

Studi Numerik Respons *Crashworthiness* Lokomotif CC206 Berbasis Model Representatif

Adhita Prasetya^{*,1}, Muki Setya Permana², M. Agus Kariem³

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Widyatama
Jalan Cikutra No.204A, Bandung, 40125, Indonesia

²Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pasundan
Jl. Sumatra No. 41, Jawa Barat, Bandung, 40116, Indonesia

³Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Jawa Barat, Bandung, 40132, Indonesia

*E-mail: adhita.prasetya@widyatama.ac.id

Diterima: 26 Mei 2025, direvisi: 10 Juli 2025, disetujui: 9 Oktober 2025,
tersedia daring: 22 Desember 2025, diterbitkan: 29 Desember 2025

Abstrak

Peningkatan kecepatan operasi kereta api berbanding lurus dengan meningkatnya risiko dan tingkat keparahan kecelakaan sehingga aspek *crashworthiness* menjadi isu penting dalam perancangan dan pengoperasian lokomotif. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi respons *crashworthiness* lokomotif CC206 menggunakan model representatif berbasis metode elemen hingga (MEH). Struktur lokomotif dimodelkan menggunakan elemen *shell* yang dibagi menjadi empat bagian utama, yaitu kabin depan, *underframe*, kompartemen mesin, dan kabin belakang. Skenario tumbukan dimodelkan sebagai tabrakan frontal antara lokomotif bermassa 90 ton dengan dinding kaku pada kecepatan awal 27,7 m/s. Material struktur diasumsikan menggunakan baja ASTM A36 dan dimodelkan menggunakan model plastisitas Johnson–Cook untuk merepresentasikan perilaku deformasi nonlinier akibat laju regangan tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa energi kinetik lokomotif dengan cepat berubah menjadi energi internal dalam waktu kurang dari 0,1 detik setelah tumbukan. Deformasi signifikan terjadi di kabin depan hingga menghilangkan ruang selamat awak, sementara *underframe* mengalami gaya angkat yang berpotensi menyebabkan fenomena *climbing*. Temuan ini menunjukkan bahwa struktur representatif lokomotif CC206 belum mampu memberikan perlindungan optimal bagi awak pada kondisi tumbukan berkecepatan tinggi. Oleh karena itu, penerapan komponen *crash energy management* (CEM), seperti *collision post* dan struktur penyerap energi, menjadi sangat penting untuk meningkatkan keselamatan lokomotif.

Kata kunci: *Crashworthiness*, CEM, kendaraan rel, MEH, tumbukan lokomotif.

Abstract

Numerical Study on Crashworthiness Response of CC206 Locomotive Based on a Representative Model: The increase in railway operating speed is directly proportional to the increasing risk and severity of railway accidents, making crashworthiness an important issue in locomotive design and operation. This study aims to evaluate the crashworthiness response of the CC206 locomotive using a representative finite element model (FEM). The locomotive structure was modeled using shell elements and divided into four main components, namely the front cabin, underframe, engine compartment, and rear cabin. The collision scenario was modeled as a frontal impact between a 90-ton locomotive and a rigid wall at an initial velocity of 27.7 m/s. The structural material was assumed to be ASTM A36 steel and modeled using the Johnson–Cook plasticity model to capture nonlinear deformation behavior under high strain rates. The simulation results show that the locomotive kinetic energy was rapidly converted into internal energy within less than 0.1 seconds after impact. Significant deformation occurred in the front cabin, resulting in the loss of crew survival space, while the underframe experienced an uplift force that potentially causes climbing phenomena. These findings indicate that the representative CC206 locomotive structure is insufficient to provide optimal crew protection under high-speed collision conditions. Therefore, the implementation of crash energy management (CEM) components, such as collision posts and energy-absorbing structures, is essential to improve locomotive safety.

Keywords: Crashworthiness, CEM, FEM, locomotive collision, railway vehicles.

1. Pendahuluan

Peningkatan kecepatan operasi kereta api diikuti oleh meningkatnya risiko dan tingkat keparahan kecelakaan. Data statistik keselamatan perkeretaapian menunjukkan bahwa kecelakaan dengan kecepatan tinggi memiliki potensi kerusakan struktural yang signifikan serta risiko fatalitas yang tinggi [1][2][3]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa optimasi struktur dan mekanisme penyerapan energi memiliki peran penting dalam meningkatkan performa *crashworthiness* kendaraan rel [4][5][6].

Perkembangan teknologi transportasi perkeretaapian mendorong peningkatan kecepatan operasi lokomotif yang secara langsung meningkatkan energi tumbukan saat kecelakaan terjadi. Kondisi ini

menjadikan keselamatan awak dan integritas struktur lokomotif sebagai isu utama dalam sistem transportasi rel. *Crashworthiness* didefinisikan sebagai kemampuan struktur kendaraan untuk menyerap energi tumbukan secara terkontrol serta mempertahankan ruang selamat bagi awak selama dan setelah terjadinya tabrakan [7][8][9].

Hal ini juga didukung oleh berbagai penelitian dan program pengembangan desain lokomotif *crashworthiness* yang mengintegrasikan simulasi numerik dan desain struktur penyerap energi [6][10][11][12]. Standar internasional terus dikembangkan untuk kebutuhan keselamatan tersebut. Salah satu acuan terbaru dalam industri adalah EN 15227:2020+A1:2024 [11] yang mensyaratkan karakteristik *crashworthiness* pada kendaraan rel baru termasuk lokomotif dan *rolling stock* melalui metode desain, simulasi numerik, dan uji komponen atau struktur. Peraturan ini secara eksplisit mengatur skenario tumbukan dan target perlindungan ruang selamat berdasarkan studi risiko nyata dan metode evaluasi terbaru. Standar ini menjadi acuan penting dalam perancangan kendaraan rel modern.

Sejumlah studi terbaru juga menunjukkan bahwa penerapan mekanisme manajemen energi tumbukan CEM, termasuk *crush boxes*, *deformable anti-climbers*, dan struktur penyerap energi, berperan, penting dalam mengendalikan deformasi serta meningkatkan kemampuan struktur kendaraan rel dalam menyerap energi tumbukan [6][13]. Kajian state of the art juga menunjukkan bahwa performa *crashworthiness* kendaraan rel dipengaruhi oleh karakteristik material, geometri struktur, dan mekanisme deformasi yang dirancang secara progresif [13].

Namun demikian, di Indonesia kajian *crashworthiness* lokomotif masih terbatas, terutama karena keterbatasan data teknis dan fasilitas pengujian destruktif. Kajian numerik yang secara khusus mengevaluasi respons struktur lokomotif diesel-elektrik CC206 terhadap tumbukan frontal berkecepatan tinggi juga masih terbatas.

Kemajuan teknologi komputasi memungkinkan penggunaan MEH sebagai alternatif yang efektif dan efisien untuk menganalisis respons struktur akibat tumbukan berkecepatan tinggi [3][14][15]. Metode ini telah banyak digunakan dalam kajian *crashworthiness* kereta karena mampu memprediksi deformasi nonlinier, distribusi energi, serta mekanisme kegagalan [3][14][15]. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi awal dilakukan melalui model numerik representatif ketika pengujian skala penuh dan data teknis aktual belum tersedia secara lengkap.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model numerik representatif lokomotif CC206 dan mengevaluasi karakteristik *crashworthiness* berdasarkan respons deformasi, mekanisme penyerapan energi, serta potensi kehilangan ruang selamat awak. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang membahas *crashworthiness* kendaraan rel secara umum, penelitian ini berfokus pada evaluasi awal lokomotif CC206 dalam konteks perkeretaapian Indonesia. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan kajian *crashworthiness* yang lebih komprehensif serta memberikan masukan awal bagi pengembangan desain dan standar keselamatan lokomotif di Indonesia.

2. Metodologi

Metode elemen telah banyak digunakan dalam analisis tumbukan kendaraan rel karena dapat memodelkan deformasi nonlinier dan interaksi kontak secara akurat [5][16]. Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik berbasis metode elemen untuk menganalisis respons struktur lokomotif CC206 terhadap skenario tumbukan frontal. Model numerik yang digunakan dalam penelitian ini dibangun sebagai model representatif berdasarkan data geometrik umum, konfigurasi struktur utama, serta asumsi teknis yang lazim diterapkan pada lokomotif diesel-elektrik dengan kelas dan fungsi sejenis mengingat keterbatasan ketersediaan data teknis rinci dari pabrikan. Oleh karena itu, penelitian ini tidak sebagai evaluasi absolut terhadap desain aktual lokomotif, tetapi sebagai evaluasi numerik berbasis model representatif untuk mengidentifikasi kecenderungan respons struktural dan karakteristik *crashworthiness*. Tahapan metodologi meliputi pengumpulan data, pengolahan data melalui pemodelan elemen hingga, serta analisis hasil simulasi yang difokuskan pada mekanisme penyerapan energi, pola deformasi struktur, dan implikasinya terhadap keselamatan awak.

2.1. Metode Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data geometrik, data material, dan data operasional lokomotif CC206. Data geometrik dan konfigurasi struktur diperoleh dari spesifikasi teknis lokomotif dan dokumen pendukung terkait. Data material mengacu pada baja struktural ASTM A36 yang umum digunakan pada konstruksi lokomotif [10]. Data operasional meliputi massa lokomotif dan kecepatan operasi maksimum yang digunakan sebagai kondisi awal dalam simulasi. Selain itu, studi literatur dilakukan terhadap standar *crashworthiness* dan publikasi ilmiah terkait analisis tumbukan kendaraan rel [6][7][9].

2.2. Pengolahan Data

Metode elemen digunakan untuk memodelkan respons struktur lokomotif terhadap tumbukan. Struktur lokomotif dimodelkan menggunakan elemen *shell* empat node (*quadrilateral shell elements*) dan dibagi menjadi beberapa bagian utama, yaitu kabin depan, rangka bawah (*underframe*), kompartemen mesin, dan kabin belakang. Pendekatan elemen *shell* dipilih karena efisien secara komputasi serta banyak digunakan dalam analisis *crashworthiness* struktur ber dinding tipis [15][16].

Model elemen hingga didiskretisasi menggunakan elemen *shell* dengan ukuran *mesh* rata-rata sebesar 50–100 mm dengan penyempurnaan *mesh* (*mesh refinement*) di area kritis, seperti kabin depan dan sambungan *underframe* untuk meningkatkan akurasi dalam menangkap deformasi plastis dan keruntuhan lokal. Ukuran *mesh* yang digunakan dipilih berdasarkan pertimbangan keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi.

Kondisi batas (*boundary condition*) ditentukan dengan memberikan kecepatan awal sebesar 27,7 m/s pada model lokomotif, sementara dinding kaku dibuat terfiksasi pada semua derajat kebebasan. Interaksi kontak antara struktur lokomotif dan dinding kaku dimodelkan menggunakan algoritma *automatic surface-to-surface contact* berbasis metode penalti (*penalty method*) dengan koefisien gesek sebesar 0,2 sehingga mampu merepresentasikan fenomena tumbukan dan gesekan secara realistis.

Analisis dilakukan menggunakan metode eksplisit dengan skema integrasi waktu yang umum digunakan dalam simulasi tumbukan berkecepatan tinggi karena mampu menangani nonlinieritas material, kontak, dan deformasi besar secara stabil.

Material struktur diasumsikan bersifat homogen dan isotropik dengan perilaku plastis direpresentasikan menggunakan model konstitutif *Johnson–Cook* untuk menangkap efek regangan besar dan laju regangan tinggi selama tumbukan [16][17]. Skenario tumbukan dimodelkan sebagai tabrakan frontal antara lokomotif dan dinding kaku untuk merepresentasikan kondisi tumbukan terburuk (*worst-case scenario*), sebagaimana umum digunakan dalam kajian *crashworthiness* awal [3][5].

2.3. Analisis Data

Analisis data dilakukan berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan MEH eksplisit. Parameter yang dianalisis meliputi perubahan energi kinetik dan energi internal selama tumbukan, pola deformasi struktur, serta respons kabin depan dan rangka bawah. Evaluasi *crashworthiness* dilakukan dengan meninjau kemampuan struktur dalam menyerap energi tumbukan, tingkat deformasi yang terjadi, serta keberlangsungan ruang selamat awak lokomotif. Hasil analisis kemudian dibandingkan secara kualitatif dengan temuan penelitian terdahulu dan ketentuan dalam standar *crashworthiness* terkini untuk memastikan konsistensi fisik hasil simulasi [1][3][5].

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil visualisasi deformasi, panjang kabin depan yang semula diperkirakan sekitar 3–4 m mengalami reduksi signifikan hingga mendekati 0,5–1 m setelah tumbukan. Dengan demikian, deformasi maksimum dapat diestimasi berada pada kisaran ± 2 –3 m yang menunjukkan tingkat kerusakan struktural yang sangat tinggi di area kabin depan.

Pendekatan momentum digunakan untuk memperkirakan besarnya gaya tumbukan berdasarkan massa, kecepatan, dan waktu tumbukan. Dengan massa lokomotif sebesar 89.842,7 kg, kecepatan awal 27.7 m/s, dan waktu tumbukan sekitar 0,1 detik, diperoleh gaya tumbukan rata-rata sebesar $\approx 2,4 \times 10^7$ N

(≈ 24 MN). Nilai ini menunjukkan bahwa struktur kabin depan menerima beban dampak yang sangat besar dalam waktu yang sangat singkat.

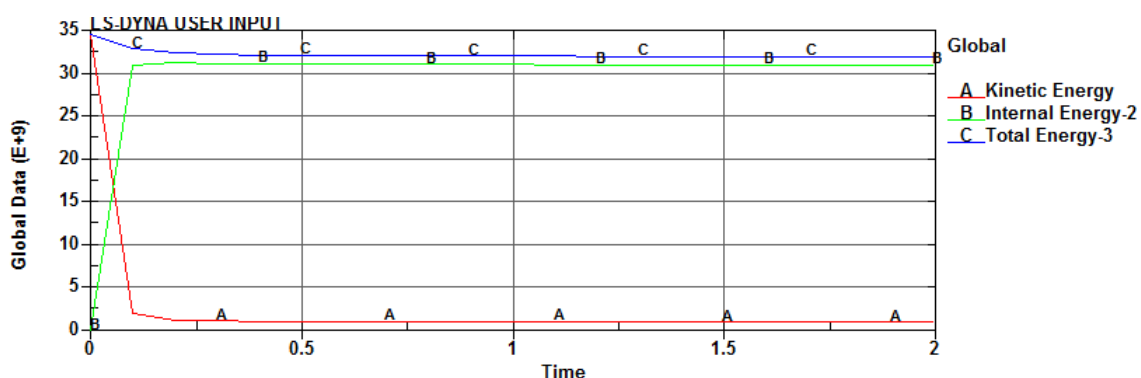
Berdasarkan standar performa *crashworthiness* yang ditetapkan dalam 49 CFR Part 238 oleh Federal Railroad Administration (FRA) [9], kendaraan rel diharuskan mampu menyerap energi tumbukan tertentu untuk menjamin keselamatan awak. Pada kecepatan 48 km/jam, energi yang harus diserap mencapai sekitar 13 MJ.

Hasil simulasi tumbukan frontal lokomotif CC206 terhadap dinding kaku pada kecepatan awal 27,7 m/s menunjukkan respons struktural yang signifikan, khususnya di kabin depan dan rangka bawah (*underframe*). Evaluasi dilakukan berdasarkan perubahan energi, pola deformasi struktur, serta implikasinya terhadap keselamatan awak.

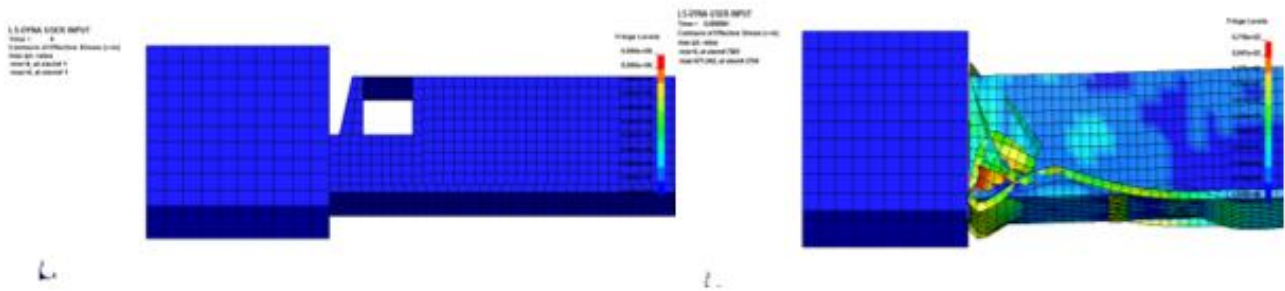
Perubahan energi kinetik dan energi internal selama proses tumbukan ditunjukkan pada Gambar 1. Energi kinetik lokomotif mengalami penurunan tajam seiring dengan meningkatnya energi internal akibat deformasi plastis struktur. Proses konversi energi berlangsung sangat cepat dan mencapai kondisi dominan dalam waktu kurang dari 0,1 detik setelah kontak awal. Pola ini sejalan dengan karakteristik tumbukan cepat pada kendaraan rel yang dilaporkan dalam studi numerik dan pengujian skala penuh sebelumnya [1][3][5]. Kesesuaian tren energi tersebut menunjukkan bahwa model simulasi memiliki representasi fisik yang memadai dan memenuhi prinsip konservasi energi [8][9].

Deformasi struktur paling signifikan terjadi di kabin depan lokomotif. Pada kecepatan tumbukan 27,7 m/s, kabin depan mengalami keruntuhan menyeluruh hingga menghilangkan ruang selamat awak (*survival space*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur depan lokomotif belum mampu menyerap energi tumbukan secara terkontrol. Hasil ini tidak memenuhi prinsip CEM yang mensyaratkan deformasi progresif pada struktur depan untuk melindungi ruang awak, sebagaimana direkomendasikan dalam standar EN 15227 edisi terbaru dan regulasi FRA/APTA [9][11] serta studi terbaru terkait *crashworthiness* [7][11][16]. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa ketiadaan elemen penyerap energi menyebabkan konsentrasi deformasi di area kabin awak [6][16].

Untuk mengevaluasi pengaruh kecepatan tumbukan terhadap tingkat kerusakan struktur, dilakukan simulasi tambahan dengan kecepatan awal 13,33 m/s (48 km/jam). Hasil simulasi pada kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 3. Dibandingkan dengan tumbukan pada kecepatan 27,7 m/s, tingkat deformasi struktur mengalami penurunan yang signifikan. Kerusakan di kabin depan berkurang sehingga peluang terbentuknya ruang selamat awak meningkat. Hasil ini mengindikasikan bahwa pengurangan energi tumbukan, baik melalui pembatasan kecepatan maupun penerapan sistem CEM, dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan keselamatan awak, sebagaimana dilaporkan dalam studi *crashworthiness* kendaraan rel modern [5][6][16].



Gambar 1. Perubahan energi kinetik dan energi internal selama proses tumbukan.



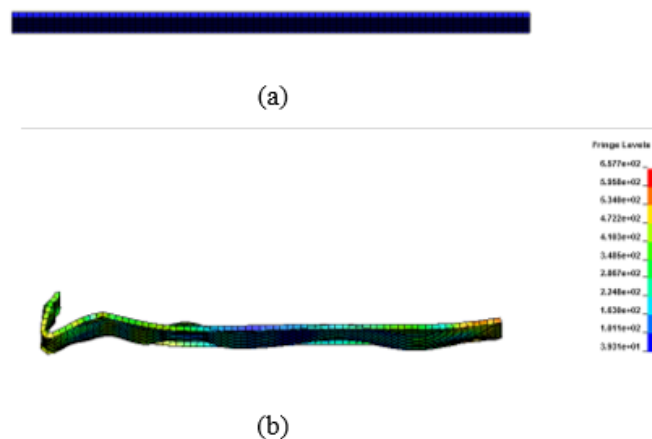
Gambar 2. Deformasi struktur kabin depan pada kecepatan 27,7 m/s ($t = 0,0999$ s)



Gambar 3. Deformasi struktur lokomotif pada kecepatan 13,33 m/s sesuai standar APTA 49 CFR Part 238.

Selain deformasi di kabin depan, respons signifikan juga terjadi pada struktur *underframe*. Di bagian ujung depan lokomotif, teridentifikasi adanya gaya angkat vertikal yang berpotensi menyebabkan fenomena *climbing* seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Fenomena ini berbahaya karena dapat mengakibatkan lokomotif naik ke atas struktur yang ditabrak atau kendaraan lain sehingga meningkatkan risiko kegagalan struktural lanjutan. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menekankan bahwa kekuatan dan konfigurasi *underframe* berperan penting dalam mencegah *climbing* dan *overriding* pada tabrakan kendaraan rel [16][18][19].

Pendekatan validasi berbasis simulasi numerik yang dibandingkan dengan pengujian eksperimental juga telah banyak dilakukan dalam penelitian sebelumnya yang meningkatkan keandalan model dalam studi ini [20]. Validasi model dilakukan melalui perbandingan hasil perhitungan energi kinetik secara analitis dengan hasil simulasi numerik LS-DYNA, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Perbedaan antara kedua metode perhitungan hanya sebesar 0,0148%, yang menunjukkan tingkat akurasi model numerik yang sangat baik. Selain itu, kecenderungan penurunan energi kinetik yang diikuti peningkatan energi internal konsisten dengan teori dinamika tumbukan dan hasil simulasi kendaraan rel sebelumnya [5][14][14][21][22]. Dengan demikian, model numerik yang digunakan dalam penelitian ini dapat dianggap valid untuk mengevaluasi karakteristik *crashworthiness* lokomotif.



Gambar 4. Respons deformasi *underframe* akibat gaya angkat selama tumbukan

```

initialization completed

summary of initial penetration for interface # =      1
number of warning messages                   =     252
number of penetrating nodes                  =     252
number of penetrating node eliminated        =      0
min penetration distance                     =  0.4600000E+01
max penetration distance                     =  0.4600000E+01

summary of initial penetration for interface # =      1
number of warning messages                   =     180
number of penetrating nodes                  =     180
number of penetrating node eliminated        =      0
min penetration distance                     =  0.4600000E+01
max penetration distance                     =  0.4600000E+01

dt of cycle      1 is controlled by shell      element    29214

time..... 0.00000E+00
time step..... 1.27159E-05
kinetic energy..... 3.27525E+10
internal energy..... 1.00000E-20
spring and damper energy..... 1.00000E-20
hourglass energy..... 0.00000E+00
system damping energy..... 0.00000E+00
sliding interface energy..... 0.00000E+00
external work..... 0.00000E+00
eroded kinetic energy..... 0.00000E+00
eroded internal energy..... 0.00000E+00
eroded hourglass energy..... 0.00000E+00
total energy..... 3.27525E+10
total energy / initial energy..... 1.00000E+00
energy ratio w/o eroded energy..... 1.00000E+00
global x velocity..... -2.02797E+04
global y velocity..... 0.00000E+00
global z velocity..... 0.00000E+00
cpu time per zone cycle..... 37781 nanoseconds
average cpu time per zone cycle... 37781 nanoseconds
average clock time per zone cycle.. 9029 nanoseconds

```

Gambar 5. Output energi LS-DYNA

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa performa *crashworthiness* lokomotif sangat dipengaruhi oleh kemampuan struktur bagian depan dan *underframe* dalam mengelola energi tumbukan. Tanpa penerapan elemen CEM seperti *collision post*, *anti-climber*, dan modul penyerap energi, energi tumbukan cenderung diteruskan langsung ke kabin awak sehingga meningkatkan risiko cedera fatal. Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan konsep *crashworthiness* modern yang mengacu pada standar internasional guna meningkatkan keselamatan operasional lokomotif di Indonesia.

Hasil penelitian ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa mekanisme penyerapan energi dan distribusi deformasi memiliki pengaruh signifikan terhadap respons struktur saat tumbukan [3][5][6][16]. Prinsip desain *crashworthiness* modern juga menekankan pentingnya deformasi progresif sebagai mekanisme utama dalam pengelolaan energi tumbukan [4][9].

Namun demikian, hasil simulasi dalam penelitian ini menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi bersifat tidak terkontrol dan terlokalisasi di kabin depan yang mengindikasikan bahwa struktur lokomotif belum teroptimasi untuk menghadapi kondisi tumbukan berkecepatan tinggi. Kondisi ini menunjukkan ketidakefektifan mekanisme penyerapan energi dalam mengendalikan distribusi deformasi secara merata.

Studi terbaru juga menunjukkan bahwa penerapan sistem CEM secara signifikan dapat mengurangi gaya tumbukan dan meningkatkan keselamatan awak [9][16]. Selain itu, pendekatan terkini menunjukkan bahwa karakteristik *crashworthiness*, termasuk penyerapan energi, dapat diprediksi berdasarkan pola deformasi struktur menggunakan metode berbasis *transfer learning* sehingga memberikan perspektif baru dalam evaluasi performa struktur tanpa pengukuran langsung [23].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan MEH, dapat disimpulkan bahwa struktur lokomotif CC206, sebagaimana direpresentasikan dalam model penelitian ini, belum memiliki karakteristik *crashworthiness* yang memadai untuk kondisi tumbukan frontal berkecepatan tinggi. Pada skenario tumbukan 27,7 m/s, energi kinetik tidak dapat dikelola secara efektif sehingga menyebabkan deformasi plastis signifikan di kabin depan dan menghilangkan ruang selamat awak. Selain itu, respons struktur *underframe* menunjukkan potensi terjadinya fenomena *climbing* yang berbahaya dan berpotensi memperparah tingkat kerusakan struktural.

Hasil simulasi pada kecepatan yang lebih rendah menunjukkan penurunan tingkat kerusakan struktur yang mengindikasikan bahwa pengelolaan energi tumbukan memiliki peran penting dalam meningkatkan keselamatan awak. Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan konsep CEM melalui elemen

struktural seperti *collision post*, *anti-climber*, dan modul penyerap energi, sebagaimana direkomendasikan dalam standar *crashworthiness* internasional.

Perlu ditegaskan bahwa penelitian ini merupakan studi numerik awal yang menggunakan model representatif dengan keterbatasan data teknis aktual dari pabrikan. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh dimaksudkan untuk mengidentifikasi kecenderungan respons struktural dan mekanisme penyerapan energi, bukan sebagai evaluasi absolut terhadap desain lokomotif aktual. Temuan penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar pengembangan kajian lanjutan dengan data teknis yang lebih lengkap serta sebagai bahan pertimbangan dalam perumusan kebijakan dan standar keselamatan lokomotif di Indonesia.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik TEDC Bandung atas dukungan finansial melalui Bantuan Penelitian Dosen serta Universitas Widyatama atas fasilitas laboratorium perancangan dan desain yang digunakan dalam pelaksanaan simulasi numerik menggunakan Ansys LS-DYNA.

Daftar Pustaka

- [1] Federal Railroad Administration, *Railroad Safety Statistics Annual Report*, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA, 2010.
- [2] Z. Tang, F. J. Liu, S. H. Guo, and J. J. Zhang, "Evaluation of Coupled Finite Element/Meshfree Method for a Robust Full-Scale *Crashworthiness* Simulation of Railway Vehicles," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 4, 2016, doi: 10.1177/1687814016642954.
- [3] P. Drazetic, P. Level, D. Cornette, P. Mongenie, and Y. Ravalard, "One-dimensional Modelling of Contact Impact Problem in Guided Transport Vehicle Crash," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 467–478, 1995, doi: 10.1016/0734-743X(94)00056-3.
- [4] L. Zhang, Y. Guo, Z. Cheng, W. Dou, and S. Stichel, "Integrated Topology Optimization Method for *Crashworthiness* of Metal-FRP Hybrid Thin-Walled Tubes: A Review and Analysis," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 39, 2026, Art. no. 100046, doi: 10.1016/j.cjme.2025.100046.
- [5] T. Zhu, S. Liu, S. N. Xiao, and Q. Che, "Train Collision Dynamic Model Considering Longitudinal and Vertical Coupling," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 1, 2019, Art. no. 1687814018823966, doi: 10.1177/1687814018823966.
- [6] T. Zhu, S. Xiao, C. Lei, X. Wang, J. Zhang, and B. Yang, "Rail Vehicle *Crashworthiness* Based on Collision Energy Management: An Overview," *International Journal of Rail Transportation*, vol. 9, no. 2, pp. 101–131, 2021, doi: 10.1080/23248378.2020.1777908.
- [7] Association of American Railroads, *Locomotive Crashworthiness Requirements*, Standard S-580, Washington, DC, USA, 2008.
- [8] B. H. Li, Y. W. Liu, L. Wang, X. Q. Chen, and W. J. Zuo, "*Crashworthiness* Optimization for Frontal-End Structure of Rail Vehicle Constrained with Absorbed Energy and Crushed Displacements," *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, vol. 53, no. 4, pp. 982–988, 2023, doi: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20210824.
- [9] J. Dižo, M. Blatnický, V. Ishchuk, M. Kostrzewski, S. Semenov, and E. Mikhailov, "Passive Safety in Railway Vehicles: A Review," *Transportation Research Procedia*, vol. 74, pp. 403–410, 2023, doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.161.
- [10] P. Llana and R. Stringfellow, "Preliminary Development of Locomotive Crashworthy Components," in *Proceedings of the ASME/ASCE/IEEE Joint Rail Conference (JRC2011)*, Pueblo, CO, USA, 2011.
- [11] European Committee for Standardization, *EN 15227: Railway Applications – Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies*, Revised Edition, Brussels, Belgium, 2020.
- [12] L. Ling, M. Dhanasekar, D. Thambiratnam, and Y. Q. Sun, "Lateral Impact Derailment Mechanisms, Simulation and Analysis," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 94, pp. 36–49, 2016, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.04.001.
- [13] C. Yang, L. Zhang, Y. Lu, N. Xu, Y. Zhou, Q. Li, and Z. Ren, "State of the Art Review On The *Crashworthiness* of Railway Vehicles," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 38, Art. no. 119, 2025, doi: 10.1186/s10033-025-01287-7.
- [14] S. Xie, X. Du, H. Zhou, and Z. Feng, "Analysis of the *Crashworthiness* Design and Collision Dynamics of a Subway Train," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 234, no. 10, 2019, doi: 10.1177/0954409719880770.
- [15] Y. P. D. S. Depari, A. Syaifudin, Y. A. Handoko, A. D. Permana, Hendrato, B. Halfina, and J. M. Valentino, "*Crashworthiness* Analysis of The Impact Modules of Indonesian High-Speed Train Considering EN 15227," *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri (Journal of Industrial Research and Innovation)*, vol. 17, no. 2, pp. 33–40, 2023, doi: 10.55981/mipi.2023.1665.
- [16] S. Iwnicki, J. C. O. Nielsen, and G. Tao, "Out-of-round Railway Wheels and Polygonisation," *Vehicle System Dynamics*, 2023, doi: 10.1080/00423114.2023.2194544.
- [17] G. Belloni, A. Girotti, and A. Lo Conte, "*Crashworthiness* of Thin Walled Structures: Results of Numerical Analyses," *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, vol. 30, 2001, doi: 10.2495/CMEM010361.
- [18] T. Okino, K. Nagata, K. Horikawa, and H. Kobayashi, "Evaluation Method for *Crashworthiness* of Railway Vehicles Based on The Correlation with The Degree of Passenger Injury," *Transactions of the JSME (in Japanese)*, vol. 86, no. 881, 2020, doi: 10.1299/transjsme.19-00249.
- [19] J. J. Jiménez de Cisneros Fonfria, E. Olmeda, S. Sanz, M. Garrosa, and V. Díaz, "Failure Analysis of a Train Coach Underframe," *Engineering Failure Analysis*, vol. 156, 2024, Art. no. 107756, doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.107756.
- [20] P. Llana, R. Stringfellow, R. Mayville. Finite Element Analysis and Full-Scale Testing of Locomotive Crashworthy Components. *Proceedings of 2013 ASME/IEEE Joint Rail Conference*, Knoxville, TN, USA, April 15–18, 2013: 1–11.
- [21] International Union of Railways, *Safety Management Systems and Crashworthiness in Railway Vehicles*, Paris, France, 2021.
- [22] European Union Agency for Railways, *Technical Specifications for Interoperability – Locomotives and Passenger Rolling Stock*, Valenciennes, France, 2023.

- [23] W. Guo, P. Xu, C. Yang, J. Guo, L. Yang, and S. Yao, "Machine Learning-Based *Crashworthiness* Optimization for The Square Cone Energy-Absorbing Structure of The Subway Vehicle," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 66, no. 8, 2023, doi: 10.1007/s00158-023-03629-2.