

Analisa Ketahanan Benturan Struktur Bumper Berbasis Material Komposit Hibrida Menggunakan Metode *Finite Element Area* (FEA)

Adit Aryadi^{1*}, Karnowo²

^{1,2} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang
Jl. Raya Banaran, Sekaran, Kec. Gn. Pati, Kota Semarang, Jawa Tengah 50229

*email : aryaadit989@gmail.com

(Received: 22-05-2026; Reviewed: 03-05-2026; Accepted: 07-06-2026)

Abstrak

Kecelakaan lalu lintas, terutama tabrakan frontal, sering menyebabkan kerusakan parah pada struktur depan kendaraan. Bumper memainkan peran penting dalam menyerap energi benturan dan mengurangi kerusakan struktural. Studi ini menganalisis ketahanan benturan struktur bumper menggunakan Komposit *Akrilonitril Butadiena Stirena* (ABS), Komposit *Hibrida Jute-Flax* (JR), dan Komposit *Coconut Shell Particle Polypropylene* (PPCSP) melalui *Finite Element Analysis* (FEA). Geometri bumper dirancang menggunakan software SolidWorks dan disimulasikan menggunakan software ANSYS Workbench dengan metode dinamika eksplisit. Tiga kecepatan tabrakan diterapkan: 11110 mm/s, 15610 mm/s, dan 22220 mm/s. Kinerja dievaluasi berdasarkan deformasi total, tegangan von Mises, dan faktor keamanan. Hasil menunjukkan bahwa komposit JR mencapai deformasi terendah dan faktor keamanan tertinggi, sedangkan PPCSP menunjukkan nilai tegangan yang lebih rendah pada kecepatan yang lebih tinggi. Dibandingkan dengan ABS, kedua komposit menunjukkan kinerja struktural yang lebih baik di bawah beban dinamis. Temuan ini menunjukkan bahwa komposit serat alami hibrida merupakan alternatif yang menjanjikan untuk aplikasi bumper otomotif.

Kata Kunci: bumper, explicit dynamics, finite element analysis, hybrid composite, frontal crash

1. PENDAHULUAN

Kecelakaan lalu lintas merupakan permasalahan keselamatan yang signifikan di Indonesia, dimana tabrakan frontal menjadi jenis kecelakaan yang paling sering terjadi dan menyebabkan kerusakan serius pada bagian depan kendaraan (Basith et al., 2021; Kusumastutie et al., 2024; Santosa et al., 2017). Dalam konteks ini, bumper berperan sebagai komponen utama penyerap energi benturan sekaligus pelindung penumpang dan struktur kendaraan. Oleh karena itu, pemilihan material bumper yang memiliki sifat mekanik dan kemampuan penyerapan energi yang optimal menjadi aspek yang sangat krusial (Sidde et al., 2024).

Material *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) saat ini banyak digunakan sebagai material bumper karena bobotnya yang ringan, kemudahan proses pembentukan, dan biaya manufaktur yang terjangkau. Namun, ABS memiliki batasan dalam hal kekuatan struktural dan kemampuan disipasi energi pada kondisi pembebanan dinamis berkecepatan tinggi (Pai et al., 2024; Ul Abrar et al., 2024). Keterbatasan ini mendorong inovasi pengembangan material alternatif yang lebih ringan namun menawarkan rasio kekuatan terhadap berat yang lebih

tinggi, salah satunya melalui pemanfaatan komposit hibrida berbasis serat alam (Khalid et al., 2021).

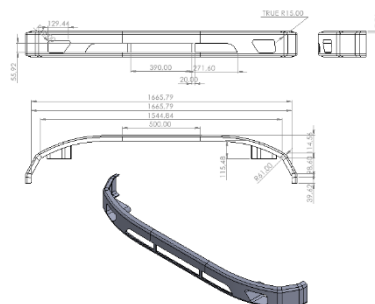
Hibrida komposit yang menggabungkan dua atau lebih jenis penguat serat dalam suatu matriks polimer telah terbukti memberikan kombinasi sifat mekanik yang unggul, termasuk peningkatan kekuatan, kekuatan tarik, dan kemampuan penyerapan energi dibandingkan polimer tunggal (Salim Hamza et al., 2021). Penggunaan serat alam seperti *Jute* dengan *Flax* yang dipadukan dengan resin epoksi menunjukkan potensi yang menjanjikan sebagai material otomotif yang ramah lingkungan, mengingat ketersediaannya yang berlimpah di Indonesia serta karakteristik mekaniknya yang kompetitif (Lau et al., 2012; Sidde et al., 2024).

Dalam rangka memancarkan kinerja material-material tersebut secara efisien, Finite Element Analysis (FEA) menjadi metode yang banyak digunakan dalam pengembangan struktur otomotif. Dibandingkan pengujian eksperimental konvensional yang membutuhkan biaya dan waktu yang besar, simulasi numerik melalui perangkat lunak seperti ANSYS memungkinkan analisis parameter crashworthiness seperti *total deformation*, *von mises stress*, dan *safety factor* secara komprehensif dan fleksibel (Alhijazi et al., 2020). Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan perilaku struktural bumper berbahan *Akrilonitril Butadiena Stirena* (ABS), Komposit Hibrida *Jute-Flax* (JR), dan Komposit Polypropylene dengan partikel tempurung kelapa (PPCSP) menggunakan metode dinamika eksplisit pada variasi kecepatan tumbukan, sebagai dasar evaluasi potensi material komposit hibrida serat alam dalam aplikasi bumper kendaraan (Hazari et al., 2025).

2. METODOLOGI

2.1 Desain Bumper

Desain geometri bumper dalam penelitian ini dibuat menggunakan perangkat lunak SolidWorks dengan pendekatan solid body. Model bumper dirancang dengan bentuk melengkung memanjang yang mengikuti profil aerodinamis kendaraan, sehingga mampu mendistribusikan beban impact secara merata ke seluruh struktur. Geometri penampang melintang bumper mempunyai peranan yang sangat signifikan terhadap kinerja strukturalnya, karena secara langsung mempengaruhi kemampuan komponen dalam menahan beban benturan, mempertahankan integritas bentuk selama kejadian tumbukan, serta mengoptimalkan kapasitas penyerapan energi impact. difungsikan sebagai area integrasi komponen tambahan seperti lampu kabut. Di sisi lain, bumper depan juga berfungsi sebagai komponen pelindung bagi penumpang kendaraan dan berperan dalam meminimalkan risiko cedera pada pejalan kaki saat terjadi kecelakaan. Geometri lengkap dari bumper yang digunakan dalam simulasi ini ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain Bumper
(Sumber: dokumen pribadi)

2.2 Material

Penelitian ini menggunakan tiga jenis material bumper yang dipilih berdasarkan karakteristik mekanik dan relevansinya dalam aplikasi otomotif, yaitu *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) (Al-Mazrouei et al., 2022; Bouhsiss et al., 2025; Chawla et al., 2025), Komposit *Hibrida Jute-Flax* (JR) (Hamdi et al., 2024; Sharma et al., 2026), dan Komposit *Coconut Shell Particle Polypropylene* (PPCSP) (Obasi et al., 2021). Material ABS dipilih sebagai material referensi karena penggunaannya yang sudah umum dalam industri manufaktur bumper kendaraan. Sementara itu, material JR dan PPCSP merupakan material alternatif berbasis komposit hibrida yang dikembangkan dengan memanfaatkan serat alam sebagai penguat. Nilai-nilai sifat mekanik yang digunakan dalam simulasi diperoleh dari data eksperimen pada penelitian terdahulu yang dapat dilihat pada Tabel 1.

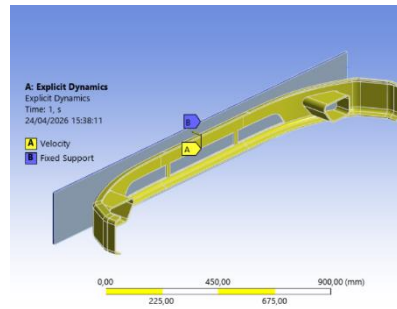
Tabel 1. Karakteristik Material

Material	ABS	JR	PPCSP
Density (kg/m ³)	1030	1250	1000
Young's Modulus (GPa)	2,405	2,19	2,1
Poisson's Ratio (v)	0,4089	0,249	0,36
Tensile Yield Strength (Mpa)	36,1	45	38,4
Ultimate Tensile Strength (MPa)	46,85	64,71	43

2.3 Pengujian Kinerja

Pengujian kinerja bumper dilakukan menggunakan explicit dynamics sebagai pendekatan komplementer untuk memodelkan respons struktur terhadap peristiwa benturan berkecepatan tinggi. analisis menggunakan geometri dan material yang sama, dengan parameter keluaran berupa total deformation, von mises stress, dan safety factor sehingga memungkinkan evaluasi ketahanan benturan secara konsisten. Metode explicit dynamic ini mempertimbangkan perilaku material non linier, interaksi kontak, serta deformasi besar, sehingga sesuai untuk simulasi peristiwa berdurasi singkat dengan perubahan kondisi ekstrem. Model geometri bumper dibuat menggunakan SolidWorks dan dianalisis menggunakan ANSYS Workbench (Ari & Wibawa, 2021; Bahatmaka et al., 2025; Liu & Day, 2008).

Pada analisis Finite Element Area (FEA) sangat penting dalam penentuan kondisi batas untuk mendapatkan hasil simulasi yang akurat. Kondisi batas yang ditentukan kontak antara bumper dan objek penumbuk didefinisikan sebagai dinding kaku (rigid) dengan jarak 1 mm, dengan kondisi batas berupa penguncian titik pemasangan bumper serta penerapan kecepatan benturan pada permukaan depan. Simulasi dilakukan pada tiga tingkat kecepatan berdasarkan standar NHTSA, yaitu 11110 mm/s, 15610 mm/s, dan 22220 mm/s dengan end time yang digunakan sebesar 2.4e-3s (Hazari et al., 2025).



Gambar 2. Boundary Condition
(Sumber: dokumen pribadi)

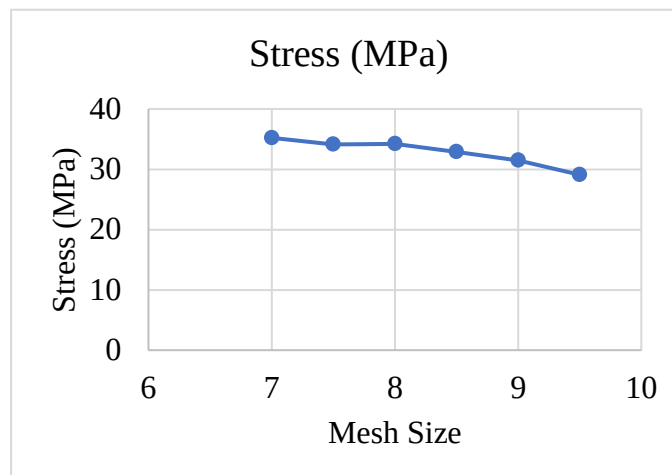
2.4 Konvergensi Mesh

Proses Meshing dalam finite element analysis (FEA) merupakan langkah membagi bentuk geometri menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung, sehingga memungkinkan perhitungan numerik terhadap distribusi tegangan dan deformasi. Ukuran dan kerapatan mesh sangat mempengaruhi tingkat akurasi hasil simulasi, sehingga diperlukan konvergensi mesh untuk memastikan bahwa solusi yang diperoleh tidak lagi bergantung pada perubahan ukuran mesh (Cadet & Paredes, 2024; Patil & Jeyakarthikeyan, 2018). Menurut penelitian terdahulu, hasil simulasi disebut konvergen apabila perubahan parameter hasil seperti von mises stress menunjukkan pola yang stabil meskipun dilakukan perbaikan pada mesh (Ahmad et al., 2013). Oleh karena itu, melakukan validasi dengan menggunakan konvergensi mesh merupakan langkah penting untuk memastikan hasil analisis numerik yang dapat diandalkan dan tetap konsisten.

Berdasarkan hasil validasi mesh yang telah dilakukan, ukuran mesh 7,5 mm menunjukkan nilai yang relatif lebih konstan dibandingkan nilai yang lainnya dapat dilihat pada Tabel , sehingga ukuran ini digunakan dalam seluruh simulasi agar tidak terjadi pemborosan sumber daya komputasi.

Tabel 2. Independensi Mesh

Size Mesh	Nodes	Elements	Von Misses Stress
9,5	20250	34949	29,09
9	22376	38997	31,462
8,5	25717	45191	32,913
8	29335	51867	34,248
7,5	32476	58151	34,09



Gambar 3. Perbandingan nilai tegangan antara mesh 7 sampai mesh 9,5

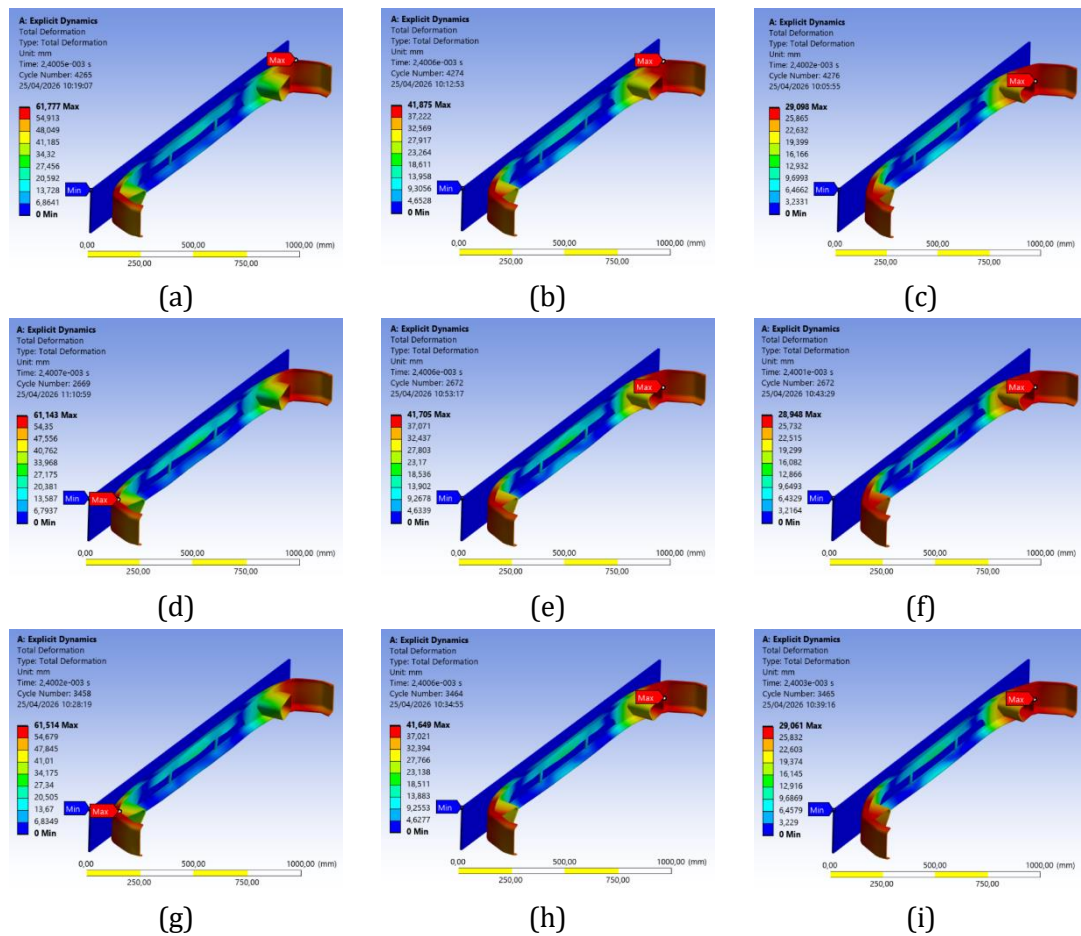
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perbandingan Deformasi Material ABS, JR, dan PPCSP

Simulasi uji tabrak frontal yang dilakukan dengan tiga variasi kecepatan dan tiga variasi material menghasilkan kontur deformasi yang dapat dilihat pada Gambar 4. Pada Tabel 3 memperlihatkan hasil dari uji tabrak frontal yang dilakukan dari ketiga jenis kecepatan dan ketiga material yang diaplikasikan dalam simulasi pada bumper. Dapat dilihat dari hasil tersebut memperlihatkan bahwa material JR terus menerus menunjukkan tren deformasi terendah. Hal ini menjelaskan bahwa komposit hibrida berbasis serat *Jute* dan serat *Flax* memiliki ketahanan struktural yang lebih baik dalam menahan beban dampak frontal dibanding material ABS maupun PPCSP.

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Sharma et al., (2026) yang menyatakan bahwa kombinasi serat rami dan rami mampu meningkatkan kekakuan serta stabilitas struktur komposit karena terjadinya transfer beban yang lebih efektif antara matriks dan penguat serat. Peningkatan kekakuan ini menyebabkan material lebih mampu mempertahankan bentuk geometrinya ketika menerima beban tumbukan sehingga menghasilkan kualitas yang lebih rendah.

Selain itu, Lau et al., (2012) menjelaskan bahwa komposit yang diperkuat serat alami memiliki kemampuan yang baik dalam menyerap dan mendistribusikan benturan energi sehingga dapat mengurangi pengulangan permanen pada struktur. Oleh karena itu, nilai mencapai yang lebih rendah pada material JR menunjukkan bahwa material tersebut memiliki potensi yang lebih baik sebagai material bumper dibandingkan ABS maupun PPCSP.



Gambar 4. Kontur Deformasi (a) ABS 22220 mm/s; (b) ABS 15610 mm/s; (c) ABS 11110 mm/s; (d) JR 22220 mm/s; (e) JR 15610 mm/s; (f) JR 11110 mm/s; (g) PPCSP 22220 mm/s; (h) PPCSP 15610 mm/s; (i) PPCSP 11110 mm/s

Tabel 3. Hasil Deformasi Total

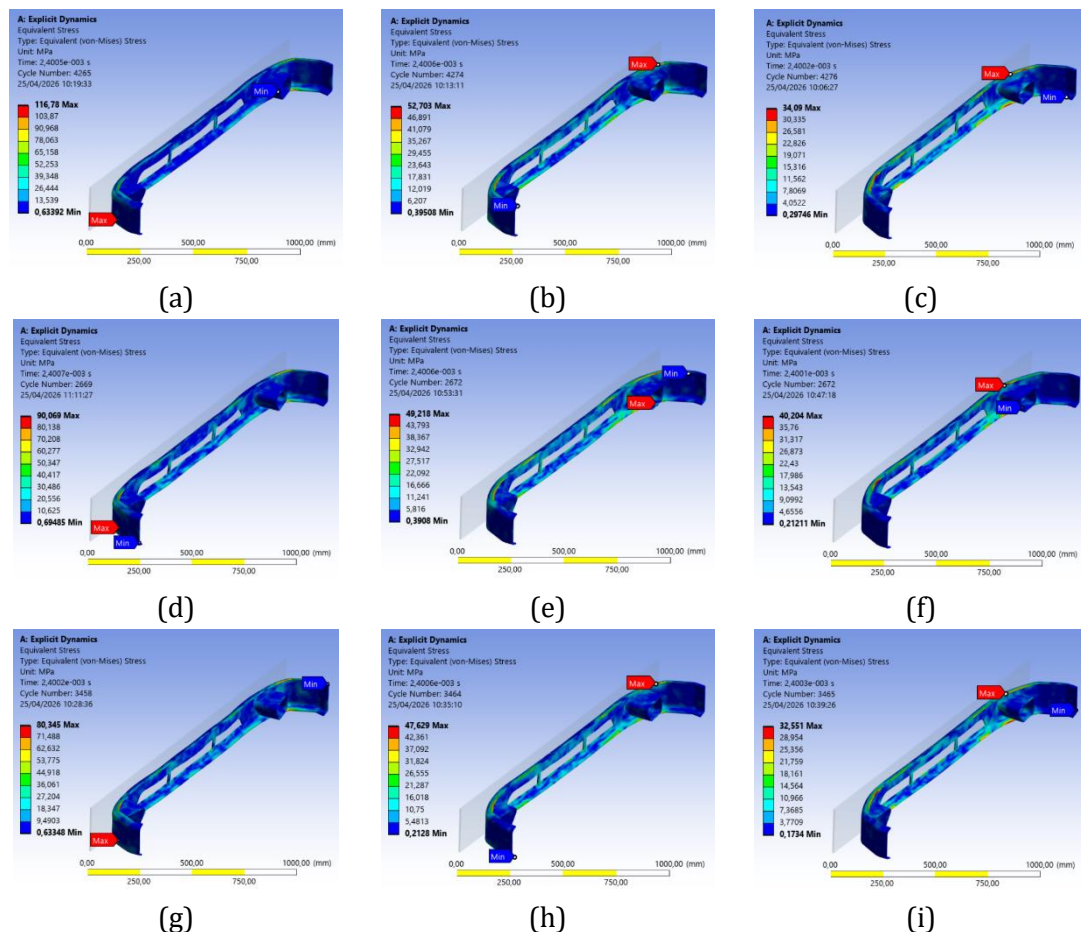
Total Deformation (mm)			
Velocity	ABS	JR	PPCSP
11110 mm/s	29,098	28,948	29,061
15610 mm/s	41,875	41,705	41,649
22220 mm/s	61,777	61,143	61,514

3.2 Perbandingan Tegangan Material ABS, JR, dan PPCSP

Hasil simulasi tegangan pada ketiga material bumper disajikan pada Gambar 5 yang memperlihatkan perubahan kontur tegangan pada ketiga variasi kecepatan di ketiga material. Berbeda dengan pola deformasi, Tidak seperti pola deformasi, pada Tabel 4 hasil distribusi tegangan menunjukkan sifat yang menarik pada ketiga material. Pada kecepatan 11110 mm/s, material JR menunjukkan nilai tegangan yang paling tinggi, yang mengindikasikan bahwa bahan tersebut mampu terdistribusi dan menahan tegangan yang lebih besar sebelum mengalami perubahan bentuk. Namun, pada kecepatan 15610mm/s dan 22220 mm/s, material ABS mengalami tegangan yang paling tinggi, sedangkan PPCSP terus menunjukkan nilai tegangan terendah dalam setiap kondisi pembebanan. Tingginya tegangan pada material ABS di kecepatan tinggi

menunjukkan bahwa material ini mampu menerima konsentrasi tegangan yang lebih besar, yang berkorelasi dengan nilai deformasi tertinggi yang dimilikinya. Sebaliknya, material PPCSP dan JR mampu mendistribusikan tegangan lebih merata, sehingga berpotensi memberikan kekuatan struktur yang lebih baik saat mendapatkan benturan dengan kecepatan tinggi.

Hasil distribusi tegangan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik material berpengaruh terhadap kemampuan struktur dalam menahan dan menyebarkan beban dampak. Menurut Hamdi et al., (2024), komposit hibrida serat alami memiliki mekanisme transfer tegangan yang lebih efektif karena adanya interaksi antara dua jenis penguat serat yang bekerja secara sinergis dalam menahan beban. Sementara itu, nilai tegangan yang lebih rendah pada PPCSP menunjukkan bahwa material tersebut mampu mendistribusikan beban secara lebih merata sehingga mengurangi terjadinya konsentrasi tegangan lokal. Temuan ini sesuai dengan penelitian Obasi et al. (2021) yang melaporkan bahwa penambahan partikel tempurung kelapa pada matriks polipropilena dapat meningkatkan distribusi tegangan dan memperbaiki perilaku mekanik komposit terhadap pembebanan.



Gambar 5. Kontur Tegangan (a) ABS 22220 mm/s; (b) ABS 15610 mm/s; (c) ABS 11110 mm/s; (d) JR 22220 mm/s; (e) JR 15610 mm/s; (f) JR 11110 mm/s; (g) PPCSP 22220 mm/s; (h) PPCSP 15610 mm/s; (i) PPCSP 11110 mm/s

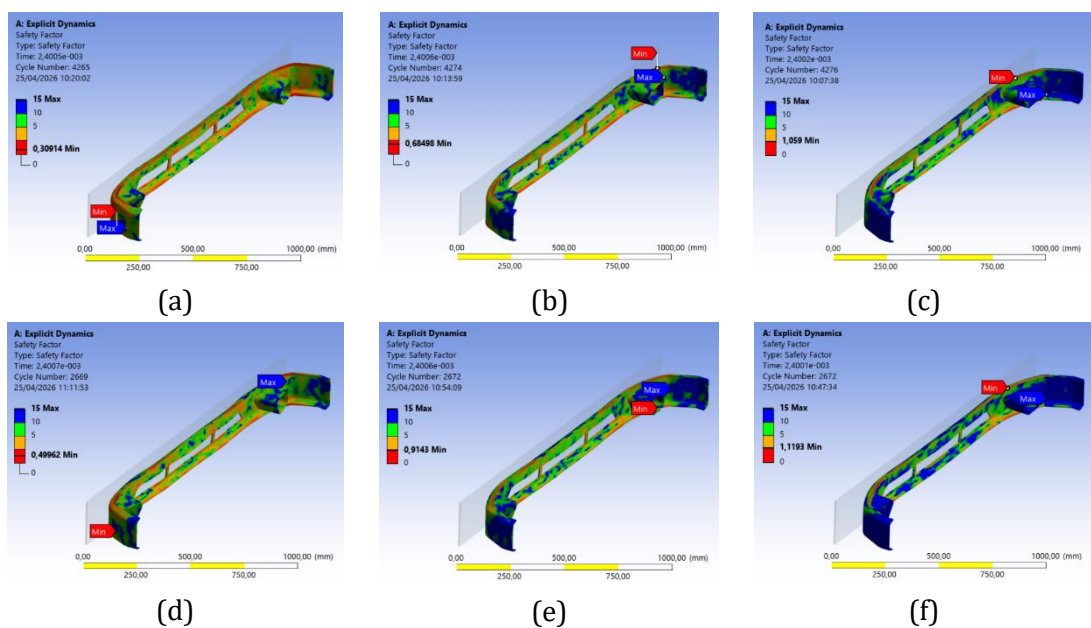
Tabel 4. Hasil Tegangan

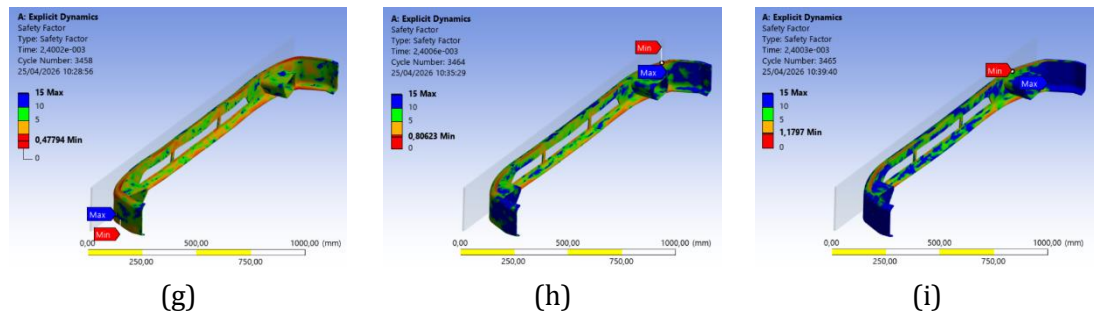
<i>Von Mises Stress (MPa)</i>			
Velocity	ABS	JR	PPCSP
11110 mm/s	34,09	40,204	32,551
15610 mm/s	52,703	49,218	47,629
22220 mm/s	116,78	90,069	80,345

3.3 Perbandingan *Safety Factor* Material ABS, JR, dan PPCSP

Hasil kontur dari simulasi *safety factor* dari ketiga material ditampilkan pada Gambar 6. *Safety factor* adalah parameter penting yang menunjukkan tingkat keselamatan suatu struktur. Jika nilai *safety factor* lebih besar dari 1, berarti menunjukkan struktur tersebut masih aman dan tidak dalam resiko gagal. Namun, jika nilai tersebut kurang dari 1, artinya gaya yang bekerja sudah melebihi kemampuan material untuk menahan beban.

Dari data hasil simulasi pada Tabel 5, terlihat bahwa hanya pada kecepatan tumbukan paling renda 11110 mm/s, ketiga material masih memiliki nilai *safety factor* di atas 1, yang artinya struktur bumper dari ketiga material tersebut masih dalam kondisi aman. Pada kecepatan 15610 mm/s dan 22220 mm/s, semua material menunjukkan nilai *safety factor* di bawah 1, yang menunjukkan bahwa struktur tersebut secara teoritis sudah mengalami kegagalan karena beban impact yang melebihi kemampuan kekuatan material tersebut. Meskipun demikian, material JR secara konsisten mencatat nilai *safety factor* tertinggi untuk setiap variasi kecepatan dibandingkan dengan ABS maupun PPCSP. Sementara ABS menunjukkan nilai *safety factor* yang paling rendah, yang menunjukkan bahwa komposit hibrida berbahan serat alam *Jute* dan *Flax* memiliki daya tahan struktural yang terbaik dibandingkan ketiga material yang diuji, sehingga layak untuk dipertimbangkan sebagai material bumper yang unggul dari aspek keamanan struktural.





Gambar 6. Kontur safety factor (a) ABS 22220 mm/s; (b) ABS 15610 mm/s; (c) ABS 11110 mm/s; (d) JR 22220 mm/s; (e) JR 15610 mm/s; (f) JR 11110 mm/s; (g) PPCSP 22220 mm/s; (h) PPCSP 15610 mm/s; (i) PPCSP 11110 mm/s

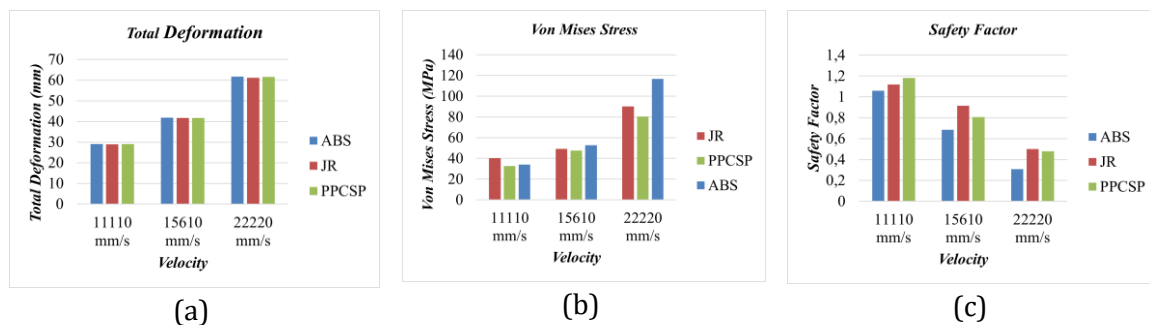
Tabel 4. Hasil Safety Factor

Safety Factor			
Velocity	ABS	JR	PPCSP
11110 mm/s	1,059	1,1193	1,1797
15610 mm/s	0,68498	0,9143	0,80623
22220 mm/s	0,30914	0,49962	0,47794

Nilai safety factor yang lebih tinggi pada material JR menunjukkan bahwa material tersebut memiliki margin keamanan yang lebih baik dibandingkan ABS dan PPCSP. Hal ini dipengaruhi oleh kombinasi sifat kekuatan tarik dan kemampuan penyerapan energi yang dimiliki oleh komposit hibrida Jute-Flax. Menurut Salim Salim Hamza et al., (2021), proses hibridisasi serat alami mampu meningkatkan kelayakan kerusakan serta ketahanan struktur terhadap kegagalan akibat beban tumbukan. Hasil penelitian ini juga mendukung temuan Sidde et al., (2024) yang menyatakan bahwa komposit serat alam berpotensi digunakan sebagai material bumper kendaraan karena mampu memberikan kombinasi yang baik antara kekuatan struktural, bobot ringan, dan aspek keberlanjutan lingkungan. Dengan demikian, material JR dapat dipertimbangkan sebagai alternatif yang lebih unggul dibandingkan ABS konvensional dari aspek keselamatan struktural.

Secara keseluruhan, hasil uji tabrak frontal pada ketiga bahan bumper menunjukkan perbedaan kemampuan yang cukup besar, seperti yang terlihat pada Gambar 7. Dapat dilihat dari segi Total Deformation, material JR (Komposit *Hibrida Jute-Flax*) secara terus menerus mencatat nilai deformasi terendah pada semua variasi kecepatan, lebih baik dibandingkan dengan ABS maupun PPCSP. Dari segi Von Mises Stress, material PPCSP menunjukkan nilai tegangan yang lebih rendah di seluruh kecepatan, yang menunjukkan bahwa distribusi tegangan yang lebih merata dan kemampuan menyerap energi tumbukan yang lebih baik dibandingkan dengan ABS dan JR. Sementara itu dari segi safety factor, material JR secara konsisten menunjukkan nilai tertinggi pada setiap variasi kecepatan dibandingkan dengan ABS dan PPCSP.

Perbandingan keseluruhan ketiga parameter tersebut menunjukkan bahwa material JR memiliki keuntungan lebih sebagai bahan alternatif untuk bumper. Meskipun sedikit lebih berat, akan tetapi memiliki kelebihan yang terbuat dari serat alam serta tahan terhadap deformasi dan tingkat keselamatan struktural yang lebih baik dibandingkan ABS maupun PPCSP dalam kondisi uji tabrak frontal.



Gambar 7. Perbandingan Komparatif (a) Total Deformation; (b) Von Mises Stress; (c) Safety Factor

4. KESIMPULAN

Studi ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan perilaku struktural bumper dengan material ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), JR (Komposit *Hibrida Jute-Flax*), dan PPCSP (Polypropylene dengan partikel tempurung kelapa) melalui simulasi explicit dynamics berbasis FEA pada tiga variasi kecepatan tumbukan frontal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bahan JR secara terus menerus mencatat total deformation yang paling kecil dan safety factor yang terbesar pada semua variasi kecepatan, sehingga menjadikannya pilihan bahan alternatif yang paling baik dari segi kemampuan menahan deformasi dan tingkat keselamatan struktural. Temuan ini membuktikan bahwa material komposit berbasis serat alam mempunyai potensi sebagai pengganti material konvensional pada komponen bumper kendaraan yang berorientasi ringan, berkelanjutan dan ramah lingkungan. Untuk penelitian berikutnya, disarankan untuk melakukan validasi eksperimental terhadap hasil simulasi, menganalisis dampak perubahan kadar serat terhadap kemampuan menyerap benturan, serta mencari kombinasi material komposit hibrida lainnya untuk mendapatkan material bumper yang baik secara struktur dan juga ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M., Ismail, K. A., & Mat, F. (2013). Convergence of finite element model for crushing of a conical thin-walled tube. *Procedia Engineering*, 53, 586–593. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.075>
- Alhijazi, M., Zeeshan, Q., Qin, Z., Safaei, B., & Asmael, M. (2020). Finite Element Analysis of Natural Fibers Composites: A Review. In *Nanotechnology Reviews* (Vol. 9, Number 1, pp. 853–875). De Gruyter Open Ltd. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0069>
- Al-Mazrouei, N., Ismail, A., Ahmed, W., & Al-Marzouqi, A. H. (2022). ABS/Silicon Dioxide Micro Particulate Composite from 3D Printing Polymeric Waste. *Polymers*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/polym14030509>
- Ari, L., & Wibawa, N. (2021). Static Stress Analysis and Fatigue Life Prediction of Rocket Motor Test Stand Using Numerical Simulation. *Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal |*, 6(2), 2528–3723. <https://doi.org/10.21070/rem>
- Bahatmaka, A., Maulana, A. Y., Amin, M., Pratama, F. R. S., Prabowo, A. R., Fitriyana, D. F., Seo, H. A., Ju, H., & Cho, J. H. (2025). Material performance analysis in frontal collision simulation of electric vehicle frames using explicit dynamic finite element analysis method. *Results in Engineering*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107130>
- Basith, M. A., Reddy, N. C., Uppalapati, S., & Jani, S. P. (2021). Crash analysis of a passenger car bumper assembly to improve design for impact test. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1684–1690. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.561>

- Bouhsiss, H., En-naji, A., Kartouni, A., & Elghorba, M. (2025). Mechanical characterization and statistical study of experimental tensile test results of ABS specimens. *Chaos, Solitons and Fractals*, 193. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2025.116107>
- Cadet, G., & Paredes, M. (2024). Convergence analysis and mesh optimization of finite element analysis related to helical springs. *Mechanics and Industry*, 25. <https://doi.org/10.1051/meca/2024018>
- Chawla, K., Hassen, A. A., Garg, N., Pokkalla, D. K., Yao, D., Smith, T., Rodriguez, B., White, B., Zheng, X. R., Lee, E. C., Wu, H. F., & Kim, S. (2025). Property optimized energy absorber for automotive bumpers utilizing multi-material and structural design strategies. *Materials and Design*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113724>
- Hamdi, L., Asma, B., & Ali, B. (2024). Tensile mechanical performance of natural/natural fiber reinforced hybrid bio-composite materials – A statistical approach. In *Journal of Industrial Textiles* (Vol. 54). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/15280837241264014>
- Hazari, H., Kumar, K. S., & Reddy, A. C. (2025). Crashworthiness and explicit dynamic analysis of a car body structure with different materials in multi-obstacle collision. *Progress in Engineering Science*, 2(4), 100133. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2025.100133>
- Khalid, M. Y., Al Rashid, A., Arif, Z. U., Ahmed, W., Arshad, H., & Zaidi, A. A. (2021). Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. In *Results in Engineering* (Vol. 11). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100263>
- Kusumastutie, N. S., Patria, B., Kusrohmaniah, S., & Hastjarjo, T. D. (2024). A review of accident data for traffic safety studies in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1294(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1294/1/012012>
- Lau, S. T. W., Said, M. R., & Yaakob, M. Y. (2012). On the effect of geometrical designs and failure modes in composite axial crushing: A literature review. In *Composite Structures* (Vol. 94, Number 3, pp. 803–812). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.09.013>
- Liu, Y., & Day, M. L. (2008). Experimental analysis and computer simulation of automotive bumper system under impact conditions. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 9(1), 51–59. <https://doi.org/10.1080/15502280701759218>
- Obasi, H. C., Mark, U. C., & Mark, U. (2021). Improving the mechanical properties of polypropylene composites with coconut shell particles. *Composites and Advanced Materials*, 30. <https://doi.org/10.1177/26349833211007497>
- Pai, A., Kalliyath, S. A., Rodriguez-Millan, M., & Shenoy B, S. (2024). Crashworthiness analysis of filled/unfilled automotive bumper beams subjected to head-on collision events: a numerical approach. *Cogent Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2399737>
- Patil, H., & Jeyakarthikeyan, P. V. (2018). Mesh convergence study and estimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012065>
- Salim Hamza, S., Ismail, A. E., Yuhazri, M. Y., Ariffin, A. H., & Hameed Sultan, M. T. (2021). Hybridization Effect on Crashworthiness Parameters of Natural Composite. *Frontiers in Materials*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.619245>
- Santosa, S. P., Mahyuddin, A. I., & Sunoto, F. G. (2017). Anatomy of injury severity and fatality in Indonesian traffic accidents. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 49(3), 412–422. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.3.9>

- Sharma, M., Sharma, R., Pandian P, P., Padhi, M. R., Singh, A. K., & Arockiam, A. J. (2026). Mechanical and moisture resistance properties of flax and jute fiber embedded epoxy composites for lightweight structural applications. *Composite Interfaces*, 1–24. <https://doi.org/10.1080/09276440.2025.2601435>
- Sidde, S. K., Cheung, W. M., & Leung, P. S. (2024). Comparing non-biodegradable plastic with environmentally friendly natural fibre composite on car front bumpers design. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(4), 1075–1087. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02661-6>
- Ul Abrar, M. S., Nadim Ezaz, K. F., Hasan, M. J., Pranto, R. I., Alvy, T. A., & Hossain, M. Z. (2024). Speed-dependent impact analysis on a car bumper structure using various materials. *Results in Engineering*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101927>