

Evaluasi Numerik Kelaikan Tabrak Susunan Tabung Persegi Berdinding Tipis Untuk Kendaraan Rel Urban

Muhammad Khoirur Rijal^{1*}, Slamet Raharjo², Mochamad Iqbal Rokhim², Naufal Aflah Hibatullah²

¹Jurusan Teknik Mesin, Program Studi Teknik Aeronautika, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Program Studi Teknik Perancangan dan Konstruksi Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

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

(*: corresponding author)

Abstrak — Komponen penyerap energi pada *crash zone* kendaraan rel perlu memiliki kemampuan penyerapan energi yang tinggi dengan tetap membatasi gaya yang diteruskan ke struktur penopang. Penelitian ini mengevaluasi susunan tabung persegi aluminium berdinding tipis sebagai modul penyerap energi untuk kendaraan rel urban ringan pada tingkat komponen. Tujuh konfigurasi yang menggunakan profil ekstrusi komersial dievaluasi secara analitik, kemudian konfigurasi terpilih dianalisis menggunakan metode elemen hingga dinamik eksplisit. Kasus desain menggunakan massa ekuivalen 9.000 kg dan kecepatan awal 7,0 m/s, dengan energi kinetik awal sebesar 220,5 kJ. Hasil penyaringan menghasilkan konfigurasi enam tabung aluminium 6063-T6 berukuran 76,2 × 76,2 × 1,95 mm dengan panjang 964 mm. Simulasi satu tabung menunjukkan pola pelipatan progresif dengan gaya puncak 68 kN dan gaya hancur rata-rata 35 kN, yang berbeda 2,0% terhadap prediksi analitik. Pada konfigurasi enam tabung diperoleh gaya puncak 402 kN, gaya hancur rata-rata 208 kN, dan efisiensi gaya hancur 0,52. Modul mampu menyerap energi sebesar 150 kJ atau sekitar 68% dari energi kinetik awal, dengan energi terserap spesifik sebesar 16,5 kJ/kg. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai salah satu komponen penyerap energi kendaraan rel urban. Namun, validasi eksperimental, pemodelan struktur penopang yang dapat berdeformasi, dan evaluasi kondisi tumbukan nonaksial masih diperlukan untuk menilai kinerjanya pada tingkat kendaraan secara keseluruhan.

Kata Kunci: Kelaikan Tabrak; Tabung Persegi Berdinding Tipis; Kendaraan Rel Urban; Metode Elemen Hingga; Penyerapan Energi

Abstract — Energy absorbers in railway vehicle crash zones should provide sufficient energy-absorption capacity while limiting the forces transmitted to the supporting structure. This study evaluates an array of thin-walled aluminium square tubes as an energy-absorbing module for a light urban rail vehicle at the component level. Seven configurations based on commercially available extrusions were evaluated analytically, followed by explicit dynamic finite-element analysis of the selected configuration. The design case used an equivalent mass of 9,000 kg and an initial velocity of 7.0 m/s, corresponding to an initial kinetic energy of 220.5 kJ. The screening process resulted in a configuration consisting of six 6063-T6 aluminium tubes with dimensions of 76.2 × 76.2 × 1.95 mm and a length of 964 mm. The single-tube simulation exhibited progressive folding with a peak crushing force of 68 kN and a mean crushing force of 35 kN, with the latter differing by 2.0% from the analytical prediction. For the six-tube configuration, the peak crushing force and mean crushing force were 402 kN and 208 kN, respectively, with a crush-force efficiency of 0.52. The module absorbed 150 kJ, corresponding to approximately 68% of the initial kinetic energy, and achieved a specific energy absorption of 16.5 kJ/kg. The results indicate that the proposed configuration has potential as an energy-absorbing component for urban rail vehicles. However, experimental validation, deformable supporting-structure modelling, and evaluation under non-axial impact conditions are required before its performance can be assessed at the full-vehicle level.

Keywords: Crashworthiness; Thin-Walled Square Tube; Urban Rail Vehicle; Finite Element Method; Energy Absorption

1. PENDAHULUAN

Kelaikan tabrak kendaraan rel merupakan bagian dari sistem keselamatan pasif yang bertujuan melindungi ruang penumpang dan mengurangi dampak tumbukan. Standar EN 15227:2020+A1:2024 mengatur persyaratan kelaikan tabrak untuk berbagai jenis kendaraan rel, seperti lokomotif, kendaraan penggerak, trem, metro, dan kereta penumpang. Pemenuhan persyaratan tersebut dapat dibuktikan melalui perbandingan dengan desain yang telah teruji,

simulasi numerik, pengujian komponen, maupun pengujian skala penuh (European Committee for Standardization, 2024). Selain itu, kekuatan struktur dasar badan kendaraan diatur dalam EN 12663-1:2010+A2:2023 (European Committee for Standardization, 2023). Oleh karena itu, analisis komponen penyerap energi merupakan bagian dari evaluasi kelaikan tabrak kendaraan secara keseluruhan.

Pada saat terjadi tumbukan, energi benturan tidak hanya diserap oleh satu komponen, tetapi didistribusikan ke beberapa bagian struktur kendaraan, seperti *coupler*, *crash box*, *anti-climber*, dan struktur ujung kendaraan. Karakteristik setiap komponen tersebut memengaruhi pola deformasi dan kemampuan kendaraan dalam menyerap energi tumbukan. Penelitian pada kereta cepat Indonesia menunjukkan bahwa posisi *anti-climber* dan karakteristik gaya pada *crash box* berpengaruh terhadap kemampuan penyerapan energi (Rizal & Syaifudin, 2023). Hasil serupa juga ditunjukkan melalui pengujian model berskala dan simulasi kendaraan penumpang, yang menekankan pentingnya pengaturan kapasitas dan urutan kerja setiap komponen penyerap energi (Lu et al., 2022). Penelitian lain mengenai kecelakaan metro dan pengembangan struktur penyerap energi juga menunjukkan bahwa kinerja suatu komponen perlu dianalisis dengan mempertimbangkan interaksinya dengan struktur kendaraan secara keseluruhan (Wang et al., 2023; Wei et al., 2021; Yang et al., 2023).

Tabung berdinding tipis banyak digunakan sebagai penyerap energi tumbukan karena mampu mengalami deformasi plastis secara progresif dan menyerap energi dengan massa yang relatif ringan. Meskipun demikian, desain tabung perlu mempertimbangkan beberapa aspek, seperti tingginya gaya puncak pada awal tumbukan, kemungkinan terjadinya ketidakstabilan struktur, serta perubahan respons akibat variasi material dan arah tumbukan. Salah satu cara untuk mengendalikan proses deformasi adalah dengan menambahkan pemicu lipatan (*crush initiator*), misalnya berupa lubang, takikan, atau perubahan geometri lokal. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pemicu tersebut dapat mengurangi gaya puncak dan menghasilkan proses pelipatan yang lebih terkendali (Hafid et al., 2023; Jimenez-Armendariz et al., 2023; Karantza & Manolacos, 2022; Rogala & Gajewski, 2023; Taghipoor et al., 2022). Kinerja penyerap energi kemudian dapat dievaluasi menggunakan beberapa parameter, antara lain gaya penghancuran rata-rata (*mean crushing force*, MCF) dan penyerapan energi spesifik (*specific energy absorption*, SEA).

Untuk tahap awal perancangan, persamaan analitik berdasarkan mekanisme pelipatan tabung masih dapat digunakan untuk memperkirakan respons struktur (Abramowicz & Jones, 1984; Jones, 2012). Namun, simulasi numerik yang lebih rinci perlu mempertimbangkan karakteristik material aluminium yang digunakan, termasuk kemungkinan pengaruh anisotropi dan proses ekstrusi terhadap respons material (Kohar et al., 2017). Dalam konteks kendaraan rel, analisis penyerap energi selanjutnya perlu dikaitkan dengan sistem manajemen energi tumbukan kendaraan secara keseluruhan. Kajian terbaru menunjukkan bahwa evaluasi kelaikan tabrak kendaraan rel melibatkan interaksi antara material, perangkat penyerap energi, struktur kendaraan, simulasi, dan pengujian (Yang et al., 2025). Pendekatan optimasi juga mulai dikembangkan untuk mengatur distribusi energi tumbukan secara lebih efektif, termasuk dengan memanfaatkan metode pembelajaran mesin (Zheng et al., 2024).

Penelitian ini berfokus pada perancangan awal komponen penyerap energi untuk kendaraan rel urban ringan. Tabung yang digunakan dipilih dari profil yang tersedia secara komersial, dengan mempertimbangkan kemampuan menyerap energi tumbukan, gaya yang diteruskan ke struktur penopang, serta ruang yang tersedia untuk proses deformasi. Penelitian dilakukan melalui tiga tahap, yaitu (1) membandingkan tujuh konfigurasi susunan tabung menggunakan perhitungan analitik, (2) mengevaluasi respons satu tabung dan konfigurasi terpilih menggunakan simulasi dinamik eksplisit, dan (3) mengevaluasi kinerja berdasarkan *peak crushing force* (PCF), *mean crushing force* (MCF), *crush-force efficiency* (CFE), energi terserap, *specific energy absorption* (SEA), perlambatan impaktor, dan keseimbangan energi. Penelitian ini dibatasi pada evaluasi tingkat komponen sehingga hasil yang diperoleh tidak dimaksudkan untuk menyatakan pemenuhan persyaratan kelaikan tabrak kendaraan secara keseluruhan berdasarkan EN 15227.

2. METODE

2.1 Kasus Desain dan Kriteria Penyaringan

Kasus desain menggunakan massa ekuivalen kendaraan sebesar 9.000 kg dan kecepatan awal 7,0 m/s (sekitar 25 km/jam). Kedua nilai tersebut digunakan sebagai parameter desain dalam penelitian ini untuk menentukan energi tumbukan yang harus diserap oleh komponen. Energi kinetik awal dihitung menggunakan Persamaan (1).

Struktur penopang pada desain konseptual memiliki kapasitas acuan sebesar 200 kN berdasarkan uji tekan statik. Pada tahap penyaringan awal, MCF susunan tabung dibatasi sebesar 220 kN atau 110% dari kapasitas acuan tersebut. Nilai 220 kN digunakan sebagai batas desain internal dalam pemilihan konfigurasi dan tidak dimaksudkan sebagai batas kekuatan dinamik struktur maupun sebagai persyaratan yang ditetapkan dalam EN 15227.

$$E_k = \frac{1}{2} Mv^2 \quad (1)$$

Tabel 1. Parameter kasus desain konseptual

Parameter	Nilai	Satuan
Massa ekuivalen, M	9.000	kg
Kecepatan awal, v	7,0	m/s
Energi kinetik awal, E_k	220,5	kJ
Panjang tabung, L	964	mm
Panjang efektif, L_{eff}	0,73 $L = 704$	mm
Acuan uji tekan dudukan	200	kN
Batas penyaringan internal MCF	220	kN

Tujuh konfigurasi penyerap energi disusun menggunakan profil aluminium ekstrusi yang tersedia secara komersial dari PT Alexindo. Pada tahap penyaringan awal, MCF setiap tabung dihitung secara analitik berdasarkan mekanisme pelipatan tabung persegi yang dikembangkan oleh Abramowicz dan Jones (Abramowicz & Jones, 1984). Energi yang dapat diserap kemudian diestimasi berdasarkan MCF, jumlah tabung, dan panjang deformasi efektif. Selanjutnya, SEA dan CFE digunakan sebagai parameter tambahan untuk mengevaluasi kinerja masing-masing konfigurasi.

Persamaan yang digunakan dalam perhitungan analitik ditunjukkan pada Persamaan (2)–(4), dengan σ_0 sebagai tegangan alir, t sebagai tebal dinding, b sebagai panjang sisi tabung, N sebagai jumlah tabung, m sebagai massa modul, dan P_p sebagai gaya puncak.

$$P_m = 13\sigma_0 t^{5/3} b^{1/3} \quad (2)$$

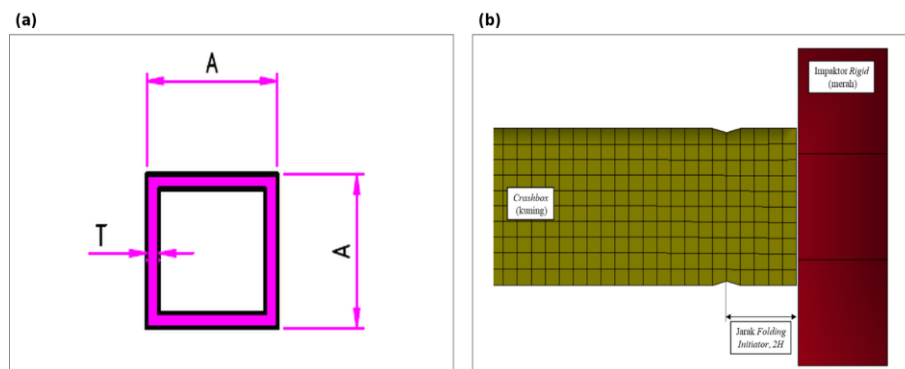
$$E_{abs} = NP_m L_{eff}; \quad L_{eff} = 0,73L \quad (3)$$

$$SEA = E_{abs} / m; \quad CFE = P_m / P_p \quad (4)$$

Tabel 2. Hasil penyaringan analitik tujuh konfigurasi

No.	$b \times t$ (mm)	N	Massa (kg)	MCF (kN)	E terserap (kJ)	SEA (kJ/kg)
1	$50,8 \times 2,60$	4	5,24	193,5	136,1	26,0

No.	$b \times t$ (mm)	N	Massa (kg)	MCF (kN)	E terserap (kJ)	SEA (kJ/kg)
2	$50,0 \times 2,00$	6	6,02	186,5	131,2	21,8
3	$50,8 \times 2,00$	6	6,12	187,4	131,9	21,6
4	$50,0 \times 1,70$	8	6,86	189,6	133,4	19,4
5	$76,2 \times 1,95$	6	9,08	205,6	144,7	16,0
6	$60,0 \times 1,50$	10	9,17	204,4	143,8	15,7
7	$76,2 \times 1,40$	10	10,94	197,3	138,9	12,7



Gambar 1. Geometri tabung: (a) definisi sisi b dan tebal t ; (b) pemicu lipatan lokal pada tabung terpilih.

2.2 Model Material dan Elemen Hingga

Model elemen hingga dibuat menggunakan LS-PrePost dan dianalisis menggunakan *solver* dinamik eksplisit pada LS-DYNA. Tabung dimodelkan menggunakan elemen *shell* dengan ukuran elemen 7,8 mm, sedangkan impaktor, pelat penghubung, dan dudukan dimodelkan sebagai komponen *rigid* dengan ukuran elemen sekitar 50 mm. Ukuran elemen pada tabung ditentukan sekitar empat kali ketebalan dinding tabung terpilih. Kajian sensitivitas *mesh* juga dilakukan dengan memperkecil ukuran elemen hingga 2 mm. Namun, perubahan ukuran elemen tidak menunjukkan kecenderungan konvergensi yang konsisten terhadap hasil analitik. Oleh karena itu, perbandingan MCF antara hasil numerik dan analitik dalam penelitian ini digunakan sebagai pemeriksaan konsistensi model dan bukan sebagai validasi eksperimental.

Aluminium 6063-T6 dimodelkan menggunakan MAT_POWER_LAW_PLASTICITY (MAT_018). Model Cowper–Symonds digunakan untuk memperhitungkan pengaruh laju regangan, dengan parameter $C = 6.500 \text{ s}^{-1}$ dan $p = 4$ mengacu pada Jones (2012). Hubungan pengerasan material dinyatakan dengan $\sigma = K\epsilon^n$, sedangkan parameter material lainnya ditunjukkan pada Tabel 3. Karena pengujian tarik dan karakterisasi laju regangan pada material aluminium yang digunakan tidak dilakukan dalam penelitian ini, parameter material yang digunakan dalam simulasi menjadi salah satu keterbatasan model numerik.

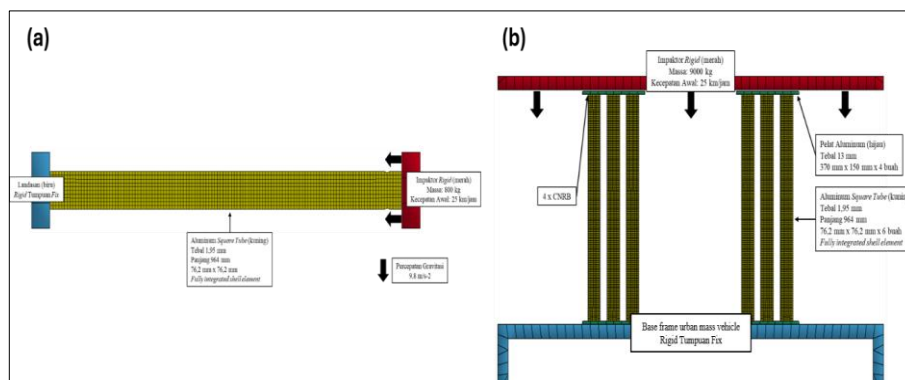
Tabel 3. Parameter material aluminium 6063-T6 pada model

Parameter	Nilai	Satuan
Densitas, ρ	2.700	kg/m ³
Modulus elastisitas, E	67,9	GPa
Rasio Poisson, ν	0,34	-
Tegangan luluh	170	MPa
Koefisien pengerasan, K	310	MPa
Eksponen pengerasan, n	0,125	-
Cowper-Symonds, C	6.500	s ⁻¹
Cowper-Symonds, p	4	-

2.3 Kontak, Kondisi Batas, dan Skenario Simulasi

Kontak antartabung dan pelat selama proses deformasi dimodelkan menggunakan CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE dengan koefisien gesek statik dan dinamik aluminium–aluminium masing-masing sebesar 0,30 dan 0,20. Kontak antara impactor baja dan tabung aluminium dimodelkan menggunakan CONTACT_NODE_TO_SURFACE dengan koefisien gesek statik dan dinamik masing-masing sebesar 0,61 dan 0,47. Ujung bawah tabung dihubungkan secara kaku dengan pelat dan dudukan menggunakan CONSTRAIN_NODAL_RIGID_BODY. Gerak impactor dibatasi hanya pada arah aksial tabung, sedangkan dudukan bawah ditahan pada seluruh derajat kebebasan.

Simulasi dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama menggunakan impactor bermassa 800 kg untuk mengevaluasi pola deformasi satu tabung dan mengamati kemungkinan terjadinya pembengkokan global. Tahap kedua menggunakan impactor kaku dengan massa 9.000 kg untuk mengevaluasi respons susunan enam tabung. Pada kedua tahap, kecepatan awal impactor ditetapkan sebesar 7,0 m/s. Tabung yang dipilih memiliki dimensi $b = 76,2$ mm, $t = 1,95$ mm, dan $L = 964$ mm. Pemicu lipatan ditempatkan pada jarak $2H = 34,5$ mm dari ujung tabung dan dibuat pada dua sisi yang saling berseberangan dengan menggeser nodal sebesar 2 mm ke arah dalam.



Gambar 2. Model tumbukan aksial: (a) pemeriksaan satu tabung; (b) skema generik susunan enam tabung pada kendaraan rel urban ringan konseptual.

2.4 Metrik Evaluasi dan Verifikasi Numerik

Gaya puncak ditentukan dari nilai maksimum awal pada kurva gaya–perpindahan. MCF dihitung pada daerah pelipatan progresif sebelum terjadi densifikasi atau sebelum panjang deformasi efektif tercapai. Energi terserap diperoleh dari integral kurva gaya–perpindahan, sedangkan SEA dihitung sebagai rasio energi terserap terhadap massa modul. CFE dihitung dari rasio MCF terhadap gaya puncak. Perlambatan yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan perlambatan impaktor dan tidak merepresentasikan perlambatan yang dialami penumpang.

Pemeriksaan model numerik dilakukan dengan membandingkan MCF hasil simulasi terhadap hasil perhitungan analitik, memeriksa kesesuaian energi kinetik awal dengan Persamaan (1), serta mengevaluasi keseimbangan energi selama simulasi. Energi *hourglass* dijaga di bawah 5% dari energi total sebagai salah satu indikator kualitas hasil simulasi.

Data geometri, parameter model, dan hasil simulasi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari tugas sarjana penulis pertama yang dilakukan pada tahun 2018 (Rijal, 2018). Data tersebut belum pernah dipublikasikan dalam bentuk artikel jurnal. Pada penelitian ini, data dianalisis kembali dalam konteks desain penyerap energi tingkat komponen untuk kendaraan rel urban, dengan penambahan parameter evaluasi CFE serta pembaruan literatur dan standar yang relevan. Tidak dilakukan simulasi ulang maupun pengujian eksperimental tambahan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemilihan Konfigurasi

Seluruh konfigurasi yang dianalisis menghasilkan MCF susunan di bawah batas penyaringan sebesar 220 kN. Model 1 memiliki SEA analitik tertinggi, tetapi energi yang dapat diserap hanya sebesar 136,1 kJ. Selain itu, jumlah tabung yang lebih sedikit membuat konfigurasi ini lebih rentan terhadap pembengkokan pada tabung yang panjang. Berdasarkan penyaringan awal, Model 5 dan Model 7 menunjukkan kestabilan yang lebih baik dibandingkan konfigurasi lainnya. Model 5 kemudian dipilih karena memiliki estimasi energi terserap yang lebih tinggi, yaitu 144,7 kJ dibandingkan 138,9 kJ pada Model 7. Model 5 juga memiliki SEA yang lebih tinggi, yaitu 16,0 kJ/kg dibandingkan 12,7 kJ/kg, serta hanya memerlukan enam sambungan tabung dibandingkan sepuluh sambungan pada Model 7. Dengan demikian, pemilihan Model 5 tidak hanya didasarkan pada massa atau SEA tertinggi, tetapi juga mempertimbangkan kemampuan menyerap energi, kestabilan tabung, dan kemudahan pemasangan pada struktur penopang.

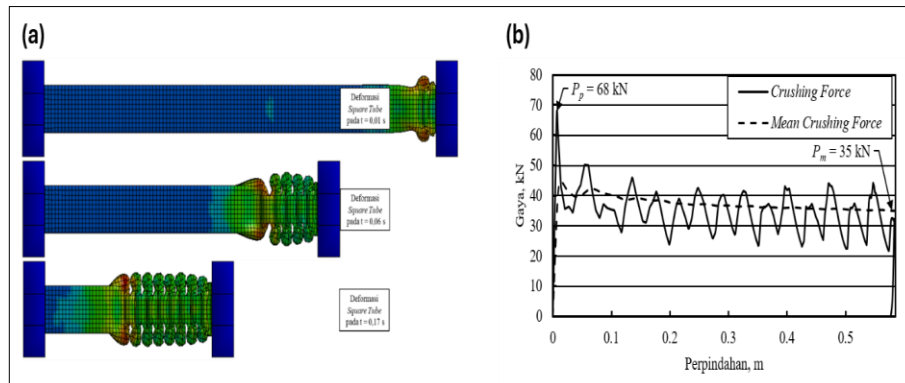
Hasil penyaringan tersebut diperoleh berdasarkan kondisi pembebanan aksial. Pada kondisi tumbukan yang tidak sepenuhnya aksial, respons tabung dapat berubah akibat sudut tumbukan dan kondisi kontak awal (Karantza & Manolacos, 2022). Penambahan pemicu lipatan (*trigger*) juga dapat membantu mengurangi gaya puncak, tetapi ukuran dan posisi pemicu dapat memengaruhi MCF, SEA, dan CFE (Hafid et al., 2023; Jimenez-Armendariz et al., 2023; Rogala & Gajewski, 2023; Taghipoor et al., 2022). Oleh karena itu, posisi pemicu sebesar 34,5 mm yang digunakan dalam penelitian ini merupakan bagian dari konfigurasi yang dievaluasi dan belum dapat dianggap sebagai geometri yang paling optimal.

3.2 Respons Satu Tabung

Deformasi satu tabung menunjukkan pola pelipatan lokal yang berkembang secara progresif dari ujung yang diberi pemicu. Hingga akhir simulasi, tabung tidak menunjukkan pembengkokan global. Kurva gaya–perpindahan menghasilkan gaya puncak sebesar 68 kN dan MCF sebesar 35 kN. Setelah mencapai gaya puncak, gaya berfluktuasi seiring dengan pembentukan lipatan pada tabung.

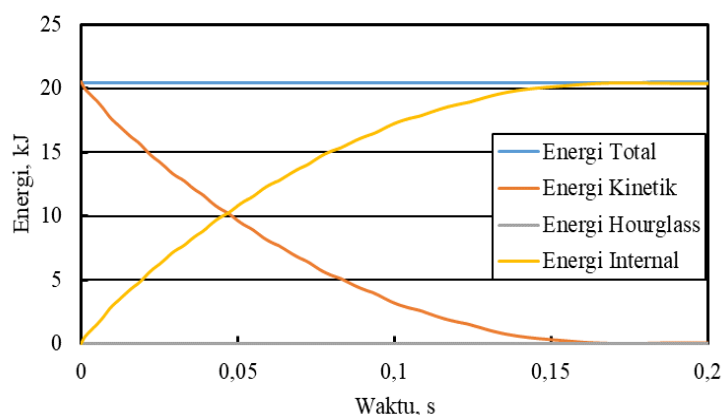
MCF hasil simulasi mendekati prediksi analitik sebesar 34,3 kN, dengan selisih sekitar 2,0%. Nilai CFE yang diperoleh sebesar 0,51. Kesesuaian nilai MCF dan terbentuknya pola pelipatan progresif menunjukkan bahwa model numerik dapat merepresentasikan respons tabung pada pembebanan aksial yang dianalisis. Namun, hasil ini belum dapat dianggap sebagai validasi

eksperimental karena beberapa kondisi aktual, seperti ketidaksempurnaan geometri, toleransi profil hasil ekstrusi, sambungan, dan kemungkinan terjadinya fraktur, belum dimodelkan.



Gambar 3. Respons satu tabung: (a) perkembangan lipatan progresif; (b) kurva gaya-perpindahan dan MCF.

Energi total pada model satu tabung tetap berada di sekitar 20 kJ selama simulasi. Seiring terjadinya deformasi, energi kinetik impaktor berkurang dan sebagian besar berubah menjadi energi internal akibat deformasi tabung. Energi *hourglass* tetap berada jauh di bawah 5% dari energi total. Keseimbangan energi tersebut menunjukkan bahwa model memiliki kestabilan numerik yang baik selama proses simulasi. Meskipun demikian, pemeriksaan keseimbangan energi hanya menunjukkan konsistensi numerik model dan belum membuktikan keakuratan pemodelan material maupun kontak. Validasi lebih lanjut tetap memerlukan perbandingan dengan hasil pengujian eksperimental.



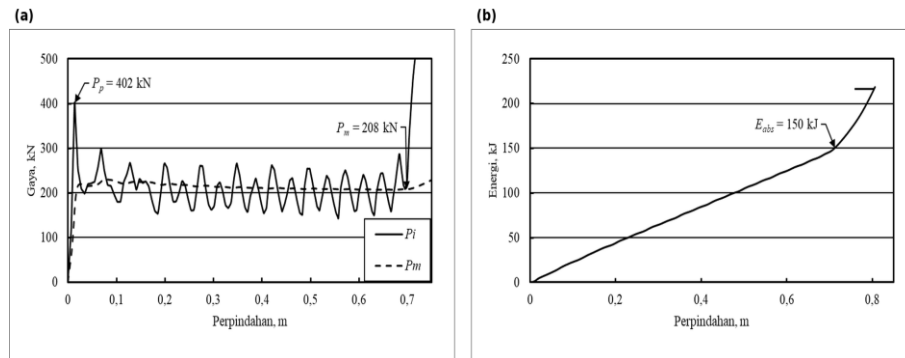
Gambar 4. Riwayat energi pada simulasi satu tabung.

3.3 Respons Susunan Enam Tabung

Susunan enam tabung menghasilkan gaya puncak sebesar 402 kN pada awal tumbukan dan MCF sebesar 208 kN selama proses pelipatan progresif. Nilai CFE sebesar 0,52 menunjukkan bahwa gaya puncak masih jauh lebih tinggi dibandingkan gaya rata-rata selama proses deformasi. MCF hasil simulasi mendekati prediksi analitik sebesar 205,6 kN, dengan selisih sekitar 1,2%. Meskipun MCF masih berada di bawah batas penyaringan internal sebesar 220 kN, nilainya sedikit lebih tinggi daripada kapasitas acuan struktur penopang sebesar 200 kN. Selain itu, gaya puncak sebesar 402 kN jauh melebihi nilai acuan tersebut. Hasil ini menunjukkan bahwa respons struktur penopang dan sambungan perlu dipertimbangkan lebih lanjut karena pada model numerik keduanya masih diasumsikan sebagai struktur kaku.

Sebelum terjadi densifikasi, susunan tabung mampu menyerap energi sekitar 150 kJ atau 68% dari energi kinetik awal sebesar 220,5 kJ. Dengan massa modul 9,08 kg, SEA yang dihasilkan

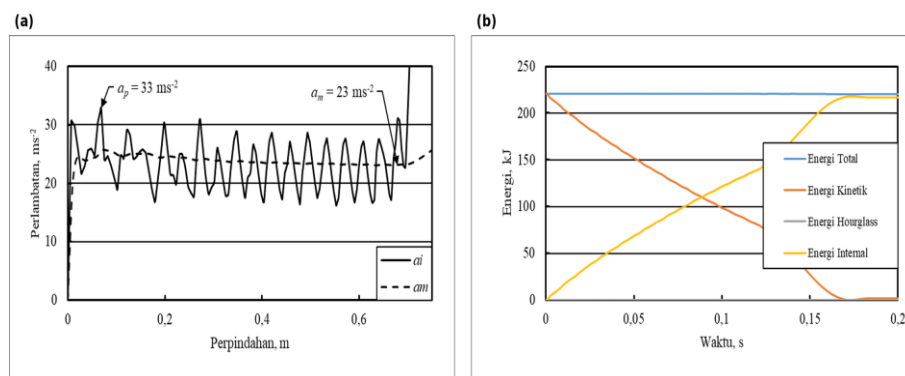
sebesar 16,5 kJ/kg, sedikit lebih tinggi dibandingkan estimasi analitik sebesar 16,0 kJ/kg. Ketika perpindahan mendekati 0,70 m, gaya dan energi internal meningkat tajam karena tabung telah mendekati batas panjang deformasi efektif dan mulai mengalami densifikasi. Dengan demikian, sekitar 70,5 kJ energi tumbukan masih perlu diserap oleh komponen penyerap energi lainnya atau diteruskan ke struktur kendaraan. Hasil ini menunjukkan bahwa susunan tabung yang dianalisis dapat berfungsi sebagai salah satu bagian dari sistem penyerapan energi kendaraan, tetapi belum dapat digunakan sebagai satu-satunya komponen untuk menyerap seluruh energi tumbukan (Lu et al., 2022; Rizal & Syaifudin, 2023).



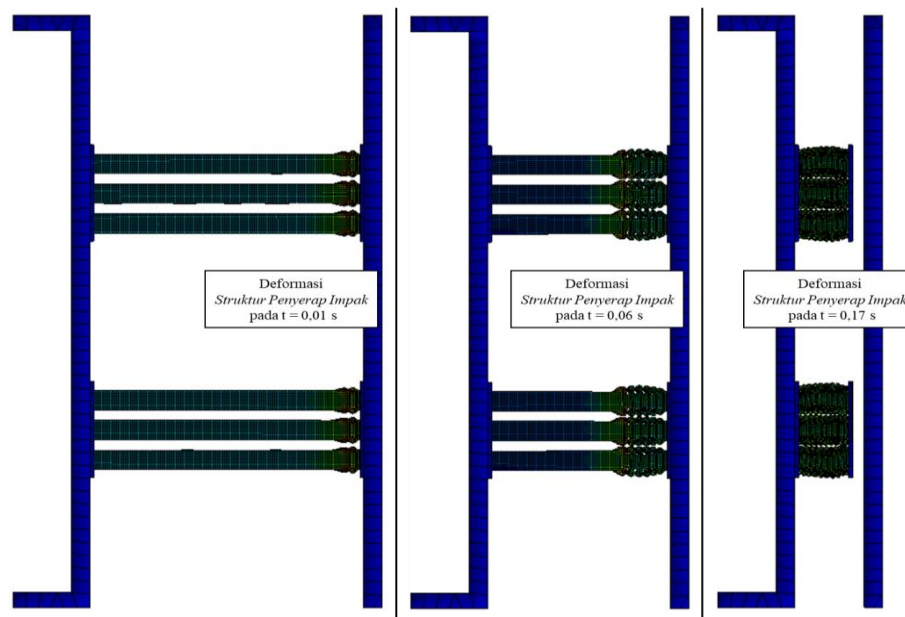
Gambar 5. Respons susunan enam tabung: (a) gaya dan MCF terhadap perpindahan; (b) energi terserap hingga densifikasi.

Perlambatan rata-rata impaktor selama tumbukan adalah 23 m/s^2 atau sekitar 2,3 g, dengan nilai puncak sekitar 33 m/s^2 . Nilai tersebut merupakan respons impaktor pada model tingkat komponen dan tidak dapat langsung dianggap sebagai perlambatan yang dialami ruang penumpang. Model yang digunakan belum mencakup keseluruhan kendaraan, seperti distribusi massa, *coupler*, struktur ujung kendaraan, sambungan, interior, dan interaksi dengan penumpang. Evaluasi kelayakan tabrak berdasarkan EN 15227 dilakukan pada skenario dan model kendaraan yang lebih lengkap (European Committee for Standardization, 2024). Oleh karena itu, nilai perlambatan yang diperoleh dalam penelitian ini hanya digunakan untuk mengevaluasi respons konfigurasi penyerap energi yang dianalisis.

Energi kinetik awal pada model numerik sebesar 220,502 kJ, sedangkan hasil perhitungan analitik sebesar 220,500 kJ, dengan perbedaan sekitar 0,001%. Selama simulasi, energi total relatif konstan dan energi *hourglass* tetap berada di bawah 5% dari energi total. Kesesuaian energi kinetik awal, keseimbangan energi, dan kedekatan MCF numerik dengan hasil analitik menunjukkan konsistensi numerik model. Namun, hasil simulasi tetap dipengaruhi oleh beberapa penyederhanaan. Penggunaan dudukan kaku dapat memengaruhi respons gaya, terutama ketika tabung mulai mengalami densifikasi, sedangkan model material yang tidak memperhitungkan fraktur berpotensi menghasilkan estimasi energi terserap yang lebih tinggi pada deformasi yang besar.



Gambar 6. Hasil susunan enam tabung: (a) perlambatan impaktor; (b) riwayat energi model.



Gambar 7. Perkembangan deformasi susunan enam tabung pada 0,01 s, 0,06 s, dan 0,16 s.

Tabel 4. Ringkasan hasil dan verifikasi numerik

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
MCF satu tabung - analitik	34,3	kN	-
MCF satu tabung - numerik	35,0	kN	Selisih 2,0%
Gaya puncak satu tabung	68	kN	CFE = 0,51
MCF susunan - analitik	205,6	kN	-
MCF susunan - numerik	208	kN	Selisih 1,2%
Gaya puncak susunan	402	kN	CFE = 0,52
Energi terserap	150	kJ	68% dari E_k
SEA	16,5	kJ/kg	-
Perlambatan rata-rata impaktor	2,3	g	Bukan kabin penumpang
Energi awal numerik	220,502	kJ	Selisih 0,001%

3.4 Keterbatasan dan Implikasi Desain

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, simulasi hanya dilakukan pada tumbukan aksial sehingga pengaruh tumbukan miring, *offset*, dan kemungkinan terjadinya *overriding* belum dievaluasi. Kedua,udukan dan impaktor dimodelkan sebagai benda *rigid* sehingga deformasi serta distribusi gaya pada *underframe* kendaraan belum dapat diamati. Ketiga, parameter material mengacu pada literatur tanpa pengujian langsung terhadap profil aluminium yang digunakan. Pengaruh fraktur dan sambungan las juga belum dimasukkan dalam model. Keempat, pemeriksaan model dilakukan melalui perbandingan dengan perhitungan analitik dan keseimbangan

energi, tanpa validasi menggunakan data eksperimen. Oleh karena itu, hasil penelitian ini terutama ditujukan untuk pemilihan awal konfigurasi penyerap energi dan belum dapat digunakan untuk menilai kelaikan tabrak kendaraan secara keseluruhan.

Penelitian selanjutnya dapat dilakukan melalui pengujian kuasi-statik dan uji tumbuk pada satu tabung untuk mengevaluasi karakteristik material, geometri dan posisi pemacu lipatan (*trigger*), kondisi kontak, serta pengaruh ketidaksempurnaan geometri. Konfigurasi terpilih selanjutnya dapat diintegrasikan dengan model *underframe* kendaraan yang lebih representatif serta dianalisis bersama komponen lain, seperti *coupler* dan *anti-climber*. Evaluasi juga perlu diperluas pada kondisi tumbukan aksial, *offset*, dan miring dengan mempertimbangkan MCF, PCF, CFE, SEA, ruang selamat (*survival space*), dan perlambatan kendaraan. Pendekatan secara bertahap dari tingkat komponen hingga kendaraan secara keseluruhan sejalan dengan penelitian terkini mengenai manajemen energi tumbukan pada kendaraan rel (Lu et al., 2022; Rizal & Syaifudin, 2023; Wang et al., 2023; Wei et al., 2021; Yang et al., 2023).

4. KESIMPULAN

Penyaringan analitik menghasilkan konfigurasi terpilih berupa enam tabung aluminium 6063-T6 berukuran $76,2 \times 76,2 \times 1,95$ mm dengan panjang 964 mm. Konfigurasi tersebut dipilih dengan mempertimbangkan kemampuan menyerap energi, MCF, kestabilan aksial, dan jumlah sambungan.

Simulasi menunjukkan bahwa tabung mampu mengalami pelipatan progresif sesuai dengan mekanisme yang diharapkan. Pada model satu tabung diperoleh gaya puncak sebesar 68 kN, MCF 35 kN, dan CFE 0,51, dengan perbedaan MCF sebesar 2,0% terhadap hasil analitik. Pada susunan enam tabung, energi yang dapat diserap mencapai 150 kJ dengan SEA sebesar 16,5 kJ/kg. Namun, gaya puncak mencapai 402 kN dan MCF sebesar 208 kN, yang menunjukkan bahwa gaya yang diteruskan ke struktur penopang masih perlu diperhatikan.

Kesesuaian MCF numerik dengan hasil analitik serta keseimbangan energi selama simulasi menunjukkan konsistensi model numerik untuk evaluasi awal pada tingkat komponen. Meskipun demikian, modul hanya menyerap sekitar 68% dari energi kinetik awal sehingga energi yang tersisa perlu ditangani oleh struktur atau komponen penyerap energi lainnya. Dengan demikian, konfigurasi yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai salah satu komponen penyerap energi pada kendaraan rel urban, tetapi belum dapat dinilai secara terpisah sebagai sistem kelaikan tabrak kendaraan secara keseluruhan.

Pengembangan selanjutnya perlu mencakup validasi eksperimental, karakterisasi material, pemodelan struktur *underframe* yang dapat berdeformasi, serta evaluasi pada kondisi tumbukan miring dan *offset* sebelum kinerja sistem dapat dievaluasi pada tingkat kendaraan.

PERNYATAAN DATA DAN ETIKA PUBLIKASI

Data geometri, model numerik, dan hasil simulasi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari tugas sarjana penulis pertama yang dilakukan pada tahun 2018 (Rijal, 2018) dan belum pernah dipublikasikan dalam bentuk artikel jurnal. Data pendukung penelitian dapat diperoleh dari penulis korespondensi berdasarkan permintaan yang wajar. Selain itu, penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan terkait penelitian dan publikasi artikel ini.

REFERENCES

- Abramowicz, W., & Jones, N. (1984). Dynamic axial crushing of square tubes. *International Journal of Impact Engineering*, 2(2), 179–208. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(84\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0734-743X(84)90005-8)
- European Committee for Standardization. (2023). *Railway applications—Structural requirements of railway vehicle bodies—Part 1: Locomotives and passenger rolling stock* (EN 12663-1:2010+A2:2023).
- European Committee for Standardization. (2024). *Railway applications—Crashworthiness requirements for rail vehicles* (EN 15227:2020+A1:2024).
- Hafid, M., Istiyanto, J., & Nasruddin, N. (2023). Multiobjective optimization of dimension and position of elliptical crush initiator on crashworthiness performance of square tube using response surface

- methodology. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 9, Article 1273447. <https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1273447>
- Jimenez-Armendariz, J., Jimenez-Martinez, M., Varela-Soriano, J., Santana Diaz, A., & Perez-Santiago, R. (2023). Energy dissipation enhancement of thin-walled 6063 T5 aluminium tubes by combining a triggering mechanism and heat treatment. *Metals*, 13(5), Article 922. <https://doi.org/10.3390/met13050922>
- Jones, N. (2012). *Structural impact* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Karantza, K. D., & Manolakos, D. E. (2022). Crashworthiness analysis of square aluminum tubes subjected to oblique impact: Experimental and numerical study on the initial contact effect. *Metals*, 12(11), Article 1862. <https://doi.org/10.3390/met12111862>
- Kohar, C. P., Brahme, A., Imbert, J., Mishra, R. K., & Inal, K. (2017). Effects of coupling anisotropic yield functions with the optimization process of extruded aluminum front rail geometries in crashworthiness. *International Journal of Solids and Structures*, 128, 174–198. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.08.026>
- Lu, S., Wang, P., Ni, W., Yan, K., Zhao, S., Yang, C., & Xu, P. (2022). Energy absorption design for crash energy management passenger trains based on scaled model. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65, Article 2. <https://doi.org/10.1007/s00158-021-03116-6>
- PT Alexindo. (n.d.). *Katalog profil aluminium ekstrusi*.
- Rijal, M. K. (2018). *Pemilihan modul penyerap impact dan perancangan awal crash zone area Metro Kapsul* [Undergraduate thesis, Institut Teknologi Bandung].
- Rizal, K., & Syaifudin, A. (2023). Evaluation of crash energy management of the first-developed high-speed train in Indonesia. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 55(3), 235–246. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2023.55.3.2>
- Rogala, M., & Gajewski, J. (2023). Crashworthiness analysis of thin-walled square columns with a hole trigger. *Materials*, 16(11), Article 4196. <https://doi.org/10.3390/ma16114196>
- Taghipoor, H., Ghiaskar, A., & Shavalipour, A. (2022). Crashworthiness performance of thin-walled, square tubes with circular hole discontinuities under high-speed impact loading. *International Journal of Crashworthiness*, 27, 1622–1634. <https://doi.org/10.1080/13588265.2021.1981125>
- Wang, D., Xu, P., Yang, C., Yao, S., & Liu, Z. (2023). Crashworthiness performance of gradient energy-absorbing structure for subway vehicles under quasi-static loading. *Electronic Research Archive*, 31(6), 3568–3593. <https://doi.org/10.3934/era.2023181>
- Wei, L., Zhang, L., Tong, X., & Cui, K. (2021). Crashworthiness study of a subway vehicle collision accident based on finite-element methods. *International Journal of Crashworthiness*, 26(2), 159–170. <https://doi.org/10.1080/13588265.2019.1699742>
- Yang, C., Zhao, Z., Guo, W., Xu, P., Zhou, S., Yan, L., & Jin, X. (2023). Parametric beam-based crashworthiness optimisation for the crush zone of a subway vehicle. *Thin-Walled Structures*, 183, Article 110387. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110387>
- Yang, C., Zhang, L., Lu, Y., Xu, N., Zhou, Y., Li, Q., & Ren, Z. (2025). State of the art review on the crashworthiness of railway vehicles. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 38, Article 119. <https://doi.org/10.1186/s10033-025-01287-7>
- Zheng, S., Jing, L., Liu, K., Yu, Z., Tang, Z., & Wang, K. (2024). Crash energy management optimization of high-speed trains by machine learning methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, 270, Article 109108. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109108>