

Kaji numerik kelaikan tabrak struktur crashbox hibrid aluminum/GFRP dikenai beban impak aksial

Citra Asti Rosalia^a, Yahya Abdullah Azzam, Annisa Jusuf^{b,*}, Leonardo Gunawan^b,
Ichsan Setya Putra^b, Tatacipta Dirgantara^b

^aProgram Doktor Teknik Dirgantara

^bKelompok Keahlian Struktur Ringan

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Jawa Barat, Indonesia

*annisa.jusuf@itb.ac.id

ABSTRACT

Kasus kecelakaan tabrak depan pada kendaraan menjadi kasus tabrakan yang paling banyak terjadi di Indonesia. Oleh karena itu, diperlukan suatu kendaraan yang menerapkan konsep kelaikan tabrak pada desain strukturnya. Struktur laik tabrak yang didesain berupa struktur *crash box* yang dapat menahan dan menyerap energi kinetik akibat beban impak arah aksial. *Crash box* menyerap energi tabrak melalui deformasi pada strukturnya dengan mekanisme lipatan pada *crash box* yang terbuat dari logam, atau modus *splaying*, *brittle fracturing*, *transverse shearing*, maupun *fragmentation* pada *crash box* yang terbuat dari komposit. Sampai dengan saat ini sebagian besar struktur *crash box* terbuat dari material logam karena sifatnya yang kuat dan ulet, sehingga energi impak dapat diserap dengan baik dengan cara berdeformasi plastis melalui mekanisme lipatan berulang dan stabil, atau dikenal dengan *progressive buckling*. Pada saat ini, salah satu alternatif solusi yang dipercaya dapat meningkatkan kapasitas penyerapan energi struktur *crash box* dan dengan tetap mempertahankan efisiensi berat strukturnya adalah menggabungkan logam dan komposit sebagai material penyusunnya. *Crash box* seperti ini dikenal dengan *crash box* hibrid, dimana *crash box* yang berbahan dasar logam akan dilapisi atau dibungkus dengan komposit di permukaan luarnya. Pada penelitian ini, akan dilakukan kaji numerik pada struktur *crash box* aluminum dan *crash box* hibrid aluminum/GFRP berpenampang segi-empat yang dikenai beban impak aksial. Kaji numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak eksplisit non linier LS-Dyna untuk memprediksi respon *crash box*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Mean crushing force* (P_m) *crash box* hibrid aluminum/GFRP 3 lapis dan 5 lapis memiliki nilai 29% dan 32% lebih tinggi jika dibandingkan dengan *crash box* aluminum. Dapat disimpulkan bahwa *crash box* hibrid memiliki kemampuan penyerapan energi dan parameter kelaikan tabrak lebih baik jika dibandingkan dengan *crash box* aluminum saja.

Keywords: Kelaikan tabrak, *crash box*, hibrid, aluminum/GFRP, beban aksial

Diterima 30 September 2023; **Dipresentasikan** 5 Oktober 2023; **Dipublikasikan** 27 Mei 2024

PENDAHULUAN

Pusat Informasi Kriminal Nasional (PUS-IKNAS) merilis jumlah kecelakaan lalu lintas yang terjadi pada rentang waktu 1 Januari-31 Desember 2022 sebanyak 25.138 kecelakaan lalu lintas. Dengan jenis kecelakaan tertinggi yaitu tabrakan depan, jumlahnya mencapai 3.503 kasus (Polri, 2023). Upaya peningkatan keselamatan alat transportasi mutlak diperlukan di Indonesia, khususnya yang berkaitan dengan perlindungan penumpang melalui regulasi, manajemen dan pengembangan teknologi. Salah satu bidang teknologi yang terus mengalami kemajuan dalam industri otomotif adalah teknologi yang berfokus pada aspek keamanan. Perusahaan pembuat kendaraan terus berinovasi dalam mengembangkan teknologi baru yang bertujuan untuk meningkatkan level keamanan bagi

pengemudi dan penumpang. Teknologi tersebut salah satunya fitur keselamatan aktif dan pasif. Fitur keselamatan aktif berfungsi untuk mencegah terjadinya tabrakan, contohnya *Anti-lock Braking System* (ABS), *Active stability control* (ASC), *Brake Assist* (BA), *Electronic Brake force Distribution* (EBD) dan *Hill Start Assist* (HSA). Sementara fitur keselamatan pasif berfungsi untuk melindungi penumpang pada saat terjadi kecelakaan. Salah satu fitur keselamatan pasif adalah *crash box*. *Crash box* merupakan suatu tabung yang berfungsi untuk menyerap energi impak ketika terjadi kecelakaan. *Crash box* pada umumnya merupakan struktur tabung berinding tipis. Desain struktur ini sangat menentukan besarnya energi yang dapat diserap dan beban yang diterima oleh penumpang saat terjadi tabrakan. Oleh karena itu, diperlukan suatu proses perancangan *crash box* yang baik

agar berfungsi secara maksimal. Sampai saat ini sebagian besar struktur *crash box* terbuat dari material logam karena bersifat kuat dan ulet, sehingga energi impact dapat diserap dengan baik dengan cara berdeformasi plastis melalui mekanisme lipatan yang berulang dan stabil (*progressive buckling*). Penelitian *crashbox* logam telah banyak dilakukan dengan metode analitik, numerik, dan eksperimen pada berbagai macam variasi geometri dan jenis material. Penelitian dilakukan untuk menentukan karakteristik berbagai rancangan *crash box* dengan bentuk *crash box single walled and doubled walled column* (Jusuf, Dirgantara, Gunawan, & Putra, 2012) (Gunawan, Sitompul, Dirgantara, & Putra, 2013). Dengan bentuk *multicell* (Chen & Wierzbicki, 2001), (Zhang, Cheng, & Zhang, 2006) melalui penelitiannya menyatakan bahwa penyerapan energi struktur *crash box* persegi akan lebih tinggi nilainya jika dibagi kedalam kolom-kolom *multi-cell*.

Dalam empat dekade terakhir bahan komposit mengalami peningkatan permintaan dan pemakaian yang luar biasa tinggi dalam industri otomotif dan penerbangan. Boeing 787 menggunakan material komposit lebih dari 50% dari total struktur airframe-nya. Dalam aplikasi kelaikan struktur kendaraan, material komposit memiliki kelebihan seperti kekuatan spesifik yang tinggi, kekakuan spesifik yang tinggi dan kemampuan penyerapan energi yang sangat baik. Struktur komposit menyerap energi per satuan massa (SEA) yang lebih besar daripada struktur logam seperti baja dan aluminium (Ramakrishna & Hamada, 1998).

Upaya peningkatan kapasitas penyerapan energi struktur *crash box* dengan tetap mempertahankan efisiensi berat strukturnya adalah dengan menggabungkan logam dan komposit sebagai material penyusunnya. Gabungan dari *crash box* logam dan komposit disebut dengan *crash box* hibrid, dimana *crash box* logam dilapisi atau dibungkus dengan komposit dibagian luarnya.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis kelaikan tabrak (*crashworthiness*) secara numerik pada struktur *crash box* hibrid yang merupakan gabungan aluminium dan komposit *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) yang dikenai beban impact aksial. Penelitian ini juga akan mempelajari efek penggunaan material komposit terhadap karakteristik tumbukan aksial pada *crash box* berbentuk segi empat, terutama dalam hal peningkatan nilai gaya hancur rata-rata (P_{mean}), dan

peningkatan kemampuan struktur dalam menyerap energi.

DETAIL GEOMETRI

Pada penelitian ini, *crash box* berpenampang segi-empat aluminium dan hibrid aluminium/GFRP akan dianalisis. *Crash box* yang di simulasikan memiliki panjang (L) 200 mm, panjang sisi (b) 44 mm, dan ketebalan (t) 1.6 mm untuk aluminium. Sedangkan masing-masing lapisan komposit memiliki ketebalan 0.5 mm. Geometri penampang yang akan disimulasikan ditunjukkan pada Gambar 1.

SIFAT MATERIAL

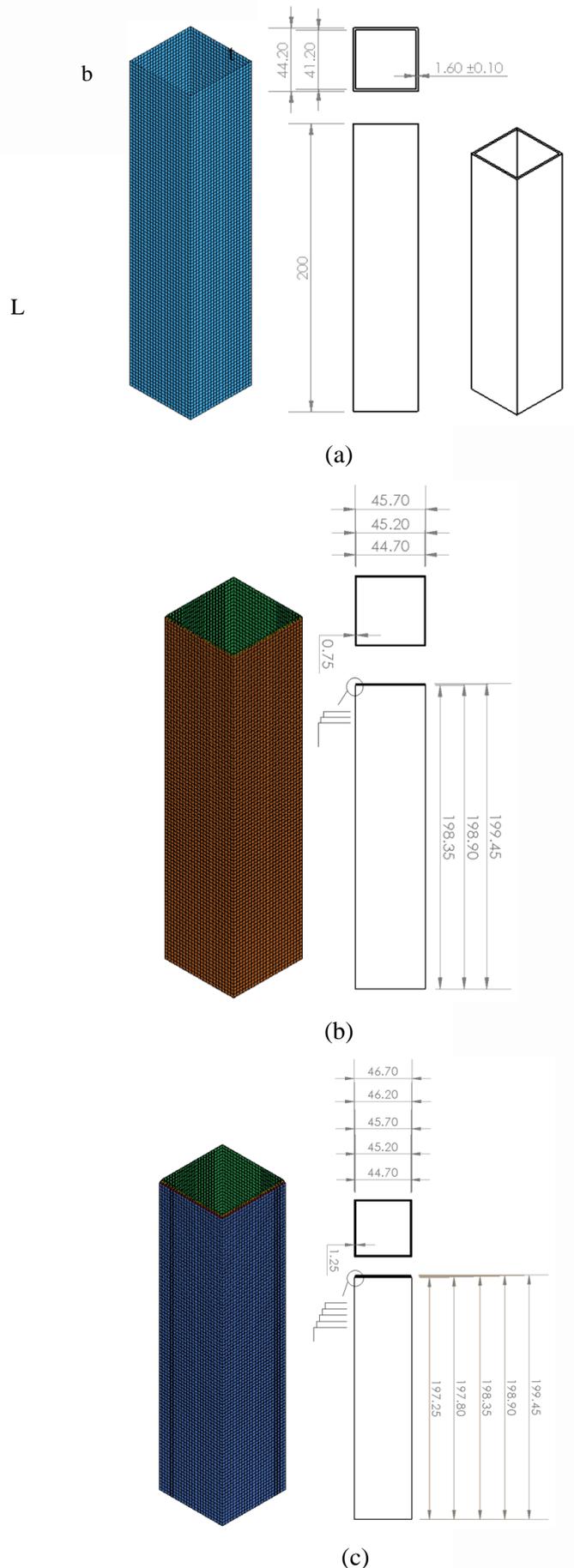
Material yang digunakan pada *crash box* yaitu Aluminium AA 6063 dan komposit *pre-preg glass fiber reinforced polymer* (GFRP). Untuk mendapatkan sifat material dari material aluminium uji tarik dengan standard ASTM A370:2019. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 1.

Permodelan Numerik

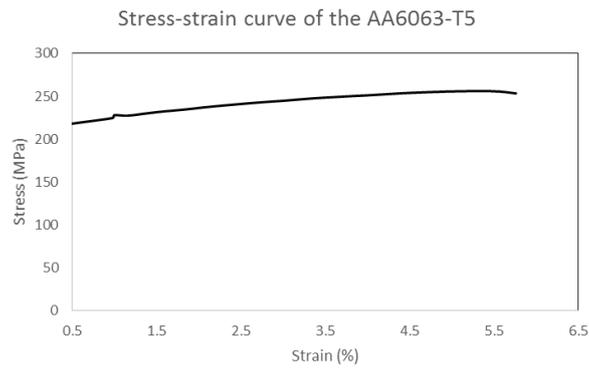
Pada penelitian *crash box* aluminium dan hibrid aluminium/GFRP akan dilakukan pendekatan secara numerik dengan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga *eksplisit non-linier LSDYNA*. Model elemen hingga ditunjukkan pada Gambar 3. Dinding *crash box* dimodelkan dengan element *shell* tipe *Belytschko Tsay*. Sedangkan impaktor dimodelkan dengan elemen *solid rigid*.

Kondisi batas pada permodelan numerik adalah keadaan jepit pada bagian bawah *crash box*, dan arah translasi-z pada impaktor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. *Crash box* diberi beban tumbukan dengan cara memodelkan pergerakan penumbuk secara aksial dengan kecepatan yang konstan, yakni 5.4 m/s.

Dalam permodelan numerik, berbagai jenis kontak digunakan. Kontak *automatic node to surface* digunakan untuk kontak impaktor dengan *crash box*, kontak *automatic one-way surface to surface tie break* untuk jenis kontak antara lapisan komposit. Sementara itu, kontak *automatic single surface* digunakan untuk menghubungkan antara elemen-elemen di dalam *crash box* itu sendiri. Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya penetrasi antara elemen-elemen tersebut selama proses pembentukan lipatan *progressive buckling*.



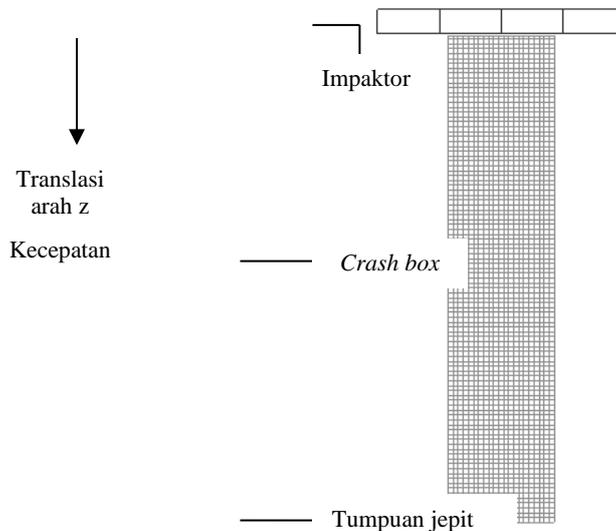
Gambar 1. Geometri penampang crash box segi 4 (a) aluminum, (b) hibrid 3 lapisan, dan (c) hibrid 5 lapisan



Gambar 2. Kurva true stress-plastic strain Al6063

Tabel 1 Sifat material Al 6063

Sifat Material	Satuan	Nilai
Modulus elastisitas (E)	GPa	66.1
Yield Strength (σ_y)	MPa	216.83
Ultimate Strength (σ_u)	MPa	244.19
Poisson's ratio (ν)	-	0.3

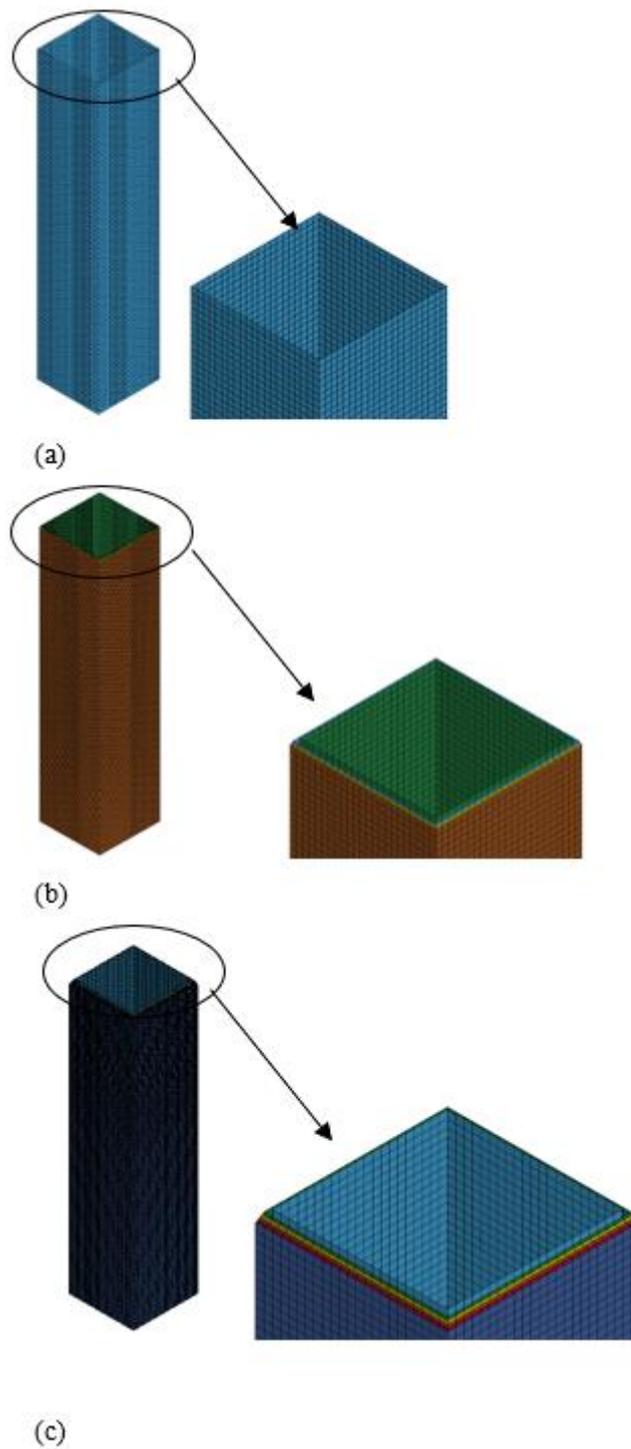


Gambar 3. Model elemen hingga *crash box* segi-empat

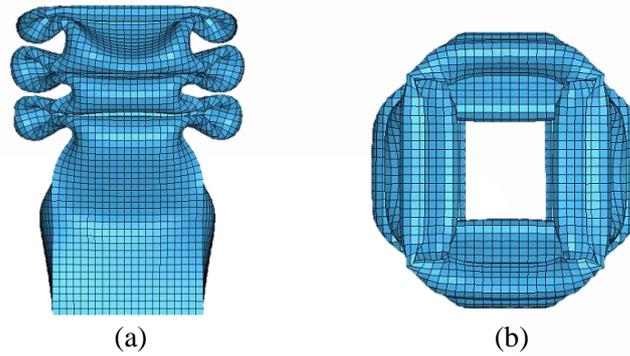
Permodelan material aluminum dengan menggunakan MAT 24 *Piecewise Linear Plasticity* untuk menggambarkan perilaku elastis-plastis material aluminum. Sementara itu, material komposit dimodelkan menggunakan MAT 54/55 *Enhanced Composite Damage* untuk menggambarkan kerusakan yang terjadi pada material komposit. Gambar 4 menunjukkan pemodelan numerik untuk *crash box* aluminum, hibrid 3 lapisan dan hibrid 5 lapisan.

HASIL DAN ANALISIS

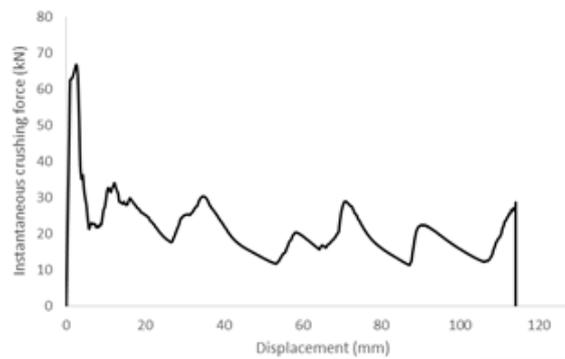
Studi dilakukan untuk evaluasi terhadap efek penambahan material komposit pada tabung segi empat aluminum terhadap karakteristik tumbukan aksial, terutama dalam hal peningkatan nilai gaya hancur rata-rata (P_{mean}), dan peningkatan kemampuan struktur dalam menyerap energi.



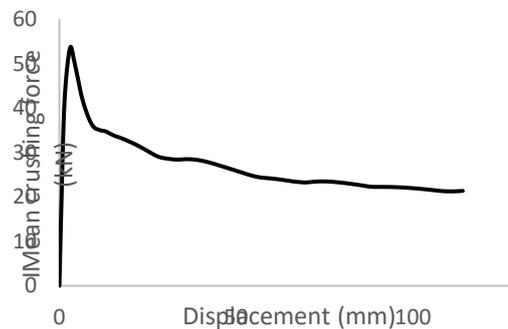
Gambar 4. Model elemen hingga untuk (a) aluminum, (b) hibrid 3 lapisan, (c) hibrid 5 lapisan



Gambar 5. Permodelan numerik aluminum Al 6063 tampak depan dan tampak atas (a) sebelum impact, (b) sesudah impact, (c)



(a)



(b)

Gambar 6 Respon tumbukan aluminum (a) Force-displacement, dan (b) Mean crushing force (P_m) Al6063 akibat pembebanan impact aksial

Gambar 5 menunjukkan bahwa *crash box* aluminum mengalami *progressive buckling* dengan modus deformasi inekstensional, di mana dua sisi tabung yang saling berhubungan memiliki lipatan yang berlawanan arah, satu sisi melipat keluar dan sisi lainnya melipat ke dalam. Jumlah lipatan yang terjadi pada *crash box* aluminum sebanyak 6 lipatan. Sedangkan Gambar 6 merupakan respon tumbukan *crash box* segi-empat aluminum. Nilai P_{max} aluminum sebesar 66.65 kN. Sedangkan nilai P_{mean} 21.35 kN.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa *crash box* hibrid aluminum/GFRP mengalami *progressive*

buckling dengan modus deformasi ekstensional dan inekstensional. 2 lipatan pertama menunjukkan modus deformasi ekstensional, dimana semua sisi tabung melipat keluar. Dilanjutkan dengan lipatan dengan modus deformasi inekstensional seperti yang terlihat pada Gambar 7. Modus kegagalan yang terjadi pada komposit *gfrp* adalah *progressive local buckling mode*. Jenis kegagalan ini membentuk lipatan yang teratur pada sisi tabung sehingga menghasilkan deformasi yang stabil dan menguntungkan dalam penyerapan energi impact.

Gambar 8 merupakan respon tumbukan *crash box* segi-empat hibrid aluminum/GFRP 3 lapisan. Dari gambar tersebut bisa dilihat bahwa *crash box* hibrid 3 lapisan mengalami *progressive buckling* dengan nilai P_{max} hibrid 3 lapisan sebesar 79.05 kN. Sedangkan nilai P_{mean} 24.23 kN.

Hasil simulasi pada Gambar 9 menunjukkan bahwa *crash box* hibrid aluminum/GFRP 5 lapisan mengalami *progressive buckling* dengan modus deformasi ekstensional dan inekstensional. 2 lipatan pertama menunjukkan modus deformasi ekstensional dan lipatan selanjutnya modus deformasi *inextensional*.

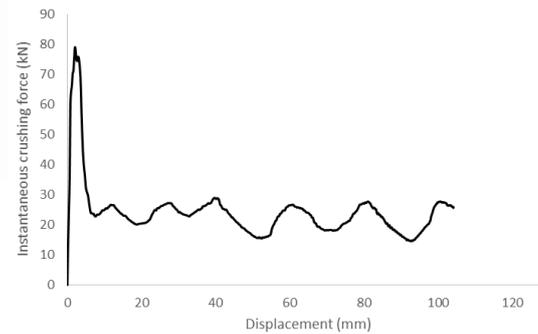
Gambar 10 merupakan respon tumbukan *crash box* segi-empat hibrid aluminum/GFRP. Dari

gambar tersebut bisa dilihat bahwa *crash box* hibrid 5 lapisan mengalami *progressive buckling* dengan nilai P_{max} hibrid 5 lapisan sebesar 84.36 kN. Sedangkan nilai P_{mean} 29.37 kN.

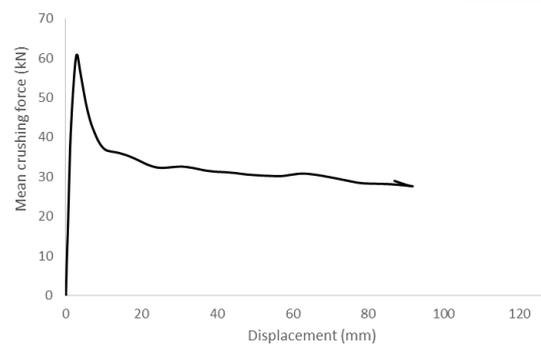
Interaksi antara *crash box* dan material komposit GFRP menghasilkan peningkatan *mean crushing force* (P_m) dan penyerapan energi pada tabung ketika terkena beban tumbukan aksial. Hal ini terjadi karena material komposit membatasi terjadi lipatan pada spesimen aluminum sehingga dibutuhkan energi yang lebih besar untuk membentuk sebuah lipatan.



Gambar 7. Hasil simulaasi numerik hibrid aluminum/GFRP 3 lapisan komposit (a) *front view* (b) *side view*, (c) *top view*



(a)



(b)

Gambar 8 Respon tumbukan (a) force-displacement. (b) *mean crushing force* (P_{mean}) hibrid aluminum/GFRP 3 lapisan komposit akibat impact aksial

lapisan dan hibrid 5 lapisan. Terlihat bahwa terdapat perbedaan signifikan dalam nilai *mean crushing force* (P_{mean}). *Mean crushing force* (P_{mean}) *crash box* hibrid aluminum/GFRP 3 lapis dan 5 lapis memiliki nilai 29% dan 32% lebih tinggi jika dibandingkan dengan *crash box* aluminum. Penelitian yang dilakukan oleh Wang (Wang, 1991) menyebutkan bahwa dengan penguatan eksternal, tabung menjadi lebih kuat karena ada lapisan yang menyelimuti serta ada interaksi antara tabung logam dan komposit. Peran utama material komposit pada tabung ini adalah untuk mengarahkan dan membatasi tabung logam untuk berdeformasi plastis sehingga mengurangi panjang gelombang lipat dan mengubah modus lipatan yang tidak stabil menjadi lebih stabil. Dapat disimpulkan bahwa *crash box* hibrid memiliki kemampuan penyerapan energi dan parameter kelaikan tabrak lebih baik jika dibandingkan dengan *crash box* aluminum

KESIMPULAN

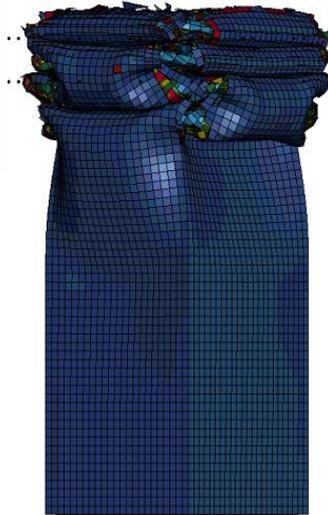
Analisis efek penambahan material komposit terhadap parameter *crashworthiness* impact

aksial pada *crash box* segi empat, khususnya dalam hal peningkatan rata-rata gaya hancur dan pola deformasinya, telah berhasil diselesaikan menggunakan metode elemen hingga. Hasil studi menunjukkan bahwa *crash box* segi empat yang dilapisi dengan komposit memiliki nilai *mean crushing force* (P_{mean}) lebih tinggi.

Hasil dari studi menunjukkan bahwa gaya penghancuran rata-rata (P_{mean}) pada *crash box* hibrid aluminium/GFRP 3 lapisan dan 5 lapisan mengalami peningkatan sebesar 29% dan 32% lebih tinggi jika dibandingkan dengan hanya aluminum. Berdasarkan penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa *crash box* hibrid menunjukkan kapasitas yang lebih baik dalam penyerapan energi daripada hanya aluminum. Tabel 2 memperlihatkan perbandingan respon impact aksial antara tabung *crash box* aluminum hibrid 3 .

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terselenggara berkat dukungan dana dari Beasiswa PMDSU Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi.



(a)

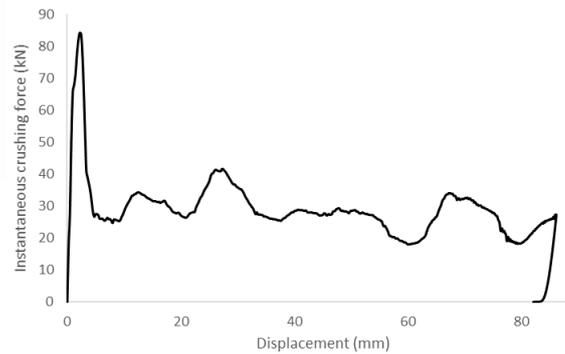


(b)

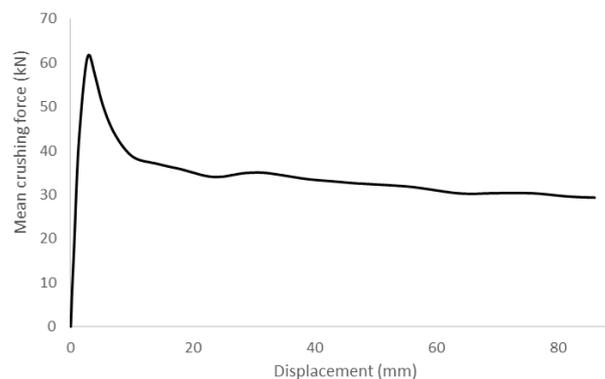


(c)

Gambar 9. Hasil simulasi numerik hibrid aluminium/GFRP 5 lapisan komposit (a) front view (b) side view, (c) top view



(a)



(b)

Gambar 10. Respon tumbukan (a) force-siplacement, (b) mean crushing force (P_m) hibrid aluminum/GFRP 5 lapisan komposit akibat dampak aksial

Tabel 2 Hasil simulasi numerik aluminum & hibrid aluminum/GFRP

Parameter	Aluminum	Hibrid 3 lapisan	Hibrid 5 lapisan
P_{max} (kN)	66.65	79.05	84.36
P_{mean} (kN)	21.35	24.23	29.37
CFE	0.32	0.31	0.35
EA (J)	2436.01	2524.91	2530.16
SEA (J/gr)	21	18.71	10.47

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Polri, "Pusat Informasi Kriminal Polri," Bareskrim Polri, 10 August 2023. [Online]. Available: https://pusiknas.polri.go.id/laka_lantas. [Accessed 10 August 2023].
- [2] A. Jusuf, T. Dirgantara, L. Gunawan and I. S. Putra, "Numerical and Experimental Study of Single-Walled and Double-Walled Columns under Dynamic Axial Loading," *Journal of Mechanical Engineering*, Vols. Vols.9, No.2 (2012), pp. pp. 53-72, 2012.
- [3] L. Gunawan, S. A. Sitompul, T. Dirgantara and I. S. Putra, "Material Characterization and Axial Crushing Tests of Single and Double-Walled Columns at Intermediate Strain Rates," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. Vol. 10 No.2, 2013.
- [4] W. Chen and T. Wierzbicki, "Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption," *Thin-Walled Struct*, vol. 39(4), pp. 287-306, 2001.
- [5] X. Zhang and G. Cheng, "A comparative study of energy absorption characteristics of foam filled and multi-cell square column,"

International Journal Impact Engineering,
vol. 34, pp. 1739-1752, 2007.

- [6] S. Ramakrishna and H. Hamada, "Energy Absorption Characteristics of Crash worthy Structural Composite Material," *Key Engineering Material*, Vols. 141-143, pp. 585-622, 1998.
- [7] Wang, X. (1991). Crushing behavior of multi-material tubular structures. . Ecole Centrale de Lyon: Doctor of Philosophy thesis. Department of Solid Mechanics.