

Perkembangan Dalam Kelaikan Tabrak Superstruktur Bus: Dari Kepatuhan Regulasi Hingga Perlindungan Penumpang Holistik Pada Bus Konvensional Dan Listrik

Naufal Aflah Hibatullah^{1*}, Mochamad Iqbal Rokhim¹, Muhammad Khoirur Rijal², Slamet Raharjo¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Program Studi Teknik Perancangan dan Konstruksi Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Program Studi Teknik Aeronautika, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

Email: ^{1*}naufal.aflah@polban.ac.id, ¹mochamad.rokhim@polban.ac.id, ²muhammad.rijal@polban.ac.id,

¹slamet.raharjo@polban.ac.id

(* : coresponding author)

Abstrak – Kecelakaan bus masih berkontribusi pada tingkat fatalitas yang cukup signifikan dalam statistik transportasi global, terutama di negara berkembang yang dipengaruhi oleh faktor manusia dan kondisi infrastruktur. Sintesis komprehensif mengenai teknologi kelaikan tabrak (*crashworthiness*) superstruktur bus disajikan dengan menelusuri evolusi dari kepatuhan regulasi dasar menuju tantangan adaptasi teknologi masa depan. Sementara standar UN ECE R66 telah menyediakan kerangka kerja yang mapan untuk perlindungan guling (*rollover*), analisis literatur mengungkapkan kesenjangan signifikan dalam standar tabrakan depan, yang memaksa adopsi regulasi truk (UN ECE R29) yang seringkali tidak kompatibel dengan geometri wajah datar bus. Pembahasan difokuskan pada temuan terkini mengenai metodologi pengujian virtual tervalidasi, strategi penguatan struktur inovatif seperti integrasi kursi-ke-pilar, serta peran krusial sistem penahan penumpang dalam memitigasi cedera sekunder. Lebih jauh, transisi menuju bus listrik teridentifikasi membawa tantangan baru terkait perlindungan baterai bertegangan tinggi dan karakteristik kegagalan getas pada material komposit ringan. Disimpulkan bahwa paradigma keselamatan masa depan harus berevolusi dari hanya sekedar mempertahankan ruang selamat menjadi pendekatan holistik yang mengintegrasikan optimasi struktur, biomekanika penumpang, dan proteksi sistem penyimpanan energi.

Kata Kunci: Kelaikan Tabrak Bus, Desain Superstruktur, Pengujian Virtual, Keselamatan Penumpang, Struktur Kendaraan Listrik.

Abstract—Bus accidents continue to contribute significantly to global transportation fatality statistics, particularly in developing countries where human factors and infrastructure conditions play a major role. A comprehensive synthesis of bus superstructure crashworthiness technologies is presented by tracing their evolution from basic regulatory compliance toward the challenges of future technological adaptation. While the UN ECE R66 standard has established a well-defined framework for rollover protection, a review of the literature reveals a substantial gap in frontal impact standards, leading to the adoption of truck regulations (UN ECE R29) that are often incompatible with the flat-front geometry of buses. The discussion focuses on recent findings related to validated virtual testing methodologies, innovative structural reinforcement strategies such as seat-to-pillar integration, and the critical role of occupant restraint systems in mitigating secondary injuries. Furthermore, the transition toward electric buses is identified as introducing new challenges associated with high-voltage battery protection and the brittle failure characteristics of lightweight composite materials. It is concluded that future safety paradigms must evolve beyond merely preserving occupant survival space toward a holistic approach that integrates structural optimization, occupant biomechanics, and energy storage system protection.

Keywords: Bus Crashworthiness, Superstructure Design, Virtual Testing Methods, Occupant Safety, Electric Bus Structures

1. PENDAHULUAN

Transportasi umum berbasis bus memegang peranan vital dalam mobilitas global, khususnya di negara-negara berkembang. Meskipun secara umum dikategorikan sebagai moda transportasi yang relatif aman, insiden kecelakaan yang melibatkan kendaraan berat seringkali bersifat katastrofik karena melibatkan jumlah korban massal dan momentum kendaraan yang relatif besar. Meskipun regulasi keselamatan terus berkembang, berdasarkan data terbaru dari Dewan Keselamatan Transportasi Eropa menyoroti bahwa tingkat fatalitas pada kecelakaan kendaraan berat (HGV dan Bus) masih menunjukkan angka yang tidak proporsional dibandingkan volume

kendaraannya, sehingga mendesak perlunya evaluasi ulang terhadap standar kelaikan tabrak (*crashworthiness*) yang ada saat ini (Nævestad et al., 2025).

Urgensi peningkatan keselamatan bus menjadi semakin kritis ketika ditinjau dalam konteks operasional yang spesifik, seperti di Indonesia. Investigasi mendalam terhadap kecelakaan bus antarkota dan pariwisata pada rute padat, seperti koridor Jakarta-Solo, menunjukkan bahwa faktor kelelahan pengemudi dan tekanan operasional merupakan penyebab utama insiden fatal (Kusumawati & Widyaningsih, 2023; Syahliantina et al., 2025). Lebih lanjut, analisis perilaku pengemudi pada moda Bus Rapid Transit (BRT) mengindikasikan bahwa pelanggaran keselamatan seringkali tidak terelakkan akibat faktor sistemik dan lingkungan kerja (Safitri et al., 2020). Mengingat sulitnya mengeliminasi faktor kesalahan manusia (*human error*) sepenuhnya, paradigma keselamatan modern kini bergeser pada penguatan keselamatan pasif seperti struktur kendaraan harus didesain mampu menjamin kelangsungan hidup penumpang ketika kecelakaan terjadi.

Dalam ranah rekayasa struktur, skenario kecelakaan guling (*rollover*) telah lama menjadi fokus utama regulasi internasional melalui standar UN ECE R66, yang mewajibkan superstruktur bus memiliki kekakuan cukup untuk mempertahankan ruang selamat (*residual space*). Namun, evaluasi teknis pada bus konvensional di Indonesia menunjukkan bahwa desain struktur yang ada seringkali belum memadai dan memerlukan penguatan signifikan pada sambungan pilar guna memenuhi kriteria tersebut (Mihradi et al., 2022). Selain itu, terdapat kesenjangan regulasi yang nyata pada skenario tabrakan depan (*frontal impact*). Hingga saat ini, ketiadaan standar global khusus untuk uji tabrak depan bus penumpang memaksa adopsi standar kabin truk komersial berupa UN ECE R29, yang dinilai belum tentu merepresentasikan karakteristik deformasi wajah bus yang rata serta minim zona remuk (*crumple zone*) (Elhussieny et al., 2021; Lopes et al., 2022).

Kompleksitas desain *crashworthiness* kini semakin bertambah seiring transisi menuju elektrifikasi transportasi. Adopsi bus listrik membawa tantangan baru berupa penambahan massa baterai yang signifikan, yang secara fundamental mengubah titik berat kendaraan dan dinamika inersia saat terjadi tabrakan (Spirk & Kepka, 2015). Di sisi lain, tuntutan efisiensi energi mendorong penggunaan material ringan maju seperti komposit, yang memiliki karakteristik kegagalan material yang sangat berbeda dibandingkan baja, seperti risiko delaminasi getas yang dapat mengurangi kapasitas penyerapan energi jika tidak didesain dengan presisi (Jongpradist et al., 2022; Václavík et al., 2024).

Oleh karena itu, sintesis komprehensif dilakukan untuk menyajikan tinjauan mengenai perkembangan teknologi *crashworthiness* pada superstruktur bus. Tinjauan ini mencakup evaluasi metode pengujian virtual yang divalidasi secara ketat (Razali et al., 2025), strategi penguatan struktur untuk memenuhi standar guling dan tabrakan depan, serta analisis integrasi keselamatan penumpang yang memperhitungkan interaksi biomekanika antara struktur kursi dan tubuh manusia (Purohit et al., 2023; Seyedi & Jung, 2020). Diskusi diakhiri dengan perspektif masa depan mengenai adaptasi struktur bus listrik dan material hibrida dalam menghadapi standar keselamatan global yang semakin ketat.

2. REVIU KEMAJUAN RISET KELAIKAN TABRAK

2.1 Metodologi Pengujian Virtual dan Validasi Model

Dalam dekade terakhir, evaluasi keselamatan kendaraan telah mengalami transformasi fundamental, beralih dari ketergantungan penuh pada pengujian fisik yang bersifat destruktif (*full-scale destructive testing*) menuju adopsi simulasi berbasis *Computer-Aided Engineering* (CAE). Regulasi internasional, termasuk UN ECE R66, kini secara eksplisit mengakui validitas metode numerik seperti Analisis Elemen Hingga (FEA) sebagai instrumen sah untuk persetujuan dengan syarat model komputasi tersebut telah melalui proses validasi yang ketat terhadap data eksperimental. Pendekatan berbasis simulasi ini menawarkan fleksibilitas yang signifikan dalam mengeksplorasi parameter desain struktur tanpa beban biaya prototipe fisik yang berlebihan (Farahani et al., 2021).

2.1.1 Protokol Verifikasi dan Validasi

Agar hasil simulasi numerik dapat diterima sebagai pengganti uji fisik, integritas model harus diverifikasi melalui serangkaian protokol standar. Kerangka kerja verifikasi yang komprehensif untuk simulasi guling bus, sebagaimana diatur dalam UNECE R66, menekankan pentingnya analisis konvergensi *mesh* (*mesh convergence analysis*) sebelum simulasi utama dijalankan. Pemilihan densitas elemen yang tepat pada profil struktur utama, seperti *Square Hollow Section* (SHS), sangat krusial, yang mana penggunaan elemen yang terlalu kasar berpotensi menghasilkan fenomena kekakuan buatan (*artificial stiffness*), sementara elemen yang berlebihan akan meningkatkan biaya komputasi secara eksponensial tanpa peningkatan akurasi yang sepadan (Razali et al., 2025).

Selain konvergensi spasial, validitas model dinamik juga sangat bergantung pada keseimbangan energi (*energy balance*) selama proses tabrakan berlangsung. Indikator utama stabilitas numerik adalah rasio energi *hourglass* yang wajib dijaga di bawah ambang batas 5% dari total energi internal sistem guna memastikan bahwa respons struktur yang teramati adalah fenomena fisik murni (Razali et al., 2025). Untuk validasi tingkat lanjut, *Digital Image Correlation* (DIC) kini mulai diterapkan untuk memetakan medan regangan (*strain field*) secara *real-time* pada komponen yang mengalami deformasi plastis, memberikan tingkat kepercayaan yang jauh lebih tinggi dibandingkan pengukuran perpindahan titik tunggal konvensional (Lopes et al., 2023).

2.1.2 Explicit Solver dan Strategi Penyederhanaan Geometri

Mengingat tabrakan kendaraan adalah fenomena non-linier yang melibatkan deformasi besar dalam durasi sangat singkat (orde milidetik), penggunaan algoritma *explicit solver* seperti LS-DYNA atau PAM-CRASH menjadi standar industri yang tak terelakkan. Metode ini memiliki keunggulan dalam menangani kontak kompleks antar komponen yang saling bertumbukan serta perilaku material pasca-luluh (*post-yield behavior*) yang kritis untuk memprediksi penyerapan energi (Elhussieny et al., 2021; Purohit et al., 2023).

Meskipun demikian, simulasi pada model kendaraan utuh (*full-scale model*) seringkali menuntut sumber daya komputasi yang sangat besar. Sebagai strategi efisiensi, pendekatan *body section method* sering diadopsi dalam tahap awal pengembangan desain. Studi komparatif menunjukkan bahwa simulasi yang difokuskan pada segmen representatif bus (misalnya, potongan tiga bay pilar utama) mampu memprediksi pola pembentukan *plastic hinge* dan intrusi ruang selamat dengan akurasi yang memadai, asalkan kondisi batas dan distribusi massa ekuivalen diterapkan secara presisi (Mihradi et al., 2022). Sebaliknya, untuk kasus yang melibatkan material anisotropik seperti struktur komposit *sandwich* pada bus listrik, pemodelan detail diharuskan untuk menggunakan elemen *shell* berlapis (*layered shell*) atau solid elemen guna menangkap mode kegagalan spesifik seperti delaminasi antar lapisan yang tidak dapat diprediksi oleh model material isotropik sederhana (Jongpradist et al., 2022).

2.2 Ketahanan Tabrak Guling: Standar dan Strategi Penguatan Struktur

Kecelakaan guling (*rollover*) diakui secara luas sebagai salah satu skenario kecelakaan paling berbahaya bagi transportasi massal karena tingginya risiko keruntuhan struktur atap. Dalam kerangka regulasi global, standar UN ECE R66 menjadi acuan utama, yang menetapkan kriteria performa berbasis "Ruang Selamat" (*Residual Space*). Prinsip fundamental dari regulasi ini bukanlah mencegah deformasi sepenuhnya, melainkan menjamin bahwa superstruktur bus mampu menyerap energi dampak melalui deformasi plastis terkontrol tanpa mengintrusi ruang kelangsungan hidup penumpang selama proses terguling (Mihradi et al., 2022; Razali et al., 2025).

2.2.1 Evaluasi Integritas Superstruktur dan Titik Lemah Kritis

Analisis elemen hingga pada desain bus konvensional seringkali mengungkapkan bahwa pilar jendela samping (*side window pillars*) dan sambungan atap merupakan titik terlemah dalam struktur. Studi parametrik menggunakan model bus yang disederhanakan (*simplified bus model*) terbukti efektif untuk mengidentifikasi lokasi pembentukan plastic hinge tanpa beban komputasi berlebih. Pada konteks bus antarkota di Indonesia, evaluasi terhadap desain *baseline* seringkali menunjukkan kegagalan dalam memenuhi kriteria ruang selamat, di mana intrusi struktur ke dalam kabin terjadi secara signifikan akibat kekakuan lateral yang tidak memadai (Mihradi et al., 2022).

Untuk mengatasi defisiensi ini, strategi penguatan tidak bisa hanya mengandalkan penebalan material yang justru menambah bobot kendaraan. Penambahan pelat penguat (*gusset*) pada sambungan pilar-ke-atap dan pilar-ke-lantai telah terbukti meningkatkan kapasitas penyerapan energi spesifik. Namun, temuan krusial menunjukkan bahwa integrasi struktur kursi dengan pilar samping (*seat-to-pillar connection*) memberikan kontribusi penguatan yang jauh lebih signifikan dibandingkan hanya memodifikasi profil pilar itu sendiri. Sambungan ini menciptakan jalur beban (*load path*) tambahan yang mendistribusikan energi benturan ke struktur lantai yang lebih kaku, sehingga mengurangi momen tekuk yang diterima oleh pilar jendela (Guler et al., 2007; Mihradi et al., 2022).

2.2.2 Validasi Komponen dan Aplikasi pada Kendaraan Khusus

Sebelum dilakukan simulasi skala penuh, karakterisasi perilaku mekanik komponen struktural individu menjadi prasyarat mutlak. Pengujian tekuk tiga titik (*three-point bending test*) pada sampel profil *roll-bar* sering dilakukan untuk memvalidasi model material dan memprediksi respons pasca-luluh (*post-yield response*). Korelasi yang kuat antara uji komponen fisik dan simulasi numerik pada tahap ini sangat menentukan akurasi prediksi perilaku keruntuhan struktur total saat terjadi kecelakaan guling yang sebenarnya (Phadattare & Hujare, 2017).

Relevansi standar perlindungan guling ini juga meluas melampaui bus penumpang konvensional hingga ke kendaraan operasional khusus, seperti *man-hauler* yang digunakan di sektor pertambangan. Meskipun beroperasi di medan *off-road* dengan risiko guling yang lebih tinggi, prinsip perlindungan *Rollover Protective Structure* (ROPS) yang diterapkan tetap mengacu pada kemampuan struktur untuk menyerap energi potensial kendaraan tanpa keruntuhan total. Studi pada kendaraan *man-hauler* berkapasitas 22 kursi menunjukkan bahwa desain superstruktur yang terintegrasi dengan sasis truk (*chassis-mounted*) memiliki karakteristik kekakuan yang berbeda dengan desain *monocoque*, sehingga memerlukan pendekatan penguatan yang spesifik pada pilar utama untuk menjamin keselamatan pekerja tambang yang diangkut (Gozali et al., 2024).

2.2.3 Peran Elemen non-Struktural dan Massa Penumpang

Dalam analisis *crashworthiness* yang komprehensif, bus tidak dapat dipandang hanya sebagai kerangka kosong (*body-in-white*). Keberadaan komponen interior, khususnya kursi penumpang, memberikan efek pengaku (*stiffening effect*) pada struktur bodi secara keseluruhan. Namun, hal ini juga menghadirkan *trade-off* yang mana kursi menambah kekakuan, akan tetapi keberadaan penumpang di atasnya meningkatkan pusat gravitasi dan momen inersia saat bus terguling. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa pengabaian massa penumpang dalam simulasi dapat menghasilkan prediksi keselamatan yang terlalu optimis, karena energi kinetik aktual yang harus diserap struktur saat kecelakaan nyata akan jauh lebih besar daripada berat kosong kendaraan saja (Guler et al., 2007; Seyedi & Jung, 2020).

2.3 Tantangan pada Tabrakan Depan: Adaptasi Regulasi dan Inovasi Desain

Berbeda dengan skenario guling yang telah diatur secara ketat melalui UN ECE R66, skenario tabrakan depan (*frontal impact*) pada bus penumpang menghadapi tantangan fundamental berupa ketiadaan standar global yang khusus untuk superstruktur bus. Hingga saat ini, belum ada regulasi internasional yang secara spesifik mengatur uji tabrak depan untuk kendaraan kategori M3 (bus), meskipun data statistik menunjukkan bahwa tabrakan frontal menyumbang proporsi fatalitas yang signifikan bagi pengemudi dan penumpang kursi depan. Sebagai respons terhadap kekosongan ini, komunitas peneliti dan industri manufaktur secara proaktif mengadopsi standar UN ECE R29 yang sejatinya dirancang untuk perlindungan kabin truk komersial (N3) sebagai tolak ukur untuk mengevaluasi kelayakan tabrak struktur depan bus (Afripin et al., 2019; Lopes et al., 2022).

2.3.1 Kesenjangan Desain dan Adaptasi Standar Truk

Adaptasi standar truk ke dalam desain bus bukanlah proses yang sederhana (*straightforward*). Truk konvensional umumnya memiliki "hidung" atau ruang mesin di depan kabin yang berfungsi alami sebagai zona remuk (*crumple zone*). Sebaliknya, bus modern terutama tipe *coach* dan bus kota memiliki desain wajah rata (*flat front*) dengan jarak yang sangat minim antara bumper depan dan posisi duduk pengemudi. Studi evaluasi terhadap struktur bus *coach*

konvensional menunjukkan bahwa tanpa modifikasi khusus, struktur asli sering kali gagal mencegah intrusi ekstrem ke dalam ruang operasional pengemudi saat diuji dengan dampak pendulum energi tinggi sesuai protokol UN ECE R29 (Lopes et al., 2023).

2.3.2 Dilema Struktural pada Bus Lantai Rendah (*Low Entry*)

Tantangan desain menjadi semakin akut pada varian bus kota lantai rendah (*Low Entry/Low Floor*) yang dirancang untuk aksesibilitas penumpang. Pada bus sasis tangga (*ladder chassis*) konvensional atau *High Deck*, sepasang balok longitudinal utama (*chassis rails*) berfungsi sebagai penyerap energi dominan saat tabrakan depan. Namun, pada bus lantai rendah, kontinuitas balok sasis ini terputus atau dihilangkan di bagian depan untuk mengakomodasi pintu masuk yang landai. Analisis numerik pada struktur bus *Low Entry* mengungkapkan bahwa penghilangan elemen longitudinal ini memaksa beban tabrakan dialihkan sepenuhnya ke superstruktur bagian atas dan pilar A, yang umumnya tidak didesain untuk menahan beban aksial besar. Hal ini mengakibatkan deformasi kabin yang ekstrem dan risiko penjepitan pengemudi yang jauh lebih tinggi dibandingkan varian bus antarkota (Holenko et al., 2024).

2.3.3 Optimasi Penyerapan Energi dan Komponen *Crash Box*

Untuk mengatasi keterbatasan ruang deformasi, strategi rekayasa kini berfokus pada integrasi komponen penyerap energi terdedikasi, atau *crash box*, pada struktur depan. Prinsip utamanya adalah mengelola penyebaran energi melalui deformasi plastis yang terkontrol pada komponen yang dapat dikorbankan (*sacrificial parts*), sehingga melindungi rangka utama kabin. Penambahan elemen ber dinding tipis (*thin-walled structures*) dengan pemicu lipatan (*crush initiators*) pada sasis depan terbukti mampu meningkatkan kapasitas penyerapan energi spesifik secara signifikan tanpa penambahan bobot yang berlebihan (Güler et al., 2020; Phunpeng, Sumklang, Boransan, Patongtalo, et al., 2025).

Namun, desain *crash box* pada bus memerlukan keseimbangan yang presisi (*optimization trade-off*) antara kekakuan struktur dan keselamatan biomekanika. Struktur yang terlalu kaku memang dapat meminimalkan intrusi fisik ke dalam kabin, namun berisiko mentransfer gaya deselerasi yang membahayakan bagi tubuh penumpangnya. Sebaliknya, struktur yang terlalu lunak akan menyebabkan intrusi berlebih yang menghimpit pengemudi. Oleh karena itu, pendekatan optimasi multi-objektif kini diterapkan untuk mencari konfigurasi desain yang optimal seperti ketebalan dinding dan geometri penampang yang mampu meminimalkan intrusi sekaligus menjaga level deselerasi tabrakan tetap berada di bawah ambang batas toleransi cedera manusia (Elhussieny et al., 2021).

Pada aplikasi bus listrik dengan struktur komposit *sandwich*, tantangan ini dijawab melalui rekayasa material hibrida. Panel depan komposit didesain untuk mengalami kegagalan kompresi progresif (*progressive crushing*) guna menyerap energi, sementara rangka pendukung internal diperkuat untuk mencegah delaminasi global yang dapat menyebabkan kegagalan katastrofik mendadak saat terjadi benturan frontal (Jongpradist et al., 2022).

2.4 Keselamatan Penumpang dan Integrasi Interior

Meskipun integritas superstruktur merupakan fondasi utama keselamatan pasif, perlindungan terhadap penumpang tidak berhenti pada pemenuhan kriteria ruang selamat (*residual space*) semata. Analisis kecelakaan menunjukkan bahwa fatalitas seringkali tetap terjadi meskipun struktur bus tidak mengalami kolaps total, akibat mekanisme cedera sekunder seperti terlemparnya penumpang (*ejection*), benturan dengan interior keras, atau kegagalan sistem penahan (*restraint system failure*). Oleh karena itu, perspektif keselamatan modern menuntut integrasi holistik antara desain struktur bodi dan komponen interior, di mana kursi dan sabuk pengaman berfungsi sebagai sistem manajemen energi terakhir yang berinteraksi langsung dengan tubuh manusia (Seyedi & Jung, 2020; Woodrooffe & Blower, 2015).

2.4.1 Integritas Struktural Kursi dan Sistem Penjangkaran

Dalam skenario tabrakan, kursi bus memegang peran ganda yaitu sebagai perangkat kenyamanan dan sebagai komponen struktural keselamatan yang kritis. Kegagalan pada titik

sambungan kursi-ke-lantai (*seat anchorage*) adalah salah satu mode kegagalan paling mematikan, yang mana kursi yang terlepas akan mengubah penumpang menjadi proyektil bermassa besar di dalam kabin. Regulasi seperti UN ECE R80 dan standar AIS 023 mensyaratkan pengujian statis dan dinamis pada struktur kursi untuk menjamin bahwa kursi mampu menahan beban inersia penumpang tanpa mengalami deformasi yang membahayakan atau terlepas dari dudukannya (Purohit et al., 2023).

Analisis elemen hingga pada kursi bus antarkota menunjukkan bahwa desain rangka kursi harus memiliki kemampuan deformasi plastis terkontrol untuk menyerap sebagian energi kinetik penumpang saat terjadi deselerasi mendadak. Namun, tantangan utama terletak pada kekuatan baut penjangkar (*anchor bolts*) dan pelat lantai bus. Studi parametrik mengungkapkan bahwa penguatan lokal pada area lantai tempat kursi terpasang merupakan suatu keharusan untuk mencegah fenomena *pull-out* (tercabutnya baut) saat menerima beban gabungan dari momen lentur dan gaya geser yang ekstrem selama tabrakan frontal (Guler et al., 2007; Purohit et al., 2023).

2.4.2 Kinematika Penumpang dan Mekanisme Cedera

Evaluasi keselamatan berbasis regulasi UN ECE R66 umumnya hanya berfokus pada menjaga intrusi pada *residual space*, namun sering mengabaikan apa yang terjadi pada penumpang di dalam ruang tersebut. Riset terkini mulai mengadopsi simulasi *multi-body dynamics* yang melibatkan model *dummy* terverifikasi untuk memetakan kinematika gerak penumpang (*occupant kinematics*) selama kejadian guling atau tabrakan. Temuan menunjukkan bahwa meskipun ruang selamat terjaga, penumpang yang tidak menggunakan sabuk pengaman (*unrestrained occupants*) memiliki risiko cedera kepala (HIC) dan leher yang sangat tinggi akibat benturan dengan langit-langit, rak bagasi, atau sesama penumpang sebelum bus berhenti berguling (Seyedi & Jung, 2020).

Pada kasus bus paratransit atau bus kecil, respons dinamis penumpang sangat dipengaruhi oleh posisi duduk dan sudut dampak. Penggunaan sabuk pengaman tiga titik (*three-point seatbelt*) terbukti secara signifikan mereduksi gerakan vertikal dan lateral penumpang, menjaga tubuh tetap terikat pada kursi yang berfungsi sebagai pelindung keamanan individu. Sebaliknya, pada penumpang yang hanya menggunakan sabuk dua titik (*lap belt*), risiko cedera spinal dan abdomen meningkat akibat efek *jack-knifing* (tubuh melipat ke depan) yang ekstrem. Oleh karena itu, desain interior modern harus mempertimbangkan eliminasi permukaan keras/tajam pada zona benturan kepala potensial serta mewajibkan penyediaan sistem penahan yang memenuhi standar FMVSS 208 untuk memitigasi cedera fatal (Morka et al., 2005; Seyedi & Jung, 2020).

2.4.3 Interaksi Massa Penumpang terhadap Respons Struktur

Salah satu asumsi penyederhanaan yang sering dilakukan dalam simulasi struktur bus adalah pemodelan massa penumpang sebagai beban mati (*dead load*) yang didistribusikan secara merata. Padahal, secara fisik, tubuh manusia adalah sistem dinamis yang memiliki fleksibilitas dan peredaman. Studi komparatif menunjukkan bahwa memasukkan model penumpang secara eksplisit dalam simulasi guling mengubah titik berat (*center of gravity*) dan momen inersia bus secara *real-time* saat bus berputar. Keberadaan massa penumpang pada posisi duduk secara signifikan meningkatkan energi potensial total yang harus diserap oleh pilar jendela samping saat terjadi dampak tanah pertama, sehingga struktur yang didesain berdasarkan berat kosong (*curb weight*) seringkali mengalami deformasi yang lebih parah (*under-designed*) ketika diuji dengan beban penumpang penuh (Guler et al., 2007; Mihradi et al., 2022).

2.5 Tren Masa Depan: Tantangan Elektrifikasi dan Inovasi Material Maju

Paradigma industri transportasi global kini sedang bergerak cepat menuju dekarbonisasi melalui adopsi kendaraan listrik. Namun, transisi dari mesin pembakaran internal ke propulsi listrik membawa implikasi radikal terhadap desain *crashworthiness* bus. Tantangan utamanya bukan lagi sekadar melindungi penumpang dari deformasi struktur, melainkan juga mengelola risiko fatal akibat kerusakan pada Sistem Penyimpanan Energi Terisi Ulang (*Rechargeable Energy Storage System* - REESS) atau baterai tegangan tinggi yang memiliki densitas energi sangat besar (Spirk & Kepka, 2015).

2.5.1 Integritas Struktur Bus Listrik dan Proteksi Baterai

Bus listrik memiliki karakteristik distribusi massa yang unik dibandingkan bus konvensional. Penempatan paket baterai yang bobotnya dapat mencapai ratusan kilogram, secara fundamental mengubah dinamika kendaraan. Jika baterai diletakkan di atap (umum pada bus kota lantai rendah), pusat gravitasi akan naik secara signifikan, meningkatkan momen guling dan energi potensial yang harus diserap oleh pilar jendela saat terjadi kecelakaan *rollover*. Sebaliknya, jika baterai diletakkan di sasis bawah atau kompartemen samping, paket baterai tersebut menjadi sangat rentan terhadap intrusi akibat tabrakan samping (*side impact*). Oleh karena itu, kerangka regulasi masa depan, seperti pengembangan lebih lanjut dari UN ECE R100, menuntut agar struktur bus tidak hanya mencegah intrusi ke kabin penumpang, tetapi juga menjamin bahwa deformasi struktur tidak pernah menyentuh atau mencederai modul baterai guna mencegah risiko kebakaran (*thermal runaway*) atau ledakan (Jongpradist et al., 2015; Spirk & Kepka, 2015).

2.5.2 Aplikasi Material Komposit Sandwich dan Struktur Hibrida

Untuk mengimbangi berat baterai yang masif dan memaksimalkan jarak tempuh operasional, strategi pengurangan bobot (*lightweighting*) menjadi imperatif, mendorong peralihan dari struktur baja murni ke material komposit maju. Struktur *monocoque* berbahan komposit *sandwich* yang terdiri dari kulit serat penguat dan inti busa (*foam core*) menawarkan rasio penyerapan energi spesifik (*Specific Energy Absorption*) yang jauh lebih unggul dibandingkan baja. Namun, perilaku kegagalan material ini bersifat getas (*brittle*). Analisis tabrakan depan pada bus listrik komposit menunjukkan bahwa mekanisme penyerapan energi didominasi oleh penghancuran progresif (*progressive crushing*) pada dinding panel, berbeda dengan baja yang menyerap energi melalui pelipatan plastis. Desain yang tidak tepat pada sambungan antar-panel dapat memicu delaminasi katastrofik, di mana struktur kehilangan integritasnya secara instan sebelum seluruh energi tabrakan terserap (Jongpradist et al., 2022).

Sebagai solusi jalan tengah, konsep balok hibrid (*hybrid beams*) mulai dikembangkan, menggabungkan profil baja berongga (*hollow section*) dengan pelat polimer yang diperkuat serat karbon (CFRP). Tujuannya adalah memanfaatkan daktilitas baja dan kekuatan tarik tinggi karbon secara simultan. Pengujian tekuk tiga titik pada komponen hibrid ini mengungkapkan tantangan teknis baru yaitu efektivitas penguatannya sangat bergantung pada kekuatan lapisan perekat (*adhesive layer*). Jika ikatan antara baja dan CFRP terlepas (*debonding*) saat deformasi awal, kontribusi penguatan komposit akan hilang sepenuhnya, meninggalkan struktur baja yang lebih tipis untuk menahan beban sisa. Oleh karena itu, optimasi lokasi penempatan material hibrid pada zona kritis superstruktur menjadi kunci untuk menyeimbangkan antara biaya, bobot, dan performa keselamatan (Phunpeng, Sumklang, Boransan, Horpibulsuk, et al., 2025; Václavík et al., 2024).

3. KESIMPULAN

Tinjauan komprehensif ini menegaskan bahwa rekayasa keselamatan pasif (*passive safety engineering*) pada superstruktur bus telah berevolusi dari sekadar pemenuhan regulasi menjadi disiplin ilmu yang kompleks dan terintegrasi. Pergeseran paradigma dari pengujian destruktif fisik menuju simulasi numerik tervalidasi telah terbukti menjadi metode yang efisien dan andal untuk mengevaluasi kelayakan tabrak (*crashworthiness*), asalkan protokol verifikasi ketat seperti analisis konvergensi *mesh* dan keseimbangan energi diterapkan secara konsisten (Farahani et al., 2021; Razali et al., 2025).

3.1 Sintesis Temua Utama

Dalam konteks perlindungan guling (*rollover*), standar UN ECE R66 tetap menjadi acuan emas global. Namun, studi pada berbagai konfigurasi bus, khususnya di negara berkembang, mengungkapkan bahwa desain superstruktur dasar seringkali tidak memadai tanpa penguatan strategis. Integrasi struktur kursi ke pilar samping (*seat-to-pillar connection*) teridentifikasi sebagai metode penguatan paling efektif yang meningkatkan kekakuan lateral tanpa penambahan bobot yang berlebihan (Guler et al., 2007; Mihradi et al., 2022).

Sebaliknya, skenario tabrakan depan (*frontal impact*) masih menyisakan celah regulasi yang signifikan. Adopsi standar truk UN ECE R29 pada bus penumpang dinilai problematis karena ketidaksesuaian geometri wajah depan bus yang datar. Hal ini sangat kritis pada varian bus kota lantai rendah (*Low-Entry*), di mana ketiadaan struktur sasis longitudinal secara kontinyu menyebabkan risiko intrusi ekstrem ke ruang pengemudi. Solusi berbasis *crash box* dan struktur penyerap energi ber dinding tipis telah terbukti mampu memitigasi risiko ini, namun penerapannya menuntut optimasi presisi untuk menyeimbangkan antara pencegahan intrusi dan pembatasan gaya deselerasi yang mematikan bagi penumpang (Elhussieny et al., 2021; Holenko et al., 2024; Lopes et al., 2023).

Lebih jauh, keselamatan tidak dapat dicapai hanya dengan menjaga keutuhan ruang selamat (*residual space*). Analisis biomekanika menunjukkan bahwa risiko cedera sekunder akibat benturan interior tetap tinggi jika sistem penahan penumpang tidak memadai. Oleh karena itu, kekuatan jangkar kursi dan penggunaan sabuk pengaman tiga titik menjadi elemen tak terpisahkan dari sistem keselamatan bus secara keseluruhan (Purohit et al., 2023; Seyedi & Jung, 2020).

3.2 Rekomendasi Kebijakan dan Tantangan Teknologi

Berdasarkan sintesis literatur terkini, arah pengembangan riset dan kebijakan keselamatan bus di masa depan harus difokuskan pada tiga area strategis:

1. **Harmonisasi Standar Tabrakan Depan:** Mendesak perlunya pengembangan regulasi yang spesifik untuk uji tabrak depan bus, yang terpisah dari standar truk. Regulasi ini harus mempertimbangkan karakteristik unik bus lantai rendah dan menyertakan kriteria perlindungan kaki pengemudi yang lebih ketat (Lopes et al., 2022; Nævestad et al., 2025).
2. **Adaptasi Arsitektur Kendaraan Listrik:** Transisi ke bus listrik menuntut redefinisi konsep *crashworthiness*. Struktur bus masa depan harus didesain dengan konsep "Zona Proteksi Ganda" guna melindungi penumpang dari trauma fisik dan melindungi paket baterai (REESS) dari deformasi yang dapat memicu kebakaran (*thermal runaway*). Penggunaan material komposit *sandwich* menawarkan potensi besar untuk kompensasi bobot, namun memerlukan desain sambungan khusus untuk mencegah kegagalan delaminasi getas saat terjadi dampak energi tinggi (Jongpradist et al., 2022; Spirk & Kepka, 2015).
3. **Keselamatan Berbasis Perilaku:** Mengingat tingginya kontribusi faktor manusia dalam kecelakaan bus, desain fitur keselamatan pasif harus disinergikan dengan teknologi keselamatan aktif yang mampu memantau kondisi pengemudi. Data kecelakaan riil harus terus digunakan sebagai umpan balik untuk memperbarui parameter simulasi, memastikan bahwa model rekayasa yang dikembangkan relevan dengan kondisi operasional sesungguhnya di lapangan (Safitri et al., 2020; Syahliantina et al., 2025).

Sebagai penutup, peningkatan keselamatan transportasi massal menuntut kolaborasi erat antara regulator, manufaktur, dan akademisi untuk menutup kesenjangan antara kemampuan teknologi material maju dan standar keselamatan yang berlaku saat ini.

REFERENCES

- Afripin, M. A. A., Zainudin, A. Z., Sahar, M. A. H. F. M., & Yusof, M. (2019). Frontal impact on bus superstructure as per UNECE R29 and NCAP. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 670(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/670/1/012014>
- Elhussieny, S., Oraby, W., Elkady, M., Abdelhamid, A., & El-Demerdash, S. (2021). Optimisation of crash dynamics for bus cabin structure based on attained intrusion and deceleration during a frontal collision. *International Journal of Crashworthiness*, 26(5), 501–514. <https://doi.org/10.1080/13588265.2020.1754648>
- Farahani, B. V., Ramos, N. V., Moreira, P. M. G. P., Cunha, R., Costa, A., Maia, R., & Rodrigues, R. M. (2021). Passive safety solutions on transit buses: Experimental and numerical analyses. *Procedia Structural Integrity*, 37(C), 668–675. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.136>
- Gozali, M., Karmiadji, D. W., Libyawati, W., Haryanto, B., Masrur, M., Setyawan, A., Sulistiyo, W., Nuramin, M., Anwar, A., & Susilo, B. (2024). Experimental and Finite Element Study of Rollover Protection Structure for a 22-Seat Man Hauler Superstructure Vehicle. *Automotive Experiences*, 7(3), 389–405.

- <https://doi.org/10.31603/ae.11380>
- Güler, M. A., Cerit, M. E., Mert, S. K., & Acar, E. (2020). Experimental and numerical study on the crashworthiness evaluation of an intercity coach under frontal impact conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(13), 3026–3041. <https://doi.org/10.1177/0954407020927644>
- Guler, M. A., Elitok, K., Bayram, B., & Stelzmann, U. (2007). The influence of seat structure and passenger weight on the rollover crashworthiness of an intercity coach. *International Journal of Crashworthiness*, 12(6), 567–580. <https://doi.org/10.1080/13588260701485297>
- Holenko, K., Dykha, O., Koda, E., Kernyskyi, I., Royko, Y., Horbay, O., Berezovetska, O., Rys, V., Humenuyk, R., Berezovetskyi, S., Żółtowski, M., Markiewicz, A., & Wierzbicki, T. (2024). Validation of Frontal Crashworthiness Simulation for Low-Entry Type Bus Body According to UNECE R29 Requirements. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(13), 1–14. <https://doi.org/10.3390/app14135595>
- Jongpradist, P., Saingam, N., Tangthamsathit, P., Chanpaibool, P., Sirichantra, J., & Aimmanee, S. (2022). Crashworthiness analysis and design of a sandwich composite electric bus structure under full frontal impact. *Heliyon*, 8(12), e11999. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11999>
- Jongpradist, P., Senawat, S., & Muangto, B. (2015). Improvement of Crashworthiness of Bus Structure under Frontal Impact. *Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15)*, October, 1–11.
- Kusumawati, N. R., & Widyaningsih, N. (2023). City Bus Inter-City and Inter-Provincial Traveller Safety Analysis in Jakarta until Solo Province. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology*, 09(10), 01–08. <https://doi.org/10.31695/ijerat.2023.9.10.1>
- Lopes, R., Ramos, N. V., Cunha, R., Maia, R., Rodrigues, R., Parente, M. P. L., & Moreira, P. M. G. P. (2022). Passive Safety Solutions on Coach according ECE R29: Experimental and Numerical analyses. *Procedia Structural Integrity*, 42(2019), 1159–1168. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.148>
- Lopes, R., Ramos, N. V., Cunha, R., Maia, R., Rodrigues, R., Parente, M. P. L., & Moreira, P. M. G. P. (2023). Coach crashworthiness and failure analysis during a frontal impact. *Engineering Failure Analysis*, 151(May), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107369>
- Mihradi, S., Dhaniswara, A., Wicaksono, S., & Mahyuddin, A. I. (2022). Bus Superstructure Reinforcement for Safety Improvement against Rollover Accidents. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 54(2). <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.2.6>
- Morka, A., Kwaśniewski, L., & Wekezer, J. (2005). Assessment of Passenger Security in Paratransit Buses. *Journal of Public Transportation*, 8(4), 47–63. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.8.4.4>
- Nævestad, T., Høye, A. K., Elvik, R., Hesjevoll, I., Brunstad, Ø. L., Milch, V., Blom, J., Laso, M., Pinchasik, D. R., Hesjevoll, I., Brunstad, Ø. L., Milch, V., Blom, J., Laso, M., Pinchasik, D. R., & Dale, T. (2025). *Crashworthiness of buses improvements* (Issue 0).
- Phadatare, V. D., & Hujare, P. P. (2017). Performance Improvement of Bus Structure for Rollover Analysis Using FEA and Validation of Roll Bar. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 17(10), 16–19. <https://doi.org/10.9790/1684-17010041619>
- Phunpeng, V., Sumklang, S., Boransan, W., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., & Patongtalo, W. (2025). *The Strength Analysis of Passenger-Bus Chassis Structure for Design Modification* (Vol. 6, Issue 6, pp. 1–4). <https://doi.org/10.2139/ssrn.5177786>
- Phunpeng, V., Sumklang, S., Boransan, W., Patongtalo, W., Horpibulsuk, S., & Chinkulkijniwat, A. (2025). Revolutionizing Passenger-Bus Safety: A Structural Redesign for Enhanced Crash Resilience. In *The Lancet Pschch* (Vol. 11, Issue August, pp. 133–143). <https://doi.org/10.2139/ssrn.5325631>
- Purohit, P., Gurav, R., & Nalavade, S. (2023). Improving crash-worthiness and occupant safety of bus seat structures in frontal crashes as per AIS023 using Finite Element Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2601. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2601/1/012039>
- Razali, N. I., Aziz, N. A., & Topa, A. (2025). Verification of the Computer Model of the Bus Rollover According To Annex 9 Unece R66. *ASEAN Engineering Journal*, 15(3), 143–150. <https://doi.org/10.11113/aej.v15.22533>
- Safitri, D. M., Surjandari, I., & Jachrizal Sumabrata, R. (2020). Assessing factors affecting safety violations of bus rapid transit drivers in the Greater Jakarta Area. *Safety Science*, 125(March 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104634>
- Seyedi, M. R., & Jung, S. (2020). Numerical assessment of occupant responses during the bus rollover test: A finite element parametric study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(8), 2195–2215. <https://doi.org/10.1177/0954407019894425>
- Spirk, S., & Kepka, M. (2015). Tests and Simulations for Assessment of Electric Buses Passive Safety. *Procedia Engineering*, 114, 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.077>
- Syahliantina, A., Suhardi, B., & Dewi, R. S. (2025). Investigation of Factors Influencing Bus Accidents: A Framework for Enhancing Transportation Safety Mitigation. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 15(4), 1171–1181. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.15.4.20787>
- Václavík, J., Dopierala, L., & Chvojan, J. (2024). Investigations of the Hybrid Beam Behavior during the Three-

- point Bending Test. *Procedia Structural Integrity*, 54(2023), 294–299. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.086>
- Woodrooffe, J., & Blower, D. (2015). Heavy Truck Crash Analysis and Countermeasures to Improve Occupant Safety. *SAE Technical Papers, 2015-Sept*(May). <https://doi.org/10.4271/2015-01-2868>
- Afripin, M. A. A., Zainudin, A. Z., Sahar, M. A. H. F. M., & Yusof, M. (2019). Frontal impact on bus superstructure as per UNECE R29 and NCAP. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 670(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/670/1/012014>
- Elhussieny, S., Oraby, W., Elkady, M., Abdelhamid, A., & El-Demerdash, S. (2021). Optimisation of crash dynamics for bus cabin structure based on attained intrusion and deceleration during a frontal collision. *International Journal of Crashworthiness*, 26(5), 501–514. <https://doi.org/10.1080/13588265.2020.1754648>
- Farahani, B. V., Ramos, N. V., Moreira, P. M. G. P., Cunha, R., Costa, A., Maia, R., & Rodrigues, R. M. (2021). Passive safety solutions on transit buses: Experimental and numerical analyses. *Procedia Structural Integrity*, 37(C), 668–675. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.136>
- Gozali, M., Karmiadji, D. W., Libyawati, W., Haryanto, B., Masrur, M., Setyawan, A., Sulistiyo, W., Nuramin, M., Anwar, A., & Susilo, B. (2024). Experimental and Finite Element Study of Rollover Protection Structure for a 22-Seat Man Hauler Superstructure Vehicle. *Automotive Experiences*, 7(3), 389–405. <https://doi.org/10.31603/ae.11380>
- Güler, M. A., Cerit, M. E., Mert, S. K., & Acar, E. (2020). Experimental and numerical study on the crashworthiness evaluation of an intercity coach under frontal impact conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(13), 3026–3041. <https://doi.org/10.1177/0954407020927644>
- Guler, M. A., Elitok, K., Bayram, B., & Stelzmann, U. (2007). The influence of seat structure and passenger weight on the rollover crashworthiness of an intercity coach. *International Journal of Crashworthiness*, 12(6), 567–580. <https://doi.org/10.1080/13588260701485297>
- Holenko, K., Dykha, O., Koda, E., Kernytskyy, I., Royko, Y., Horbay, O., Berezovetska, O., Rys, V., Humenuyk, R., Berezovetskyi, S., Zóltowski, M., Markiewicz, A., & Wierzbicki, T. (2024). Validation of Frontal Crashworthiness Simulation for Low-Entry Type Bus Body According to UNECE R29 Requirements. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(13), 1–14. <https://doi.org/10.3390/app14135595>
- Jongpradist, P., Saingam, N., Tangthamsathit, P., Champaibool, P., Sirichantra, J., & Aimmanee, S. (2022). Crashworthiness analysis and design of a sandwich composite electric bus structure under full frontal impact. *Heliyon*, 8(12), e11999. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11999>
- Jongpradist, P., Senawat, S., & Muangto, B. (2015). Improvement of Crashworthiness of Bus Structure under Frontal Impact. *Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15)*, October, 1–11.
- Kusumawati, N. R., & Widyaningsih, N. (2023). City Bus Inter-City and Inter-Provincial Traveller Safety Analysis in Jakarta until Solo Province. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology*, 09(10), 01–08. <https://doi.org/10.31695/ijerat.2023.9.10.1>
- Lopes, R., Ramos, N. V., Cunha, R., Maia, R., Rodrigues, R., Parente, M. P. L., & Moreira, P. M. G. P. (2022). Passive Safety Solutions on Coach according ECE R29: Experimental and Numerical analyses. *Procedia Structural Integrity*, 42(2019), 1159–1168. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.148>
- Lopes, R., Ramos, N. V., Cunha, R., Maia, R., Rodrigues, R., Parente, M. P. L., & Moreira, P. M. G. P. (2023). Coach crashworthiness and failure analysis during a frontal impact. *Engineering Failure Analysis*, 151(May), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107369>
- Mihradi, S., Dhaniswara, A., Wicaksono, S., & Mahyuddin, A. I. (2022). Bus Superstructure Reinforcement for Safety Improvement against Rollover Accidents. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 54(2). <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.2.6>
- Morka, A., Kwaśniewski, L., & Wekezer, J. (2005). Assessment of Passenger Security in Paratransit Buses. *Journal of Public Transportation*, 8(4), 47–63. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.8.4.4>
- Nævestad, T., Høy, A. K., Elvik, R., Hesjevoll, I., Brunstad, Ø. L., Milch, V., Blom, J., Laso, M., Pinchasik, D. R., Hesjevoll, I., Brunstad, Ø. L., Milch, V., Blom, J., Laso, M., Pinchasik, D. R., & Dale, T. (2025). *Crashworthiness of buses improvements* (Issue 0).
- Phadatare, V. D., & Hujare, P. P. (2017). Performance Improvement of Bus Structure for Rollover Analysis Using FEA and Validation of Roll Bar. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 17(10), 16–19. <https://doi.org/10.9790/1684-17010041619>
- Phunpeng, V., Sumklang, S., Boransan, W., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., & Patongtalo, W. (2025). *The Strength Analysis of Passenger-Bus Chassis Structure for Design Modification* (Vol. 6, Issue 6, pp. 1–4). <https://doi.org/10.2139/ssrn.5177786>
- Phunpeng, V., Sumklang, S., Boransan, W., Patongtalo, W., Horpibulsuk, S., & Chinkulkijniwat, A. (2025). Revolutionizing Passenger-Bus Safety: A Structural Redesign for Enhanced Crash Resilience. In *The Lancet Pschch* (Vol. 11, Issue August, pp. 133–143). <https://doi.org/10.2139/ssrn.5325631>
- Purohit, P., Gurav, R., & Nalavade, S. (2023). Improving crash-worthiness and occupant safety of bus seat structures in frontal crashes as per AIS023 using Finite Element Analysis. *Journal of Physics:*

- Conference Series*, 2601. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2601/1/012039>
- Razali, N. I., Aziz, N. A., & Topa, A. (2025). Verification of the Computer Model of the Bus Rollover According To Annex 9 Unece R66. *ASEAN Engineering Journal*, 15(3), 143–150. <https://doi.org/10.11113/aej.v15.22533>
- Safitri, D. M., Surjandari, I., & Jachrizal Sumabrata, R. (2020). Assessing factors affecting safety violations of bus rapid transit drivers in the Greater Jakarta Area. *Safety Science*, 125(March 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104634>
- Seyedi, M. R., & Jung, S. (2020). Numerical assessment of occupant responses during the bus rollover test: A finite element parametric study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(8), 2195–2215. <https://doi.org/10.1177/0954407019894425>
- Spirk, S., & Kepka, M. (2015). Tests and Simulations for Assessment of Electric Buses Passive Safety. *Procedia Engineering*, 114, 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.077>
- Syahliantina, A., Suhardi, B., & Dewi, R. S. (2025). Investigation of Factors Influencing Bus Accidents: A Framework for Enhancing Transportation Safety Mitigation. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 15(4), 1171–1181. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.15.4.20787>
- Václavík, J., Dopierala, L., & Chvojan, J. (2024). Investigations of the Hybrid Beam Behavior during the Three-point Bending Test. *Procedia Structural Integrity*, 54(2023), 294–299. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.086>
- Woodrooffe, J., & Blower, D. (2015). Heavy Truck Crash Analysis and Countermeasures to Improve Occupant Safety. *SAE Technical Papers, 2015-Sept*(May). <https://doi.org/10.4271/2015-01-2868>