan yang mencampurkan ketiga respons tersebut.

2.7. Analisis Invers untuk Akomodasi Struktur Ekuivalen

Analisis invers menggunakan dua respons regangan sebagai kriteria kesetaraan struktur, yaitu regangan tarik dasar aspal dan regangan tekan pada bagian atas tanah dasar. Defleksi permukaan dipertahankan sebagai respons diagnostik dan tidak digunakan untuk menentukan ketebalan pengendali. Untuk respons j, kondisi acuan ditetapkan dari respons kendaraan diesel pada ketebalan awal aspal $h_0 =$ 0,200 m, $T_j = R_{j,\mathrm{ICE}}(h_0)$. Ketebalan lapis aspal pada struktur yang menerima pembebanan BEV kemudian ditambah sebesar Δh hingga memenuhi $R_{j,\mathrm{BEV}}(h_0 + \Delta h) \leq T_j(1 + \tau_R)$, dengan toleransi respons invers $\tau_R = 0{,}001$.

Tambahan ketebalan khusus untuk respons j didefinisikan sebagai (10):

$$\Delta h_j^* = \min\{\Delta h \geq 0 : R_{j,\mathrm{BEV}}(h_0 + \Delta h) \leq T_j(1{,}001)\}. \quad (10)$$

Jika kondisi tersebut telah terpenuhi pada ketebalan awal, maka $\Delta h_j^* = 0$.

Pencarian dilakukan secara terpisah untuk $\epsilon_t$dan $|\epsilon_z|$ pada rentang tambahan ketebalan $0 \leq \Delta h \leq$ 0,200 m. Sebelum pencarian solusi dilakukan, perubahan respons terhadap pertambahan ketebalan diperiksa pada 11 nilai ketebalan di dalam rentang tersebut untuk memastikan kecenderungannya monoton. Setelah selang yang memuat solusi diperoleh, nilai Δh_j^* ditentukan dengan metode bagi dua hingga lebar selang akhir tidak melebihi 0,1 mm. Jika pada ketebalan awal kriteria kesetaraan telah terpenuhi, $\Delta h_j^* = 0$. Kasus yang tidak menghasilkan selang solusi, tidak memenuhi sifat monoton, atau tidak memenuhi kriteria respons dicatat sebagai tidak berhasil.

Tambahan ketebalan pengendali ditentukan dengan (11).

$$\Delta h^* = \max(\Delta h_t^*, \Delta h_z^*). \quad (11)$$

Struktur dengan ketebalan $h_0 + \Delta h^*$ kemudian dihitung kembali pada seluruh lintasan kendaraan dan keenam garis transversal. Solusi dinyatakan memenuhi kriteria apabila kedua respons regangan tetap berada dalam batas kesetaraan pada seluruh daerah pengamatan. Dengan demikian, nilai Δh^* yang dilaporkan telah melalui pemeriksaan ulang menggunakan model mekanistik dan tata cara evaluasi lintasan yang sama.

Nilai Δh^*merupakan tambahan ketebalan lapis aspal ekuivalen secara mekanistik pada struktur acuan yang dianalisis. Besaran tersebut bukan ketebalan hamparan konstruksi, prediksi umur layanan, kesetaraan kerusakan kumulatif, atau rekomendasi penebalan jalan secara nasional. Analisis juga tidak mencakup repetisi lalu lintas, fungsi transfer kelelahan atau deformasi permanen, perilaku material nonlinier, ketergantungan waktu, maupun interaksi dinamik kendaraan–perkerasan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Respons Mekanistik Kendaraan Diesel dan Listrik

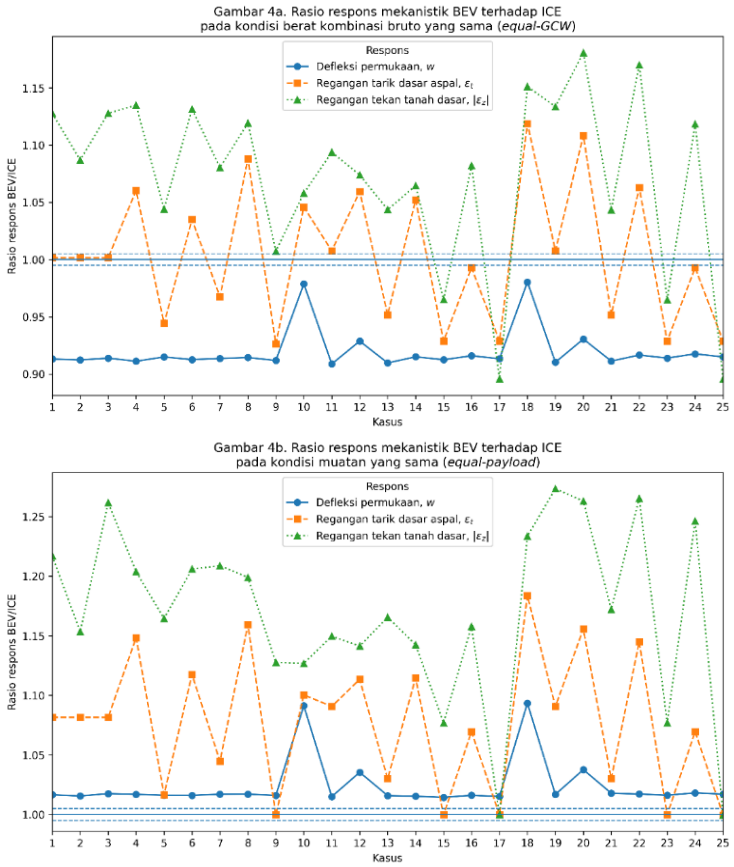
Pada kondisi berat kombinasi bruto yang sama (*equal*-GCW), kendaraan diesel dan kendaraan listrik masing-masing mempunyai berat kombinasi 40,00 ton. Meskipun berat total kedua kendaraan sama, ketiga respons perkerasan tidak menunjukkan pola perbandingan ICE–BEV yang seragam. Defleksi permukaan akibat BEV lebih kecil pada seluruh 25 kasus, dengan rasio BEV/ICE sebesar 0,9089–0,9804. Regangan tarik dasar aspal mempunyai rasio 0,9263–1,1189: sebanyak 11 kasus menghasilkan respons BEV lebih besar, tiga kasus praktis setara, dan 11 kasus menghasilkan respons ICE lebih besar. Pada regangan tekan bagian atas tanah dasar, rasio berada pada 0,8958–1,1806, dengan 21 kasus menghasilkan respons BEV lebih besar dan empat kasus menghasilkan respons ICE lebih besar. Sebaran ketiga respons

tersebut diperlihatkan pada Gambar 4a, sedangkan rentang dan jumlah kasus menurut klasifikasi respons dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan pengurutan respons mekanistik BEV terhadap ICE

Kondisi	Respons	Rentang rasio BEV/ICE	BEV lebih besar	Setara	ICE lebih besar
GCW sama	Defleksi permukaan, w	0,9089–0,9804	0	0	25
GCW sama	Regangan tarik dasar aspal, ϵ_t	0,9263–1,1189	11	3	11
GCW sama	Regangan tekan atas tanah dasar, ϵ_z	0,8958–1,1806	21	0	4
Muatan sama	Defleksi permukaan, w	1,0144–1,0935	25	0	0
Muatan sama	Regangan tarik dasar aspal, ϵ_t	0,9997–1,1838	20	5	0
Muatan sama	Regangan tekan atas tanah dasar, ϵ_z	0,9997–1,2733	23	2	0

Sumber: Hasil analisis penulis



Gambar 4. Rasio respons mekanistik BEV terhadap ICE pada 25 kasus kombinasi parameter pembebanan untuk **(a)** kondisi berat kombinasi bruto yang sama (*equal*-GCW) dan **(b)** kondisi muatan yang sama *(equal-payload*). Rasio 1,000 menunjukkan respons yang sama antara kedua kendaraan, sedangkan rentang 0,995–1,005 menunjukkan kesetaraan praktis. Nomor kasus merepresentasikan kombinasi parameter pembebanan dan tidak menunjukkan lokasi pada struktur perkerasan. **Sumber**: Hasil analisis penulis.

Dalam konteks Indonesia, pentingnya distribusi beban sumbu bukan persoalan yang hanya bersifat teoritis. Penelitian menggunakan data *weigh-in-motion* pada beberapa ruas jalan di Jawa Timur menemukan bahwa distribusi beban sumbu aktual berbeda dari asumsi acuan dan perbedaan tersebut memengaruhi nilai beban sumbu ekuivalen [21]. Ditunjukkan juga bahwa berdasarkan data WIM Indonesia, distribusi beban sumbu dan kondisi beban berlebih dapat secara nyata mengurangi umur rencana perkerasan lentur [19]. Meski tidak membahas kendaraan listrik, hasil tersebut memperkuat alasan bahwa perubahan cara beban total didistribusikan pada sumbu merupakan persoalan yang relevan bagi perkerasan Indonesia.

Pada kendaraan listrik berat, dapat ditunjukkan bahwa lokasi dan konfigurasi baterai dapat mengubah distribusi beban sumbu dan gaya kontak ban–perkerasan [11]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa konsekuensi kendaraan berat listrik dipengaruhi oleh distribusi beban, konfigurasi kendaraan, dan struktur perkerasan [14][15][28][29]. Hasil penelitian ini menambahkan satu kondisi pembanding yang penting:

perbedaan respons tetap muncul ketika berat kombinasi total ICE dan BEV dibuat sama. Dengan demikian, hasil pada Gambar 4a menunjukkan bahwa efek elektrifikasi tidak dapat diterangkan hanya melalui pertambahan berat total; arsitektur distribusi pembebanan sendiri sudah dapat mengubah respons mekanistik.

Pada kondisi muatan yang sama (*equal-payload*), kedua kendaraan membawa muatan 22,61 ton. Berat kombinasi kendaraan diesel menjadi 36,60 ton, sedangkan kendaraan listrik tetap 40,00 ton. Konfigurasi pembebanan BEV pada setiap kasus tidak berubah dari kondisi *equal*-GCW; perubahan rasio antar-kondisi terutama berasal dari berubahnya kendaraan diesel sebagai kondisi acuan. Oleh karena itu, kondisi ini merepresentasikan pengaruh gabungan arsitektur pembebanan dan tambahan massa tara BEV, bukan pengaruh massa yang terisolasi.

Pada kondisi tersebut, defleksi permukaan BEV lebih besar pada seluruh 25 kasus, dengan rasio 1,0144–1,0935. Regangan tarik dasar aspal mempunyai rasio 0,9997–1,1838, dengan 20 kasus BEV lebih besar dan lima kasus praktis setara. Regangan tekan tanah dasar mempunyai rasio 0,9997–1,2733, dengan 23 kasus BEV lebih besar dan dua kasus praktis setara. Pola tersebut terlihat pada Gambar 4b dan diringkas bersama hasil *equal*-GCW dalam Tabel 3.

Temuan ini konsisten dengan [9] yang menunjukkan bahwa peningkatan massa kendaraan listrik dapat memperbesar respons dan potensi kerusakan perkerasan. Penelitian [10] memperluas konsekuensi tersebut hingga umur layanan, lingkungan, dan biaya siklus hidup. Perbedaan utama penelitian ini adalah bahwa tambahan massa tidak langsung diterjemahkan menjadi kerusakan atau umur layanan, melainkan terlebih dahulu ditelusuri melalui perubahan distribusi beban dan respons struktur.

3.2. Akomodasi Struktur Perkerasan dan Pengaruh Variasi Parameter Pembebanan

Perbedaan respons tersebut selanjutnya diterjemahkan menjadi tambahan ketebalan aspal ekuivalen secara mekanistik, Δh^*. Pada kondisi berat kombinasi bruto yang sama, 21 dari 25 kasus memerlukan $\Delta h^* > 0$, sedangkan empat kasus telah memenuhi kedua kriteria regangan pada ketebalan awal. Nilai seluruh kasus berada pada rentang 0–40,0 mm dengan median 18,5 mm. Pada kondisi muatan yang sama, 23 dari 25 kasus memerlukan tambahan ketebalan positif, dengan rentang 0–59,5 mm dan median 36,6 mm. Statistik utama kedua kondisi dirangkum pada Tabel 4.

Gambar 5 memperlihatkan hasil tersebut secara berpasangan untuk setiap kombinasi parameter. Untuk kasus yang sama, Δh^* pada kondisi muatan sama tidak pernah lebih kecil daripada kondisi berat kombinasi bruto sama. Pada 23 pasangan nilainya lebih besar, sedangkan pada dua pasangan kedua kondisi sama-sama menghasilkan $\Delta h^* = 0$. Median kenaikan berpasangan sebesar 17,3 mm dan kenaikan terbesar 29,6 mm. Dengan demikian, Gambar 5 menunjukkan pola antar-kasus, sedangkan Tabel 4 memberikan ringkasan statistiknya.

Tabel 4. Ringkasan kebutuhan tambahan ketebalan lapis aspal ekuivalen

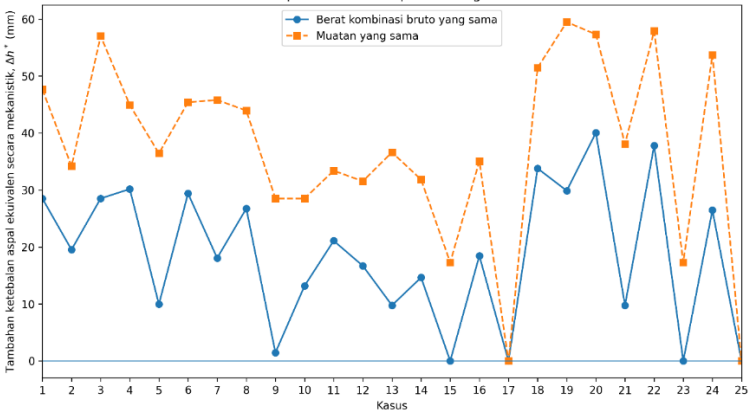
Indikator	*Equal*-GCW	*Equal-payload*
Jumlah kombinasi parameter pembebanan	25	25
Memerlukan tambahan ketebalan	21	23
Tidak memerlukan tambahan ketebalan	4	2
Minimum positif (mm)	1,5	17,3
Median seluruh kombinasi parameter pembebanan (mm)	18,5	36,6
Maksimum (mm)	40,0	59,5
Median terhadap tebal aspal awal 200 mm	9,2%	18,3%
Respons pengendali pada seluruh kasus positif	Regangan tekan tanah dasar	Regangan tekan tanah dasar
Kasus positif yang dikendalikan tanah dasar	21/21	23/23
Hasil verifikasi lintasan penuh	Seluruh kasus memenuhi	Seluruh kasus memenuhi

Sumber: Hasil analisis penulis

Dalam konteks literatur dalam negeri, [20] menggunakan pendekatan mekanistik-empirik untuk menilai dampak kendaraan berlebih pada perkerasan lentur di Indonesia dan menunjukkan bahwa peningkatan beban kendaraan dapat ditanggapi secara struktural melalui perubahan ketebalan dan karakteristik lapis aspal. Namun hasil tersebut tidak dapat dibandingkan langsung secara numerik dengan

Δh^* dalam penelitian ini karena masalah, struktur, beban, dan definisi kriterianya berbeda. Meski demikian, keduanya mendukung gagasan yang sama bahwa konsekuensi perubahan pembebanan dapat diterjemahkan ke dalam kebutuhan penyesuaian struktur, bukan hanya dinyatakan sebagai perubahan indeks kerusakan.

Gambar 5. Tambahan ketebalan aspal ekuivalen secara mekanistik pada dua kondisi pembandingan



Gambar 5. Tambahan ketebalan lapis aspal ekuivalen pada 25 kombinasi parameter pembebanan untuk kondisi GCW sama dan muatan sama. Setiap pasangan mewakili kombinasi yang sama. Nilai nol menunjukkan bahwa struktur awal telah memenuhi kedua kriteria kesetaraan mekanistik.
Sumber: Hasil analisis penulis.

Variasi antar-kasus pada Gambar 5 juga menunjukkan bahwa satu konfigurasi nominal kendaraan tidak cukup untuk mewakili seluruh rentang pembebanan. Kontras satu faktor di sekitar kombinasi pusat menunjukkan pola yang tidak selalu monoton. Pada kondisi *equal*-GCW, misalnya, perubahan β menghasilkan Δh^* sebesar 26,8; 28,5; dan 1,5 mm, sedangkan perubahan d_K menghasilkan 29,4; 28,5; dan 18,1 mm. Pada kondisi *equal-payload*, perubahan α menghasilkan 34,2; 47,7; dan 57,0 mm, sedangkan perubahan d_K menghasilkan 45,4; 47,7; dan 45,8 mm. Pola tersebut bersifat deskriptif dan tidak digunakan sebagai pemeringkatan sensitivitas global.

3.3. Interpretasi Mekanistik dan Kriteria Pengendali

Kontras antara tiga kurva respons pada Gambar 4a merupakan salah satu hasil utama penelitian ini. Pada berat kombinasi bruto yang sama, defleksi permukaan BEV lebih kecil pada seluruh kasus, sementara regangan tekan tanah dasar lebih besar pada sebagian besar kasus. Regangan tarik dasar aspal berada di antara kedua pola tersebut. Dengan demikian, defleksi permukaan yang lebih kecil tidak dapat langsung diartikan sebagai tuntutan struktur yang lebih ringan.

Pada kombinasi pusat, redistribusi tersebut dapat dilihat langsung dari reaksi sumbu. Pada equal-GCW, beban berpindah dari kelompok sumbu trailer menuju sistem sumbu traktor pada BEV. Karena beban dipertahankan sampai tingkat ban dan kendaraan dievaluasi sepanjang lintasan penuh, lokasi puncak pada permukaan tidak harus sama dengan lokasi puncak pada dasar aspal atau bagian atas tanah dasar. Pada kedalaman yang lebih besar, medan respons dari beberapa ban dan sumbu menyebar dan saling bertumpang tindih. Inilah sebabnya urutan ICE–BEV dapat berubah menurut jenis respons dan kedalaman.

Temuan ini mempunyai kaitan langsung dengan literatur Indonesia mengenai beban sumbu aktual. Studi WIM di Indonesia menunjukkan bahwa representasi beban melalui distribusi sumbu yang lebih rinci dapat menghasilkan implikasi desain yang berbeda dibanding asumsi beban standar. Penelitian ini membawa logika tersebut satu langkah lebih rinci: bukan hanya distribusi antar-sumbu, tetapi juga geometri tingkat ban, lintasan penuh, dan kedalaman respons dipertahankan. Karena itu, agregasi dini menjadi berat kotor atau satu nilai beban ekuivalen berpotensi menyembunyikan perbedaan urutan respons yang terlihat pada Gambar 4.

Analisis invers menunjukkan bahwa regangan tekan bagian atas tanah dasar menjadi kriteria pengendali pada seluruh 44 kasus dengan $\Delta h^* > 0$. Pencarian berdasarkan regangan tarik dasar aspal tetap menghasilkan kandidat ketebalan positif pada sejumlah kasus, tetapi semuanya lebih kecil daripada

nilai yang dikendalikan oleh tanah dasar. Temuan tersebut menjelaskan mengapa pola tambahan ketebalan pada Gambar 5 lebih erat mengikuti perubahan respons tanah dasar daripada defleksi permukaan. Penting untuk membatasi interpretasi ini. Regangan tanah dasar menjadi kriteria pengendali kesetaraan mekanistik, bukan bukti bahwa deformasi permanen tanah dasar pasti menjadi kerusakan dominan di lapangan. Untuk berpindah dari respons ke kerusakan dibutuhkan fungsi transfer, repetisi beban, kondisi material, serta kalibrasi terhadap kinerja perkerasan.

Seluruh 50 solusi invers telah diperiksa kembali terhadap lintasan penuh. Kedua kriteria regangan terpenuhi pada keenam garis pengamatan dan seluruh posisi longitudinal. Pemeriksaan ulang juga menemukan pergeseran lokasi maksimum regangan tarik pada sebagian kasus, tetapi tidak mengubah nilai Δh^* yang diterima. Dengan demikian, hasil pada Gambar 5 bukan hasil pencocokan pada satu titik respons tertentu, melainkan telah diuji kembali terhadap seluruh daerah pengamatan yang ditetapkan.

3.4. Relevansi terhadap Kesiapan Infrastruktur dan Batas Keberlakuan

Konteks Indonesia memperkuat relevansi penggunaan beban aktual dan distribusi sumbu. MDP 2024 merupakan manual teknis yang berlaku dan menggantikan edisi sebelumnya; dokumen tersebut menempatkan data lalu lintas dan beban kendaraan sebagai bagian penting dalam desain perkerasan. Dalam MDP 2024, data beban gandar dapat bersumber dari jembatan timbang atau WIM dan desain diarahkan untuk mengakomodasi beban kendaraan aktual. Dengan demikian, penelusuran dampak kendaraan berat listrik sampai tingkat distribusi sumbu dan respons mekanistik mempunyai hubungan yang jelas dengan kebutuhan data dan pendekatan desain perkerasan di Indonesia.

Dari sisi kendaraan, pengujian tipe fisik kendaraan bermotor dengan penggerak listrik diatur melalui Permenhub PM 44 Tahun 2020 yang kemudian diubah dengan PM 86 Tahun 2020 [3][30]. Pengawasan muatan angkutan barang di jalan juga mengatur pemenuhan tata cara pemuatan, daya angkut, dimensi kendaraan, dan kelas jalan melalui PM 18 Tahun 2021 [31]. Penelitian ini tidak mengusulkan perubahan terhadap ketentuan tersebut; hasilnya menunjukkan bahwa informasi kendaraan dan distribusi beban sumbu dapat diteruskan lebih jauh menjadi informasi mengenai respons struktur perkerasan.

Di sinilah posisi penelitian ini berbeda dari studi Indonesia mengenai *overloading*. Studi-studi tersebut menunjukkan pentingnya beban aktual dan distribusi sumbu terhadap kinerja perkerasan, sedangkan penelitian ini membahas perubahan arsitektur pembebanan akibat elektrifikasi pada kondisi yang dikendalikan. Literatur Indonesia memberi konteks lokal bahwa masalah distribusi beban memang material bagi perkerasan; literatur kendaraan listrik internasional memberi mekanisme spesifik elektrifikasinya; dan penelitian ini menghubungkan keduanya melalui analisis tingkat ban dan akomodasi struktur.

Batas keberlakuannya tetap harus ditegaskan. Nilai Δh^* diperoleh dari satu struktur perkerasan acuan, satu pasangan traktor–semitrailer, tekanan kontak terkendali, model elastik linear, serta satu lintasan kendaraan tanpa akumulasi repetisi. Analisis belum memasukkan spektrum lalu lintas, penetrasi armada listrik, variasi kondisi perkerasan eksisting, perilaku material terhadap waktu dan suhu, fungsi transfer kerusakan, maupun akumulasi kerusakan. Oleh karena itu, Δh^* merupakan ukuran kesetaraan respons mekanistik, bukan kesetaraan umur layanan dan bukan ketebalan konstruksi yang siap diterapkan pada ruas jalan tertentu.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa konsekuensi elektrifikasi traktor–semitrailer berat tidak dapat dijelaskan hanya oleh perubahan berat total. Pada equal-GCW, defleksi BEV lebih kecil pada seluruh kasus, sedangkan regangan tarik aspal dan regangan tekan tanah dasar dapat menunjukkan urutan ICE–BEV yang berbeda. Hal ini menegaskan pentingnya distribusi beban sumbu dan ban serta kedalaman respons.

Pada equal-GCW, 21 dari 25 kasus memerlukan $\Delta h^* > 0$, dengan nilai positif 1,5–40,0 mm dan median 18,5 mm. Pada equal-payload, 23 dari 25 kasus memerlukan 17,3–59,5 mm dengan median 36,6 mm. Median tersebut masing-masing setara dengan sekitar 9,2% dan 18,3% dari tebal aspal awal. Seluruh

44 kasus positif dikendalikan oleh regangan tekan tanah dasar dan seluruh 50 solusi invers memenuhi pemeriksaan ulang lintasan penuh.

Nilai Δh^* merupakan ukuran kesetaraan respons mekanistik pada satu struktur perkerasan acuan, bukan ketebalan konstruksi, prediksi umur layanan, atau rekomendasi penebalan ruas jalan tertentu. Penelitian selanjutnya perlu menghubungkan respons ini dengan spektrum dan repetisi lalu lintas, fungsi transfer kerusakan, keragaman struktur perkerasan, kesetaraan umur layanan, dan alternatif intervensi lapangan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan dukungan fasilitas perangkat komputasi mekanistik struktur perkerasan jalan.

Deklarasi

Kontribusi Penulis

Berlian Kushari: Penulisan – Telaah & Penyuntingan, Konseptualisasi, Analisis Formal, Perangkat Lunak, Investigasi, Visualisasi. **Aisyah Nur Jannah**: Penulisan – Draf Awal, Investigasi, Validasi, Visualisasi. **Zainal Arifin**: Penulisan – Telaah & Penyuntingan, Kurasi Data, Analisis Formal, Supervisi.

Pernyataan Pendanaan

Penelitian ini tidak menerima pendanaan khusus dari lembaga pendanaan di sektor publik, komersial, maupun nirlaba.

Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang diketahui yang dapat dianggap memengaruhi penelitian yang dilaporkan dalam artikel ini.

Penggunaan Kecerdasan Artifisial atau Teknologi Berbantuan Kecerdasan Artifisial

Dalam proses penyusunan karya ini, penulis menggunakan ChatGPT/OpenAI untuk penyusunan teks dan penghalusan bahasa tulis. Setelah menggunakan alat/layanan tersebut, penulis meninjau dan menyunting kembali konten yang dihasilkan sesuai kebutuhan serta bertanggung jawab penuh atas seluruh isi publikasi ini.

Daftar Pustaka

[1] Republik Indonesia, *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (Battery Electric Vehicle) untuk Transportasi Jalan*. Jakarta, Indonesia, 2019.

[2] Republik Indonesia, *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2023 tentang Perubahan atas Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (Battery Electric Vehicle) untuk Transportasi Jalan*. Jakarta, Indonesia, 2023.

[3] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, *PM 44 Tahun 2020 tentang Pengujian Tipe Fisik Kendaraan Bermotor dengan Motor Penggerak Menggunakan Motor Listrik*. Jakarta, Indonesia, 2020.

[4] Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, *Manual Desain Perkerasan Jalan No. 03/M/BM/2024*. Republik Indonesia, 2024.

[5] A. T. Leonard, F. Salek, A. Azizi, and S. Resalati, "Electrification of a Class 8 Heavy-Duty Truck Considering Battery Pack Sizing and Cargo Capacity," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 19, p. 9683, Sep. 2022, doi: 10.3390/app12199683.

[6] K. Moreno Sader, S. Biswas, R. Jones, M. Mennig, R. Rezaei, and W. H. Green, "Battery electric long-haul trucking with overnight charging in the United States: A comprehensive costing and emissions analysis," *Appl. Energy*, vol. 384, p. 125443, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.125443.

[7] A. Engholm, A. Allström, and M. Akbarian, "Exploring cost performance tradeoffs and uncertainties for electric- and autonomous electric trucks using computational experiments," *European Transport Research Review*, vol. 16, no. 1, p. 41, Jul. 2024, doi: 10.1186/s12544-024-00662-0.

[8] T. Mattinzioli, A. A. Butt, and J. Harvey, "Literature review on pavements and electric vehicle interaction: A research roadmap," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 122, p. 103886, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.trd.2023.103886.

[9] M. Y. Fares, A. Albdour, and M. Lanotte, "Evaluation of potential electric vehicles load-induced damage on flexible pavements," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 136, p. 104475, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.trd.2024.104475.

[10] Y. Chen and J. Xue, "Sustainable urban freight: pavement, environmental, and economic impacts of heavy-duty electric trucks," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 149, p. 105033, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.trd.2025.105033.

[11] J. Hernandez, A. Jayme, J. J. Cardenas Huaman, and I. L. Al-Qadi, "Effect of Heavy-Duty Electric Vehicles on Tire–Pavement Contact Forces," *J. Eng. Mech.*, vol. 151, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1061/JENMDT.EMENG-7835.

[12] K. Gkyrtis, "The Impact of Weight Distribution in Heavy Battery Electric Vehicles on Pavement Performance: A Preliminary Study," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 9, p. 520, Sep. 2025, doi: 10.3390/wevj16090520.
[13] K. Shen and H. Wang, "Emerging challenges of electric truck and truck platooning on flexible pavement responses," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 26, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1080/10298436.2025.2601712.
[14] A. Jayme, J. J. Cardenas Huaman, J. Hernandez, and I. L. Al-Qadi, "Relative Flexible Pavement Distress Caused by Heavy-Duty Electric Trucks," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2680, no. 9, pp. 268–287, Sep. 2026, doi: 10.1177/03611981251404350.
[15] J. J. Cardenas, A. Jayme, J. Hernandez, and I. L. Al-Qadi, "Quantification of Truck Electrification Damage to Flexible Pavements," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Aug. 2026, doi: 10.1177/03611981261473504.
[16] Q. Zhou, A. Ramakrishnan, M. Fakhreddine, E. Okte, and I. L. Al-Qadi, "Impacts of heavy-duty electric trucks on flexible pavements," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 25, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1080/10298436.2024.2361087.
[17] P. Chaudhary and S. Saride, "Impact of Modified Axle Load Factors of Heavy-Duty Electric Trucks on Existing Highways," *Transportation Infrastructure Geotechnology*, vol. 13, no. 5, p. 171, Jun. 2026, doi: 10.1007/s40515-026-00938-z.
[18] M. Hafeez, I. L. Al-Qadi, J. J. Cardenas, A. Jayme, and J. Hernandez, "Electric Truck Adoption: Infrastructure Energy Burden and Economic Impacts," *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, vol. 152, no. 4, Dec. 2026, doi: 10.1061/JPEODX.PVENG-2138.
[19] J. Jihanny, B. S. Subagio, S.-H. Yang, R. H. Karsaman, and E. S. Hariyadi, "The overload impact on design life of flexible pavement," *International Journal of GEOMATE*, vol. 20, no. 78, Feb. 2021, doi: 10.21660/2021.78.j2020.
[20] M. Miftahulkhair, M. Z. Arifin, and F. R. Sutikno, "Revealing the impact of losses on flexible pavement due to vehicle overloading," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 1 (128), pp. 55–63, Apr. 2024, doi: 10.15587/1729-4061.2024.299653.
[21] R. Melinda and C. A. Prastyanto, "Evaluasi Nilai Distribusi Beban As Kendaraan Berdasarkan Data Aktual di Lapangan untuk Kendaraan dengan Konfigurasi Sumbu 1.2 H dan 1.2+2.2," *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, vol. 17, no. 1, p. 34, Mar. 2019, doi: 10.12962/j2579-891X.v17i1.4885.
[22] SANY Group, "SANY e263: Full-Electric Semi-Trailer Tractor, Model SYGM636C (LHD), product technical data sheet," Changsha, 2026. Accessed: Sep. 17, 2026. [Online]. Available: https://www.sany-trucks.com/documents/20127/31635541/SANY_e-Truck_e263_SY0179_EN.pdf/c976df85-75ff-eab1-fc85-430b95f92a15?t=1760333174115
[23] SANY Group, "UAE 4×2: Diesel heavy tractor truck UAE 4×2 models, product technical data," Changsha, 2026. Accessed: Sep. 17, 2026. [Online]. Available: https://www.sanyglobal.com/product/truck/semi-trailer_tractor/139/1436
[24] Schmitz Cargobull AG, "S.CS UNIVERSAL–KP+: Technical Data, product technical data sheet," Horstmar, Germany, 2026. Accessed: Sep. 17, 2026. [Online]. Available: https://www.cargobull.com/au/-/media/project/scb-sites/scb-global-site/media-center-en/brief-information-scs-universal--kp.pdf
[25] D. M. Burmister, "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. I," *J. Appl. Phys.*, vol. 16, no. 2, pp. 89–94, Feb. 1945, doi: 10.1063/1.1707558.
[26] D. M. Burmister, "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. II," *J. Appl. Phys.*, vol. 16, no. 3, pp. 126–127, Mar. 1945, doi: 10.1063/1.1707562.
[27] Y. H. Huang, *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.
[28] J. J. Cardenas, A. Jayme, J. Hernandez, and I. L. Al-Qadi, "Flexible Pavement Damage Quantification for Heavy-Duty Electric Trucks," in *Airfield and Highway Pavements 2025*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, Jun. 2025, pp. 646–656. doi: 10.1061/9780784486214.059.
[29] A. Jayme, J. Hernandez, I. Al-Qadi, J. Cardenas, M. Hafeez, and W. Villamil, "Impact of Heavy Commercial Electric Vehicles on Flexible Pavements," Rantoul, May 2025. doi: 10.36501/0197-9191/25-003.
[30] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 86 Tahun 2020 tentang Perubahan atas PM 44 Tahun 2020 tentang Pengujian Tipe Fisik Kendaraan Bermotor dengan Motor Penggerak Menggunakan Motor Listrik*. Indonesia, 2020.
[31] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 18 Tahun 2021 tentang Pengawasan Muatan Angkutan Barang dan Penyelenggaraan Penimbangan Kendaraan Bermotor di Jalan," Jakarta, Indonesia, 2021.