SINERGI *Vol. 24, No.2, pp.338-347, Oktober 2026*
DOI : http://dx.doi.org/10.31963/sinergi.v24i2.6570

Crashworthiness Rangka Baterai Kendaraan Listrik dengan Balok Samping Fractal Multi-Cell pada Tumbukan Lateral

Ichsan Nur Rizky[1] dan Azhari Sastranegara[1*]

[1]Mechanical Engineering Study Program, Faculty of Engineering, President University
Jababeka Education Park, Bekasi, West Java 17550, Indonesia
*E-mail korespondensi: azhari.sastranegara@president.ac.id

Abstrak: *Baterai traksi kendaraan listrik ditempatkan dekat struktur bawah bodi sehingga deformasi sisi kendaraan dapat langsung mengancam ruang sel baterai. Penelitian ini mengevaluasi kemampuan rangka baterai menahan tumbukan lateral dengan membandingkan penampang berongga konvensional dan Fractal Multi-Cell Square Tube (FMST). Delapan belas model dianalisis menggunakan LS-DYNA, yang merupakan kombinasi dua geometri, tiga material (Aluminium 6061-T6, Aluminium 7075-T6, dan Steel 4340 Annealed), serta tiga ketebalan dinding luar (1,5; 2,0; dan 2,5 mm). Kinerja dinilai melalui penyerapan energi, intrusi lateral, mean crush force, dan specific energy absorption. Uji konvergensi menunjukkan elemen 6 mm memberikan deviasi penyerapan energi hanya 0,043% terhadap mesh 3 mm, sementara seluruh model mempertahankan rasio energi sekitar satu dan energi hourglass di bawah 0,8%. FMST secara konsisten membatasi intrusi lebih baik, tetapi tidak meningkatkan penyerapan energi total. Kombinasi FMST-Steel 4340 pada ketebalan 2,5 mm menghasilkan intrusi maksimum terendah, 54,2 mm, dan mean crush force tertinggi, 101,2 kN. Sebaliknya, Baseline-Aluminium 6061-T6 1,5 mm memberikan specific energy absorption tertinggi, 0,663 kJ/kg. Hasil ini menunjukkan adanya kompromi langsung antara perlindungan intrusi dan efisiensi massa, sehingga pemilihan desain harus mengikuti prioritas keselamatan dan batas massa kendaraan.*

Kata kunci: *rangka baterai kendaraan listrik; tumbukan lateral; FMST; LS-DYNA; crashworthiness.*

Abstract: Traction batteries are located close to the vehicle underbody, so side-structure deformation can directly threaten the battery-cell space. This work evaluates the lateral-impact performance of an electric-vehicle battery frame by comparing a conventional hollow side beam with a Fractal Multi-Cell Square Tube (FMST). Eighteen LS-DYNA models were evaluated from two geometries, three materials (Aluminium 6061-T6, Aluminium 7075-T6, and annealed Steel 4340), and three outer-wall thicknesses (1.5, 2.0, and 2.5 mm). Performance was assessed using energy absorption, lateral intrusion, mean crush force, and specific energy absorption. A 6 mm element size differed by only 0.043% in absorbed energy from the 3 mm mesh, while all models maintained an energy ratio near unity and hourglass energy below 0.8%. The FMST consistently reduced intrusion, although it did not increase total energy absorption. The 2.5 mm FMST-Steel 4340 configuration produced the lowest maximum intrusion (54.2 mm) and the highest mean crush force (101.2 kN). In contrast, the 1.5 mm Baseline-Aluminium 6061-T6 configuration achieved the highest specific energy absorption (0.663 kJ/kg). The results identify a direct trade-off between intrusion protection and structural mass efficiency, indicating that the preferred battery-frame configuration depends on the governing safety and weight requirements.

Keywords: electric vehicle battery frame; lateral impact; FMST; LS-DYNA; crashworthiness.

I. PENDAHULUAN

Adopsi kendaraan listrik (electric vehicle/EV) yang terus berkembang mendorong peningkatan perhatian terhadap aspek keselamatan struktur, khususnya perlindungan sistem baterai traksi terhadap beban tumbukan. Berbeda dengan kendaraan konvensional, baterai kendaraan listrik umumnya ditempatkan pada bagian bawah bodi kendaraan untuk mengoptimalkan distribusi massa dan posisi pusat gravitasi. Konfigurasi tersebut menyebabkan battery pack berada relatif dekat dengan struktur samping kendaraan, sehingga deformasi struktur akibat kecelakaan dapat diteruskan secara langsung ke ruang baterai. Kerusakan mekanis pada sel baterai lithium-ion dapat memicu perubahan internal, hubungan pendek, serta interaksi mekanis, elektrik, dan termal yang berpotensi berkembang menjadi thermal runaway. Oleh karena itu, kemampuan struktur pelindung baterai dalam membatasi deformasi dan mencegah intrusi ke area sel merupakan salah satu aspek penting dalam desain keselamatan kendaraan listrik [1]–[5].

Tumbukan lateral merupakan salah satu kondisi kritis dalam desain struktur baterai karena ruang deformasi pada arah transversal relatif terbatas dibandingkan dengan tumbukan frontal. Beban

tumbukan yang bekerja pada area samping kendaraan dapat menghasilkan deformasi lokal dengan jarak penetrasi yang relatif pendek, sehingga struktur pelindung baterai tidak hanya dituntut untuk menyerap energi tumbukan, tetapi juga harus mampu mempertahankan ruang aman di sekitar sel baterai. Integrasi battery pack dengan struktur bawah bodi juga menimbulkan tantangan dalam menentukan konfigurasi struktur yang mampu memberikan keseimbangan antara kekuatan, kemampuan penyerapan energi, massa, dan keterbatasan ruang [3], [6]. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan crashworthiness battery enclosure, antara lain penggunaan pengaku tambahan, struktur honeycomb, struktur auxetic, serta optimasi komponen berdinding tipis [6]–[9]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi internal struktur dapat memengaruhi jalur pembebanan, mode deformasi, dan tingkat intrusi yang terjadi selama tumbukan.

Dalam pengembangan struktur penyerap energi, struktur multi-cell dan hierarchical cellular structure menjadi semakin menarik karena pembagian ruang menjadi beberapa sel dapat menghasilkan jalur pembebanan tambahan dan meningkatkan jumlah lokasi pembentukan deformasi plastis. Struktur hierarkis memungkinkan distribusi beban yang lebih kompleks dibandingkan dengan penampang berongga tunggal, sehingga berpotensi meningkatkan kemampuan struktur dalam mengendalikan respons tumbukan [10]. Salah satu konfigurasi yang berkembang adalah Fractal Multi-Cell Square Tube (FMST), yaitu struktur penampang persegi dengan susunan sel internal yang mengikuti pola hierarkis. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa struktur FMST memiliki karakteristik penyerapan energi yang baik pada pembebanan aksial dan dapat menghasilkan efisiensi penyerapan energi yang tinggi melalui mekanisme deformasi progresif pada elemen-elemen internalnya [11]. Konsep struktur seluler yang terinspirasi dari pola alam juga telah banyak dikaji sebagai pendekatan untuk memperoleh kombinasi antara kekuatan struktural dan kemampuan disipasi energi yang lebih baik [12]. Selain struktur logam, pengembangan material dan struktur berdinding tipis berbasis komposit juga menunjukkan bahwa konfigurasi geometris dan karakteristik material memiliki pengaruh signifikan terhadap respons crashworthiness [13].

Meskipun demikian, karakteristik FMST pada pembebanan aksial tidak dapat secara langsung digeneralisasi terhadap pembebanan lateral. Pada tumbukan lateral, elemen dinding internal dapat berfungsi sebagai pengaku yang meningkatkan kekakuan transversal dan membatasi deformasi, tetapi pada saat yang sama dapat mengalami buckling lokal sebelum terbentuk mekanisme pelipatan progresif yang efektif. Kondisi tersebut dapat menyebabkan energi tumbukan lebih banyak dikelola melalui peningkatan gaya tahanan dan pengurangan panjang langkah deformasi daripada melalui deformasi progresif yang panjang. Dengan demikian, peningkatan jumlah sel internal tidak selalu menghasilkan peningkatan penyerapan energi total pada kondisi pembebanan transversal. Kesenjangan tersebut menjadi penting karena sebagian besar kajian struktur multi-cell dan fractal lebih banyak berfokus pada pembebanan aksial, sedangkan penerapannya sebagai side beam pada rangka baterai kendaraan listrik memerlukan evaluasi khusus terhadap kemampuan membatasi intrusi lateral.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengevaluasi pengaruh penggunaan Fractal Multi-Cell Square Tube sebagai struktur side beam rangka baterai kendaraan listrik terhadap respons tumbukan lateral. Penelitian dilakukan melalui simulasi numerik berbasis metode elemen hingga eksplisit menggunakan LS-DYNA dengan membandingkan dua konfigurasi penampang, yaitu penampang berongga konvensional (Baseline) dan FMST. Untuk memperoleh pemahaman yang sistematis mengenai pengaruh parameter desain, kedua konfigurasi dievaluasi menggunakan tiga jenis material, yaitu Aluminium 6061-T6, Aluminium 7075-T6, dan annealed Steel 4340, serta tiga variasi ketebalan dinding luar, yaitu 1,5; 2,0; dan 2,5 mm. Dengan demikian, sebanyak 18 kombinasi geometri–material–ketebalan dianalisis.

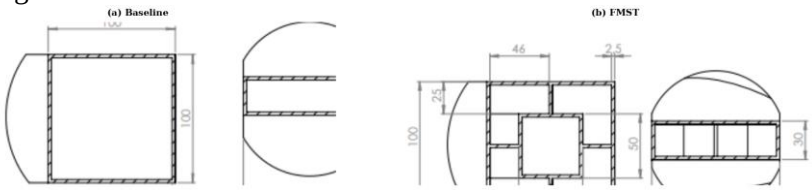
Kinerja struktur dievaluasi berdasarkan energy absorption (EA), maximum lateral intrusion, final intrusion, mean crush force (MCF), dan specific energy absorption (SEA). Parameter tersebut digunakan untuk menilai tidak hanya kemampuan struktur dalam mendisipasikan energi tumbukan, tetapi juga efektivitasnya dalam mempertahankan ruang baterai dan efisiensi penggunaan massa struktur. Secara khusus, penelitian ini diarahkan untuk menjawab tiga permasalahan utama: (1) bagaimana penggunaan FMST mengubah hubungan antara penyerapan energi dan intrusi lateral dibandingkan dengan penampang konvensional; (2) bagaimana jenis material dan ketebalan dinding

memengaruhi respons gaya, deformasi, dan penyerapan energi; serta (3) bagaimana menentukan konfigurasi struktur yang memberikan kompromi terbaik antara perlindungan ruang baterai dan efisiensi massa. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar teknis dalam pemilihan konfigurasi side beam rangka baterai yang sesuai dengan prioritas keselamatan dan batas massa pada desain kendaraan listrik.

II. METODE PENELITIAN

A. Konfigurasi Rangka Baterai dan Variabel Penelitian

Model numerik merepresentasikan rangka baterai berbentuk persegi panjang dengan panjang keseluruhan 1400 mm, lebar 900 mm, dan tinggi 100 mm. Balok sisi lateral merupakan komponen utama yang berfungsi menahan dampak tumbukan. Dua jenis penampang dievaluasi, yaitu penampang Baseline berbentuk persegi panjang berongga dan penampang FMST dengan susunan sel internal hierarkis. Ketebalan yang diteliti, yaitu 1,5; 2,0; dan 2,5 mm, diterapkan pada dinding bagian luar. Sementara itu, dinding internal FMST dipertahankan pada ketebalan 1,0 mm, sehingga pengaruh ketebalan dinding luar dapat dikaji secara independen. Gambar 1 menunjukkan dua konsep penampang yang digunakan dalam simulasi.



Gambar 1. Side-beam cross-sections: (a) Baseline and (b) FMST.

Tiga material ditetapkan untuk masing-masing geometri, yaitu Aluminium 6061-T6, Aluminium 7075-T6, dan baja annealed 4340. Nilai densitas, modulus elastisitas, rasio Poisson, dan tegangan luluh awal dari masing-masing material yang digunakan dalam model elemen hingga disajikan pada Tabel 1. Kombinasi faktorial penuh dari dua jenis geometri, tiga jenis material, dan tiga variasi ketebalan dinding luar menghasilkan total 18 simulasi.

Tabel 1. Sifat mekanik yang digunakan dalam model material LS-DYNA.

Material	Density (kg/m^3)	E (GPa)	N	Yield strength (MPa)
Al 6061-T6	2712.6	68.948	0.330	286.9
Al 7075-T6	2795.7	71.016	0.330	519.5
Steel 4340	7833.4	196.50	0.290	423.7

B. Model Tumbukan, Formulasi Material, dan Metrik Kinerja

Semua simulasi diselesaikan menggunakan formulasi LS-DYNA eksplisit (explicit formulation). Rangka baterai dimodelkan menggunakan elemen shell berbentuk segi empat (quadrilateral shell elements) dan material MAT_024 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, sedangkan impaktor berbentuk silinder dimodelkan sebagai solid rigid. Massa impaktor adalah 151 kg dengan kecepatan awal 8,9 m/s (32 km/jam), yang menghasilkan energi kinetik awal sekitar 5,98 kJ. Impaktor bergerak tegak lurus terhadap arah longitudinal balok sisi yang mengalami tumbukan. Tumpuan rangka dikondisikan secara konsisten pada seluruh variasi model, sedangkan kontak antara impaktor dan rangka didefinisikan menggunakan formulasi automatic contact.

Evaluasi crashworthiness (kemampuan struktur dalam menyerap energi tumbukan) dilakukan berdasarkan riwayat gaya kontak, perpindahan, dan energi. EA (Energy Absorption) merupakan kerja yang dilakukan oleh gaya tumbukan sepanjang perpindahan akibat deformasi (*crush displacement*). SEA (Specific Energy Absorption) merupakan normalisasi energi yang diserap terhadap massa

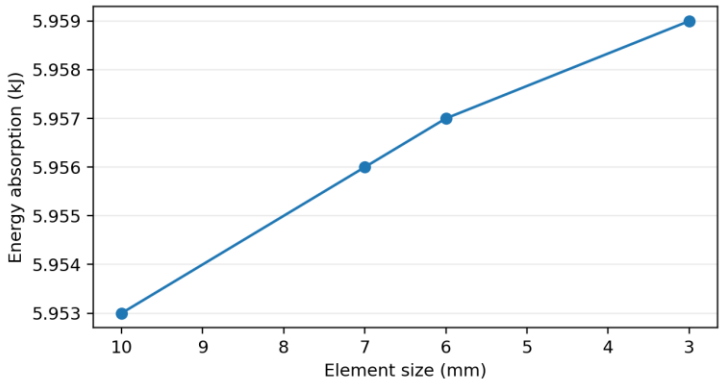
struktur, sedangkan MCF (Mean Crushing Force) merepresentasikan gaya rata-rata yang mampu ditahan selama effective crush stroke. Besaran-besaran tersebut didefinisikan sebagai berikut:

$$EA = \int F(\delta)\, d\delta \quad (1)$$
$$SEA = EA / m \quad (2)$$
$$MCF = EA / \delta \quad (3)$$

dengan F adalah gaya kontak lateral, δ adalah perpindahan akibat deformasi (*crush displacement*), dan m adalah massa rangka. Intrusi maksimum (maximum intrusion) digunakan untuk menilai jarak penetrasi terdekat menuju ruang baterai selama proses tumbukan, sedangkan intrusi akhir (final intrusion) menunjukkan deformasi permanen yang tersisa setelah struktur mengalami pemantulan (*rebound*).

C. Konvergensi Mesh dan Verifikasi Numerik

Studi konvergensi mesh dilakukan menggunakan model *Baseline* berbahan Al 6061-T6. Ukuran elemen sebesar 10, 7, 6, dan 3 mm menghasilkan nilai EA masing-masing sebesar 5,953; 5,956; 5,957; dan 5,959 kJ. Mesh berukuran 6 mm hanya menunjukkan perbedaan sebesar 0,043% dibandingkan dengan mesh paling halus (3 mm), namun membutuhkan waktu komputasi sekitar seperenam dari waktu yang diperlukan oleh mesh tersebut. Oleh karena itu, mesh berukuran 6 mm dipilih dan digunakan untuk studi parametrik.



Gambar 2. Mesh-convergence result based on absorbed energy.

Stabilitas numerik diperiksa pada setiap model sebelum dilakukan perbandingan hasil crashworthiness. Energi total pada akhir simulasi berada pada rentang 5,980–5,984 kJ, yang setara dengan rasio energi sebesar 0,9995–1,0000. Energi *hourglass* berada pada rentang 0,20%–0,77%, jauh di bawah kriteria penerimaan sebesar 5% yang digunakan dalam model. Tidak ditemukan pertumbuhan energi yang abnormal maupun energi internal negatif. Hasil pemeriksaan ini menunjukkan bahwa perbedaan yang dibahas pada bagian berikutnya berkaitan dengan variabel desain, bukan disebabkan oleh ketidakstabilan numerik.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

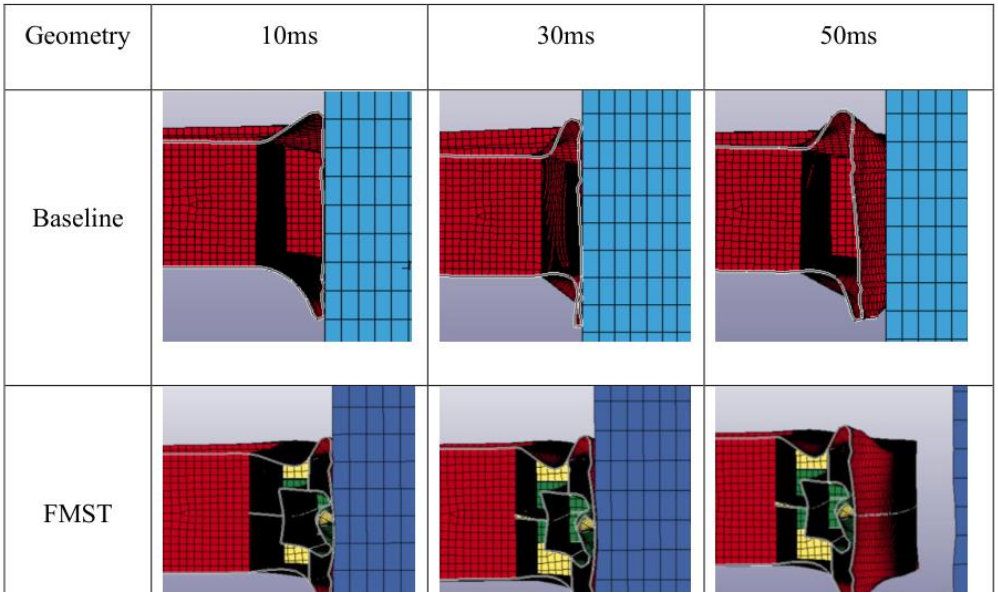
A. Mode Deformasi dan Pengaruh Geometri

Kedua geometri menunjukkan mekanisme keruntuhan (*collapse mechanism*) yang berbeda. Pada penampang Baseline, deformasi tetap terkonsentrasi di sekitar area kontak dengan impaktor, sedangkan satu sel berongga mengalami pelipatan ke arah dalam (*inward folding*) sepanjang perpindahan deformasi yang relatif panjang.

Pada penampang FMST, dinding luar dan *web* internal bekerja secara bersamaan dalam menahan beban. Jalur pembebanan tambahan (*additional load paths*) menyebarkan deformasi lokal dan

menghentikan pergerakan impaktor lebih awal. Namun, dinding internal yang tipis juga mengalami tekuk (*buckling*) lebih awal.

Gambar 3 menunjukkan perbedaan mekanisme deformasi tersebut pada material Al 7075-T6 dengan ketebalan dinding luar 2,0 mm.



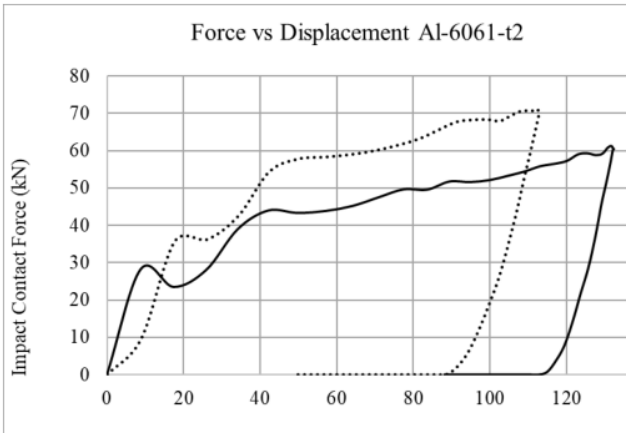
Gambar 3. Representative deformation sequence for Baseline and FMST sections (Al 7075-T6, 2.0 mm).

Hasil kuantitatif mengonfirmasi bahwa FMST terutama berfungsi sebagai penghalang intrusi (*intrusion barrier*), bukan sebagai peningkat kemampuan penyerapan energi (*energy absorption*) pada pembebanan lateral. Pada Al 6061-T6 dengan ketebalan 1,5 mm, EA hanya mengalami sedikit penurunan, dari 5,722 kJ pada Baseline menjadi 5,618 kJ pada FMST. Sementara itu, *final intrusion* menurun secara signifikan dari 147,2 menjadi 59,6 mm, dan MCF meningkat dari 31,7 menjadi 37,1 kN.

Kecenderungan yang sama juga ditemukan pada ketebalan dinding yang lebih besar. Pada Steel 4340 dengan ketebalan 2,5 mm, perubahan dari Baseline menjadi FMST mengurangi *maximum intrusion* dari 85,5 menjadi 54,2 mm dan meningkatkan MCF dari 67,9 menjadi 101,2 kN, meskipun EA mengalami penurunan dari 5,805 menjadi 5,484 kJ. Dengan demikian, struktur sel internal mengubah cara energi tumbukan yang tersedia dikelola: respons struktur lebih banyak diwujudkan dalam bentuk tahanan gaya pada perpindahan yang pendek (*short-stroke load resistance*) dan lebih sedikit dalam bentuk pelipatan yang berlangsung sepanjang perpindahan yang lebih panjang (*extended folding*).

Kurva gaya–perpindahan representatif pada Gambar 4 memperlihatkan pertukaran kinerja (*trade-off*) yang sama. Pada Al 6061-T6 dengan ketebalan 2,0 mm, FMST mencapai tingkat gaya kontak yang lebih tinggi dan mengalami pelepasan beban (*unloading*) setelah perpindahan yang lebih pendek, sedangkan Baseline terus mengalami deformasi sepanjang perpindahan yang lebih panjang.

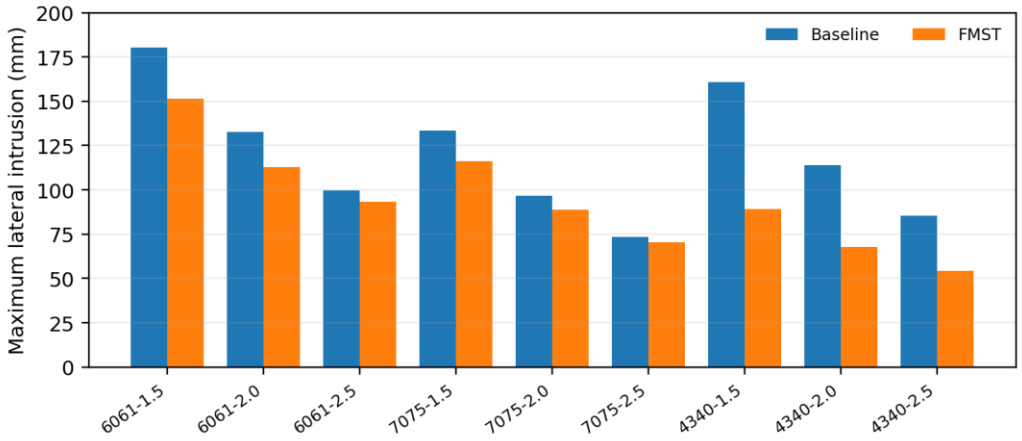
Respons lateral ini berbeda dari perilaku crushing aksial yang dilaporkan pada tabung *fractal multi-cell*, di mana penambahan sel hierarkis dapat meningkatkan SEA secara signifikan [11]. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa manfaat topologi fraktal bergantung pada arah dan jenis pembebanan (*load-path dependent*). Pada pembebanan melintang oleh impaktor, *web* internal lebih berperan sebagai pengaku (*stiffeners*) dan elemen yang mengalami tekuk lokal (*local buckling elements*) daripada sebagai rangkaian engsel pelipatan progresif pada pembebanan aksial.



Gambar 4. Representative contact force-displacement response (Al 6061-T6, 2.0 mm).

B. Pengaruh Material dan Ketebalan Dinding

Pemilihan material memengaruhi kekakuan dan massa struktur, sehingga pengaruhnya tidak dapat dinilai hanya berdasarkan nilai EA. Konfigurasi berbahan baja menghasilkan tahanan gaya tertinggi pada perpindahan yang paling pendek, terutama ketika dikombinasikan dengan geometri FMST. Sebaliknya, struktur berbahan aluminium secara umum memungkinkan perpindahan deformasi yang lebih panjang. Pada geometri dan ketebalan yang sama, Aluminium 7075-T6 mampu mengurangi intrusi dibandingkan Aluminium 6061-T6, tetapi tingkat penyerapan energinya umumnya lebih rendah. Kecenderungan ini ditunjukkan pada perbandingan maximum intrusion pada Gambar 5.



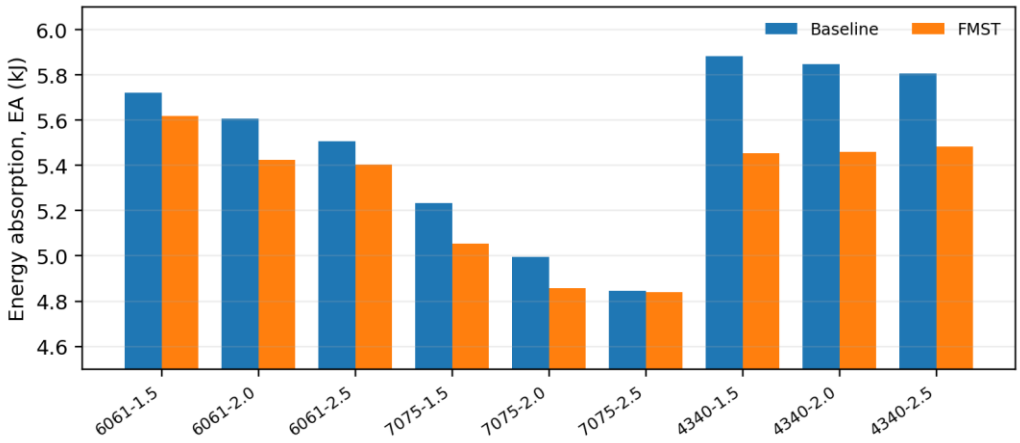
Gambar 5. Maximum lateral intrusion for the 18 design variants.

Increasing the outer-wall thickness consistently reduced intrusion and raised MCF, while its influence on total absorbed energy was comparatively small. For the FMST Al 6061-T6 group, maximum intrusion decreased from 151.3 mm at 1.5 mm to 112.8 mm at 2.0 mm and 93.1 mm at 2.5 mm. Over the same range, MCF increased from 37.1 to 48.1 and 58.0 kN. EA changed from 5.618 to 5.423 and 5.404 kJ. The trend occurs because the impact energy is limited by the initial kinetic energy of the pole; adding wall material mainly changes the force level and crush distance required to dissipate that energy.

C. Penyerapan Energi dan Efisiensi Massa

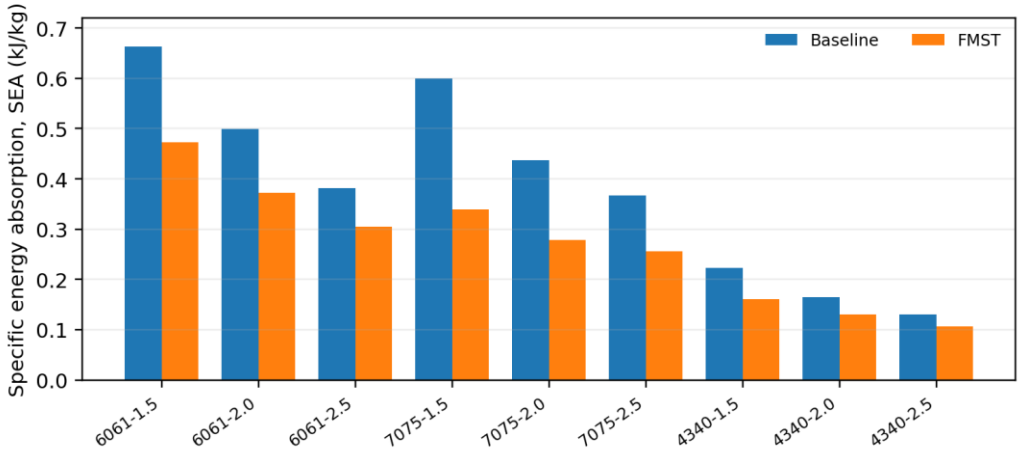
Pada keseluruhan matriks simulasi, Baseline menyerap energi yang sama atau lebih besar dibandingkan FMST pada setiap pasangan material dan ketebalan. Perbedaannya relatif kecil pada model berbahan baja, tetapi lebih terlihat pada Al 7075-T6. Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai EA tetap berada dalam rentang yang relatif sempit, yaitu sekitar 4,84–5,88 kJ, karena energi tumbukan

awal ditetapkan konstan. Rentang nilai yang sempit tersebut menjadikan intrusi dan kinerja yang dinormalisasi terhadap massa sebagai parameter pembeda yang penting antarvariasi model.



Gambar 6. Energy absorption of Baseline and FMST configurations.

SEA membalikkan peringkat yang diperoleh berdasarkan ketahanan terhadap intrusi. Baja 4340 memiliki densitas sekitar tiga kali lebih tinggi dibandingkan paduan aluminium, sementara energi yang diserap berada pada orde yang relatif sama. Akibatnya, varian berbahan baja menghasilkan nilai SEA hanya sebesar 0,107–0,223 kJ/kg, sedangkan varian aluminium mencapai 0,256–0,663 kJ/kg. Nilai tertinggi diperoleh pada model Baseline Al 6061-T6 dengan ketebalan 1,5 mm, yaitu sebesar 0,663 kJ/kg, sedangkan nilai terendah diperoleh pada model FMST Steel 4340 dengan ketebalan 2,5 mm, yaitu sebesar 0,107 kJ/kg. Gambar 7 merangkum perbedaan efisiensi massa tersebut.



Gambar 7. Specific energy absorption of Baseline and FMST configurations.

D. Matriks Kinerja Keseluruhan

Tabel 2 merangkum besaran keluaran utama untuk seluruh 18 varian. Penyajian matriks secara lengkap penting karena peringkat kinerja dapat berubah bergantung pada kriteria yang digunakan. Suatu konfigurasi yang mampu membatasi *maximum intrusion* belum tentu memiliki penyerapan energi tertinggi atau SEA terbaik. Tabel tersebut juga menunjukkan bahwa pemulihan pantulan akhir (*final rebound recovery*) tertinggi tidak selalu berbanding lurus dengan maximum intrusion terendah selama kontak tumbukan. Oleh karena itu, kedua parameter perpindahan tersebut perlu dipertahankan sebagai ukuran yang berbeda dalam mengevaluasi tingkat perlindungan ruang baterai.

Table 2. Kinerja *Crashworthiness* pada Seluruh Variasi Desain–Material–Ketebalan.

Variant	EA (kJ)	Δy max (mm)	Δy final (mm)	MCF (kN)	SEA (kJ/kg)
B-6061-t1.5	5.722	180.4	147.2	31.7	0.663
B-6061-t2.0	5.606	132.6	50.9	42.3	0.499
B-6061-t2.5	5.506	99.6	39.3	55.3	0.382
B-7075-t1.5	5.234	133.5	124.3	39.2	0.600
B-7075-t2.0	4.994	96.5	22.6	51.8	0.437
B-7075-t2.5	4.847	73.4	12.1	66.0	0.367
B-4340-t1.5	5.884	160.7	31.5	36.6	0.223
B-4340-t2.0	5.846	113.9	19.0	51.3	0.165
B-4340-t2.5	5.805	85.5	14.3	67.9	0.131
F-6061-t1.5	5.618	151.3	59.6	37.1	0.473
F-6061-t2.0	5.423	112.8	40.9	48.1	0.372
F-6061-t2.5	5.404	93.1	31.3	58.0	0.305
F-7075-t1.5	5.054	116.3	22.1	43.4	0.339
F-7075-t2.0	4.857	88.6	16.5	54.8	0.279
F-7075-t2.5	4.840	70.4	13.9	68.8	0.256
F-4340-t1.5	5.454	89.0	23.0	61.3	0.161
F-4340-t2.0	5.461	67.8	18.4	80.5	0.131
F-4340-t2.5	5.484	54.2	14.1	101.2	0.107

E. Pemilihan Desain

Tidak ada satu pun konfigurasi yang memberikan kinerja terbaik untuk seluruh persyaratan crashworthiness. Tabel 3 merangkum varian yang mewakili nilai ekstrem dalam ruang desain. Baseline Steel 4340 dengan ketebalan 1,5 mm menghasilkan nilai EA tertinggi, yaitu 5,884 kJ.

Model FMST Steel 4340 dengan ketebalan 2,5 mm menghasilkan maximum intrusion terkecil, yaitu 54,2 mm, sekaligus MCF tertinggi, yaitu 101,2 kN. Oleh karena itu, konfigurasi ini menjadi kandidat paling kuat ketika perlindungan dan pemeliharaan ruang baterai merupakan persyaratan utama.

Sementara itu, model Baseline Al 6061-T6 dengan ketebalan 1,5 mm memberikan SEA tertinggi, sehingga lebih sesuai ketika massa struktur menjadi faktor pembatas utama.

Tabel 3. Varian dengan Kinerja Terbaik Berdasarkan Masing-Masing Kriteria *Crashworthiness*.

Criterion	Best variant	Value	Design implication
Highest EA	B-4340-t1.5	5.884 kJ	Maximum absolute energy dissipation
Lowest maximum intrusion	F-4340-t2.5	54.2 mm	Strongest protection of battery space
Highest MCF	F-4340-t2.5	101.2 kN	Highest short-stroke crush resistance
Highest SEA	B-6061-t1.5	0.663 kJ/kg	Best mass-normalized efficiency

Untuk battery enclosure, *maximum intrusion* merupakan indikator geometris yang lebih langsung untuk menentukan apakah deformasi telah mendekati volume sel baterai. Berdasarkan pertimbangan tersebut, F-4340-t2.5 merupakan pilihan yang berorientasi pada keselamatan (*safety-oriented choice*) dalam ruang desain yang diteliti. Namun, nilai SEA yang rendah menunjukkan dengan jelas adanya konsekuensi berupa peningkatan massa struktur.

Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak mendukung adanya satu konfigurasi optimum yang berlaku secara universal. Langkah selanjutnya yang dapat dilakukan adalah mengembangkan side member hibrida atau multi-material, dengan menempatkan material berkekuatan lebih tinggi hanya pada jalur intrusi yang kritis, sementara aluminium tetap digunakan pada bagian yang menerima beban lebih rendah.

IV. KESIMPULAN

1. FMST mengubah respons tumbukan lateral terutama dengan mengurangi intrusi. FMST tidak meningkatkan total EA; sebaliknya, *web* internal memperpendek *crush stroke* dan meningkatkan tahanan gaya yang dihasilkan selama kontak tumbukan.
2. Material dan ketebalan memberikan pengaruh yang kuat terhadap intrusi dan MCF. Varian FMST Steel 4340 dengan ketebalan 2,5 mm mencapai *maximum intrusion* terkecil, yaitu 54,2 mm, dan MCF tertinggi sebesar 101,2 kN.
3. Peningkatan ketebalan dinding luar mengurangi intrusi dan meningkatkan MCF, tetapi hanya memberikan perubahan kecil terhadap EA karena energi tumbukan yang tersedia ditetapkan konstan, yaitu sekitar 5,98 kJ.
4. Efisiensi massa lebih menguntungkan penggunaan aluminium. Varian Baseline Al 6061-T6 dengan ketebalan 1,5 mm mencapai SEA tertinggi sebesar 0,663 kJ/kg, sedangkan varian yang berorientasi pada keselamatan, yaitu FMST Steel 4340 dengan ketebalan 2,5 mm, memiliki SEA terendah sebesar 0,107 kJ/kg. Oleh karena itu, pemilihan desain merupakan trade-off antara perlindungan ruang baterai dan penambahan massa struktur.
5. Untuk penelitian selanjutnya, perlu dilakukan variasi terhadap ketebalan dinding internal FMST, investigasi terhadap konsep hibrida aluminium–baja, serta validasi mode deformasi dan pengukuran intrusi melalui pengujian fisik komponen.

DAFTAR PUSTAKA

[1] V. G. Madaram, P. K. Biswas, C. Sain, S. B. Thanikanti, and P. K. Balachandran, “Advancement of electric vehicle technologies, classification of charging methodologies, and optimization strategies for sustainable development,” Heliyon, vol. 10, no. 20, e39299, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39299.

[2] M. Cortada-Torbellino, D. G. Elvira, A. El Aroudi, and H. Valderrama-Blavi, “Review of lithium-ion battery internal changes due to mechanical loading,” Batteries, vol. 10, no. 7, p. 258, 2024, doi: 10.3390/batteries10070258.

[3] G. Belingardi and A. Scattina, “Battery pack and underbody: Integration in the structure design for battery electric vehicles—challenges and solutions,” Vehicles, vol. 5, no. 2, pp. 498-514, 2023, doi: 10.3390/vehicles5020028.

[4] V. K. Agrawal et al., “Safety challenges in high-voltage electric vehicle collisions: risks and design strategies,” Discover Electronics, vol. 2, p. 53, 2025, doi: 10.1007/s44291-025-00099-2.

[5] J.-W. Kim, S. Kim, and J. Kim, “Prediction of internal circuit and mechanical-electrical-thermal response of lithium-ion battery cell with mechanical-thermal coupled analysis,” Energies, vol. 15, no. 3, p. 929, 2022, doi: 10.3390/en15030929.

[6] A. D. Muresanu, M. C. Dudescu, and D. Tica, “Study on the crashworthiness of a battery frame design for an electric vehicle using FEM,” World Electric Vehicle Journal, vol. 15, no. 11, p. 534, 2024, doi: 10.3390/wevj15110534.

[7] Z. Mustaffa et al., "Numerical assessment of the side impacts on lithium-ion battery module integrated with honeycomb reinforcement," Engineering Failure Analysis, vol. 161, 108290, 2024, doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.108290.
[8] A. Agarwal, R. C. Batista, and Tashi, "Crashworthiness evaluation of electric vehicle battery packs using reinforced enclosure structures and explicit dynamic analysis," E3S Web of Conferences, vol. 519, 04010, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202451904010.
[9] L. I. Scurtu, I. Szabo, and M. Gheres, "Numerical analysis of crashworthiness on electric vehicle's battery case with auxetic structure," Energies, vol. 16, no. 15, p. 5849, 2023, doi: 10.3390/en16155849.
[10] X. Deng, S. Qin, and J. Huang, "Crashworthiness analysis of gradient hierarchical multicellular columns evolved from the spatial folding," Materials & Design, vol. 215, 110435, 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.110435.
[11] N. S. Ha, T.-U. Lee, H. Lu, J. Li, G. Lu, and Y. M. Xie, "Energy absorption characteristics of fractal multi-cell square tubular structures under axial crushing," Thin-Walled Structures, vol. 205, 112365, 2024, doi: 10.1016/j.tws.2024.112365.
[12] H. Mohammadi et al., "An insight from nature: cellular patterns in advanced structural design for impact energy absorption," Journal of Materials Research and Technology, vol. 22, pp. 2862-2887, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.12.063.
[13] M. Capretti, G. Del Bianco, V. Giammaria, and S. Boria, "Natural fibre and hybrid composite thin-walled structures for automotive crashworthiness: A review," Materials, vol. 17, no. 10, p. 2246, 2024, doi: 10.3390/ma17102246.