

Desain dan Evaluasi Numerik Aksesori Bumper Depan untuk Peningkatan Penyerapan Energi pada Tumbukan Berkecepatan Rendah

Azhari Sastranegara¹, Calvin Tiunardo² dan Arief Goeritno^{3*}

¹ Mechanical Engineering Study Program, Faculty of Engineering, President University
Jababeka Education Park, Bekasi, West Java 17550, Indonesia

² Asia Pacific Resource International Limited (APRIL)

³ Electrical Engineering Study Program, Faculty of Engineering and Science, Universitas Ibn Khaldun Bogor
Sholeh Iskandar km.2, Kedungbadak, Tanah Sareal, Bogor, West Java 16164, Indonesia

*E-mail korespondensi:: arief.goeritno@uika-bogor.ac.id

Abstrak: Aksesori bumper depan banyak digunakan untuk peningkatan perlindungan kendaraan; namun, sebagian besar desain aksesori bumper depan pada kendaraan semata-mata hanya untuk estetika dan perlindungan dasar. Sebagian besar desain yang ada masih dengan kontribusi terbatas terhadap penyerapan energi tumbukan pada kondisi tabrakan berkecepatan rendah. Penelitian ini dengan usulan sebuah aksesori bumper depan yang dirancang untuk peningkatan kemampuan penyerapan energi tumbukan melalui mekanisme deformasi terkendali. Pendekatan simulasi numerik berbasis analisis elemen hingga dinamis eksplisit digunakan untuk evaluasi kinerja tumbukan dari desain yang diusulkan pada kondisi tabrakan frontal berkecepatan rendah. Sistem bumper yang dimodifikasi dibandingkan dengan konfigurasi bumper dasar dengan penggunaan parameter energi tumbukan yang diserap, gaya tumbukan maksimum, dan perilaku deformasi. Penunjukan hasil penelitian berupa aksesori bumper yang diusulkan mampu untuk peningkatan penyerapan energi tumbukan dan penurunan gaya tumbukan maksimum dibandingkan dengan sistem bumper dasar. Hasil kajian kelayakan dengan pertimbangan penambahan massa, kemudahan manufaktur, dan kompatibilitas dengan geometri bumper yang ada menunjukkan bahwa aksesori ini dapat diterapkan sebagai komponen tambahan tanpa perlu upaya modifikasi struktural yang signifikan. Temuan ini sebagai petunjuk, bahwa aksesori bumper dengan fungsi penyerapan energi berpotensi untuk peningkatan kinerja tumbukan berkecepatan rendah pada aplikasi otomotif.

Kata kunci: Aksesori bumper depan; penyerapan energi; tumbukan kecepatan rendah; analisis elemen hingga; keselamatan kendaraan.

Abstract: Front bumper accessories are widely used to enhance vehicle protection; however, most designs are solely for aesthetics and basic protection. Most existing designs still make only a limited contribution to impact energy absorption in low-speed crash conditions. This study proposes a front bumper accessory that enhances impact energy absorption via a controlled deformation mechanism. A numerical simulation approach based on explicit dynamic finite element analysis is used to evaluate the impact performance of the proposed design in low-speed frontal crash conditions. The modified bumper system is compared with the base bumper configuration using parameters of absorbed impact energy, maximum impact force, and deformation behaviour. The research results show that the proposed bumper accessory increases impact energy absorption and reduces the maximum impact force compared to the base bumper system. The results of the feasibility study, considering the additional mass, ease of manufacture, and compatibility with existing bumper geometry, indicate that this accessory can be implemented as an additional component without requiring significant structural modifications. These findings indicate that bumper accessories with energy-absorbing features have the potential to improve low-speed crash performance in automotive applications.

Keywords: Front bumper accessory; Energy absorption; Low-velocity impact; Finite element analysis; Vehicle safety.

I. PENDAHULUAN

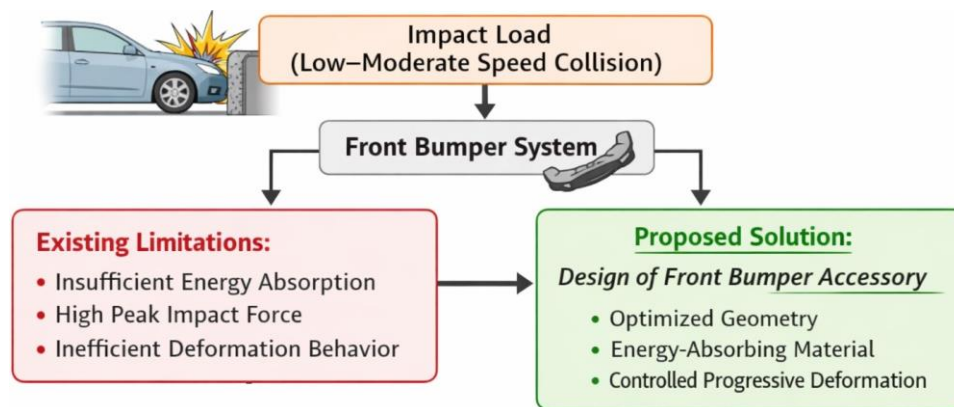
Aksesori bumper depan berperan penting dalam peningkatan keselamatan kendaraan melalui pengurangan kerusakan selama tabrakan berkecepatan rendah hingga menengah, dan sebagai pelindung struktur kendaraan dan pengguna jalan yang rentan. Bumper depan dirancang untuk penyerapan energi benturan selama tabrakan berkecepatan rendah, sehingga dapat untuk pengurangan kerusakan pada

komponen internal dan peningkatan kinerja keselamatan secara keseluruhan [1]. Sistem *bumper* konvensional pada umumnya dirancang untuk pemenuhan persyaratan regulasi tabrakan dan kriteria *crashworthiness* yang sering kali lebih ditekankan kepada integritas struktural dan kepatuhan terhadap standar, dibandingkan optimalisasi efisiensi penyerapan energi. Seiring dengan perkembangan desain otomotif, sistem *bumper* yang optimal saat ini diharapkan mampu untuk pemenuhan aspek keselamatan pejalan kaki sekaligus perlindungan terhadap benturan berkecepatan rendah, yang turut berpengaruh terhadap kecenderungan (*trend*) desain kendaraan modern [2].

Peningkatan kepadatan lalu lintas perkotaan dan semakin besar perhatian terhadap keselamatan pejalan kaki dan pengurangan biaya perbaikan kendaraan, muncul kebutuhan yang semakin tinggi terhadap aksesoris *bumper* tambahan yang mampu untuk peningkatan penyerapan energi benturan tanpa signifikansi penambahan massa, biaya, maupun kompleksitas kendaraan. Pengembangan sistem perlindungan *frontal* yang lebih ramah terhadap pejalan kaki melalui penggunaan material yang lebih lunak dan mampu dalam penyerapan energi merupakan cerminan *trend* tersebut [3]. Kemajuan dalam rekayasa material, desain geometri, dan struktur penyerap energi telah mampu sebagai pembuka peluang baru untuk pengembangan aksesoris *bumper* depan yang dapat mendisipasikan energi tumbukan secara lebih efektif sekaligus tetap kompatibel dengan desain kendaraan yang ada [4].

Meskipun penelitian mengenai *crashworthiness* kendaraan dan optimasi sistem *bumper* telah berkembang luas, perhatian terhadap perancangan sistematis aksesoris tambahan *bumper* depan yang secara khusus bertujuan untuk peningkatan penyerapan energi benturan masih relatif terbatas. Penelitian yang ada, umumnya berfokus pada optimasi komponen utama *bumper*, seperti *bumper beam* dan *crash box*, melalui modifikasi geometri, mekanisme pemicu deformasi, atau substitusi material [5–8]. Walaupun pendekatan tersebut dengan penunjukan peningkatan yang signifikan terhadap kinerja tabrakan secara keseluruhan, masih terdapat kesenjangan dalam pemahaman mengenai kontribusi struktur aksesoris terhadap mitigasi dampak benturan. Selain itu, banyak aksesoris *bumper* yang tersedia secara komersial lebih dalam penekanan pada peningkatan estetika atau perlindungan permukaan yang terbatas. Hal itu berlandaskan sedikit bukti mengenai desain sistematis maupun validasi eksperimental terhadap kemampuan penyerapan energi dalam kondisi benturan yang realistis [9, 10]. Berdasarkan hal itu, diperlukan suatu penelitian yang berfokus pada desain dengan pengintegrasian pemilihan material, konfigurasi struktur, dan evaluasi kinerja benturan untuk pengembangan aksesoris *bumper* depan yang mampu untuk peningkatan penyerapan energi secara signifikan sekaligus tetap praktis untuk aplikasi kendaraan di dunia nyata [11, 8].

Meskipun terdapat berbagai kemajuan dalam penelitian *crashworthiness* kendaraan, strategi penyerapan energi masih sebagian besar difokuskan kepada komponen utama *bumper*, sementara aksesoris *bumper* depan umumnya hanya berfungsi sebagai elemen estetika atau perlindungan minor [12, 8]. Penyerapan energi secara efektif memerlukan pertimbangan terpadu antara geometri struktur, pemilihan material, dan respons terhadap benturan [5, 11], karena struktur tambahan yang dirancang secara kurang tepat dapat sebagai penyebab kekakuan yang berlebihan atau gaya puncak benturan yang tidak diinginkan [9]. Berdasarkan hal itu, diperlukan suatu kerangka desain yang mampu untuk pengembangan aksesoris *bumper* depan dengan kemampuan optimal dalam penyerapan energi dan pengendalian gaya puncak selama benturan berkecepatan rendah hingga menengah, dengan tetap mempertimbangkan batasan terkait berat, kemudahan manufaktur, biaya, dan kompatibilitas dengan sistem *bumper* yang telah ada [6, 13]. Formulasi permasalahan dan kerangka solusi untuk desain dan evaluasi berbasis simulasi dari aksesoris *bumper* depan pada kondisi benturan *frontal* berkecepatan rendah seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Formulasi permasalahan dan kerangka solusi untuk desain dan evaluasi berbasis simulasi dari aksesoris bumper depan pada kondisi benturan frontal berkecepatan rendah.

Artikel ini merekomendasikan seperangkat tujuan penelitian yang disusun secara sistematis mulai dari desain konseptual hingga validasi kinerja yang sesuai untuk naskah rekayasa terfokus, yaitu: (i) Mengidentifikasi dan menganalisis kelemahan aksesoris bumper depan yang ada saat ini terkait kemampuan penyerapan energi benturan dan efektivitas strukturalnya [12, 8]; dan (ii) Merancang aksesoris bumper depan yang mampu meningkatkan penyerapan energi benturan melalui pemilihan material dan konfigurasi struktur yang tepat [5, 7, 9]. Berdasarkan tujuan penelitian yang diusulkan melalui metode desain *crashworthiness* yang telah mapan dengan penekanan evaluasi sistematis terhadap struktur yang ada, integrasi desain material–geometri, validasi kinerja numerik dengan penggunaan metrik penyerapan energi dan gaya puncak, dan penilaian kelayakan berdasarkan kondisi aplikasi nyata [5, 11, 6, 8].

Artikel ini disusun dalam lima bab utama [14, 15]. Bab I berupa Pendahuluan dengan pemaparan latar belakang penelitian, rumusan masalah, dan tujuan penelitian [14, 15]. Bab II berisi Tinjauan Pustaka [16, 17, 2, 18] dengan pembahasan perkembangan terkini terkait aksesoris *bumper* depan dan penyerapan energi benturan. Bab III berupa Metode Penelitian dengan cakupan proses desain konseptual dan pemilihan material [19, 20]. Bab IV penyajian Hasil dan Pembahasan, dengan kinerja desain usulan yang dianalisis [13, 8]. Terakhir, Bab V berupa Kesimpulan keseluruhan penelitian dan arah penelitian lanjutan [21, 22]. Struktur artikel ini dengan konvensi penulisan ilmiah pada penelitian rekayasa dan komputasi, yang dikembangkan dari perumusan masalah dan tinjauan pustaka dilengkapi metode penelitian, hasil dan pembahasan, diakhiri Kesimpulan, sebagaimana direkomendasikan dalam kerangka penulisan ilmiah dan analisis numerik standar [14, 20, 13].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Manajemen tabrakan pada bagian depan kendaraan modern umumnya diperlakukan sebagai suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu outer fascia, bumper beam (sebagai elemen struktural transversal utama), serta elemen penyerap energi yang ditempatkan di antara keduanya—biasanya berupa busa atau struktur menyerupai sarang lebah (*bumper absorber*)—ditambah dengan *crush* atau *collision box* yang dirancang untuk mengalami deformasi progresif guna pengelolaan energi pada benturan dengan energi lebih tinggi. Praktik perancangan saat ini dengan target yang terkadang saling bertentangan, seperti pembatasan biaya perbaikan pada benturan berkecepatan rendah sekaligus pengelolaan beban pada tabrakan berkecepatan tinggi, dan peningkatan kinerja keselamatan terhadap benturan pada kaki pejalan kaki. Referensi industri dan pustaka teknis dengan penjelasan, bahwa penambahan elemen penyerap energi berkecepatan rendah, seperti busa atau material sejenis yang ditempatkan di antara *fascia* dan *bumper beam* dapat secara signifikan berpengaruh terhadap kekakuan

struktur dan kemampuan penyerapan energi, sekaligus berkontribusi terhadap peningkatan perlindungan bagi pejalan kaki [16].

Penggunaan blok busa sederhana, seperti *lattice* dan *honeycomb* dengan geometri tertentu dalam *trend* penelitian terkini, dirancang secara khusus untuk pengembangan struktur seluler rekayasa. Struktur ini dipilih, karena dapat disetel untuk dapat dihasilkan proses deformasi progresif yang optimal, sehingga mampu untuk penyerapan energi spesifik yang tinggi dan gaya puncak terkendali untuk pengurangan risiko cedera maupun kerusakan struktural. Sejumlah penelitian terbaru, berupa peningkatan penggunaan arsitektur *lattice* yang dioptimalkan dan konsep multi-material untuk penyeimbangan kebutuhan pengelolaan energi pada tabrakan berkecepatan rendah dengan aspek keselamatan pejalan kaki. Beberapa desain, bahkan secara sengaja dengan variasi sudut *lattice* atau kombinasi material guna pembentukan respon gaya–perpindahan yang diinginkan. Di sisi lain, penelitian paralel juga terus berkembang pada peningkatan kinerja *crush box* berdinding tipis, termasuk varian yang diisi dengan struktur *lattice*, dan kotak penyerap energi yang terinspirasi dari struktur *honeycomb* yang diintegrasikan di sekitar *bumper beam*. Hal ini merupakan cerminan pergeseran pendekatan desain menuju penyerapan energi berbasis geometri struktur, bukan hanya bergantung pada kekuatan material secara massal [17].

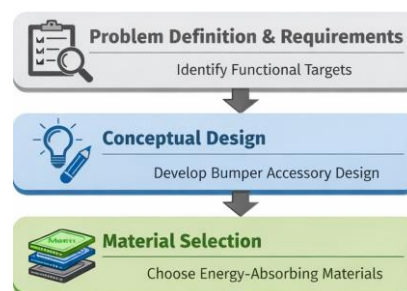
III. METODE PENELITIAN

Metode penelitian dikembangkan dengan cakupan kerangka penelitian dan pendekatan umum, material dan peralatan, dan pelaksanaan penelitian. Pendekatan ini berbentuk kerangka komprehensif untuk perancangan dan evaluasi secara sistematis terhadap aksesoris *bumper* depan dengan tujuan untuk peningkatan terhadap penyerapan energi benturan dan perbaikan kinerja *crashworthiness* kendaraan [19, 20].

A. Kerangka Penelitian dan Pendekatan Umum

Penelitian ini menggunakan metodologi desain komputasional–eksperimental yang umum digunakan dalam penelitian *crashworthiness* dan analisis benturan struktural. Pendekatan ini mengintegrasikan desain konseptual, pemilihan material, simulasi numerik, serta evaluasi kinerja [23, 24]. Tujuan utama penelitian ini, adalah pengembangan aksesoris *bumper* depan yang mampu untuk peningkatan penyerapan energi benturan pada tabrakan berkecepatan rendah hingga menengah. Metode pengintegrasian dilakukan untuk tahap perumusan masalah, desain konseptual, dan pemilihan material. Analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis*, FEA) digunakan sebagai alat utama untuk evaluasi perilaku benturan dan karakteristik deformasi sebelum pembuatan prototipe fisik sesuai praktik analisis benturan yang telah mapan [20, 13]. Kerangka penelitian serupa dengan sejumlah penelitian dalam pengembangan dan evaluasi komponen otomotif penyerap energi pada kondisi benturan berkecepatan rendah hingga menengah [6, 8].

Alur kerangka penelitian terdiri atas beberapa tahap utama, yaitu (i) identifikasi kebutuhan fungsional dan target kinerja, (ii) perancangan konseptual dan geometrik aksesoris *bumper* depan, dan (iii) pemilihan material penyerap energi yang sesuai. Alur kerangka penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Alur kerangka penelitian

Gambar 2 berupa penunjukan kerangka penelitian yang terdiri atas tahapan utama, yaitu: (i) persyaratan desain dan asumsi, (ii) desain konseptual dan geometrik aksesoris *bumper*, dan (iii) strategi pemilihan material. Tahapan lanjutan berupa permodelan numerik dan analisis elemen hingga, kriteria evaluasi kinerja, dan validasi dan analisis sensitivitas.

A.1. Persyaratan desain dan asumsi

Aksesoris *bumper* depan dirancang untuk beroperasi pada kondisi benturan frontal berkecepatan rendah hingga menengah dengan keterwakilan tabrakan pada lingkungan perkotaan, dengan efisiensi penyerapan energi dan reduksi gaya puncak menjadi tujuan desain yang penting [6, 9, 8]. Deformasi progresif terkontrol dan efisiensi massa, merupakan persyaratan penting dalam desain *crashworthiness*, terutama untuk komponen tambahan terintegrasi dengan sistem *bumper* yang sudah ada [11, 7]. Sesuai dengan praktik permodelan numerik pada analisis benturan, struktur kendaraan di belakang *bumper* diasumsikan tidak mengalami perubahan, benturan diasumsikan dominan frontal, dan perilaku material dimodelkan sebagai isotropik dengan pertimbangan pengaruh laju regangan, jika diperlukan [20, 13].

A.2. Desain konseptual dan geometrik aksesoris *bumper*

Aksesoris *bumper* depan dirancang sebagai komponen tambahan (*add-on*) yang dipasang di depan atau terintegrasi dengan *bumper beam* yang sudah ada. Geometri struktur dioptimalkan, agar mampu dihasilkan deformasi progresif ketika penerimaan beban benturan [6, 9]. Fitur geometrik utama yang dipertimbangkan meliputi zona deformasi yang telah ditentukan (*predefined crush zones*), struktur berongga atau seluler, serta variasi ketebalan secara bertahap. Fitur-fitur ini dikenal efektif dalam peningkatan *specific energy absorption* sekaligus pengurangan gaya puncak benturan [5, 25, 11]. Perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD) digunakan untuk permodelan tiga dimensi dan dilakukan penyempurnaan geometri secara iteratif guna pencapaian keseimbangan antara kekakuan struktur, stabilitas deformasi, dan kemudahan manufaktur [23, 24].

A.3. Strategi pemilihan material

Pemilihan material dilakukan berdasarkan kemampuan penyerapan energi, karakteristik deformasi, efisiensi massa, serta kesesuaian untuk aplikasi otomotif. Beberapa material kandidat yang dipertimbangkan, meliputi material penyerap energi berbasis polimer, seperti *expanded polypropylene* (EPP) dan *polyurethane foam*, paduan aluminium dengan perilaku deformasi tekan terkontrol, dan konfigurasi material hibrida dengan penggabungan lapisan logam dan inti polimer. Prinsip pemilihan material dengan konsepsi *crashworthiness* dan metode seleksi material yang telah mapan [26, 8]. Sifat material dalam simulasi, meliputi densitas, modulus elastisitas, kekuatan luluh, dan sensitivitas terhadap laju regangan. Data sifat material diperoleh dari pustaka ilmiah maupun basis data material standar dan dimasukkan ke dalam model numerik sesuai dengan praktik analisis benturan digunakan secara umum [20, 13].

B. Material dan Peralatan

B.1 Material

Material dalam penelitian ini diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama, yaitu material polimer, logam, dan sistem material hibrida dengan perbedaan peran masing-masing dalam proses penyerapan energi benturan. Material polimer dan busa polimer banyak digunakan pada sistem perlindungan benturan kendaraan, karena kepemilikan densitas rendah, kemampuan penyerapan energi spesifik yang tinggi, dan kemampuan dalam deformasi besar yang dapat pulihkan kembali. Material polimer umumnya berfungsi sebagai elemen pengorbanan (*sacrificial elements*) pada benturan berenergi rendah hingga menengah [25, 30, 9]. Material logam, dengan keterwakilan struktur *bumper beam* konvensional, berfungsi sebagai elemen struktural utama untuk pemberian dukungan mekanis dan deformasi plastis yang stabil selama benturan, sehingga berkontribusi pada disipasi energi yang terkontrol dan penjaminan integritas struktur sistem *bumper* [31, 27, 13].

Sementara itu, sistem material hibrida berupa gabungan penyerap energi polimer dan komponen struktural logam, telah terbukti mampu untuk pemanfaatan keunggulan kedua jenis material tersebut secara bersamaan, sehingga dihasilkan kontrol deformasi lebih baik dan pengurangan gaya puncak benturan [32, 8]. Sifat material yang digunakan dalam simulasi, termasuk densitas, modulus elastisitas, kekuatan luluh, dan parameter deformasi plastis, diperoleh dari literatur ilmiah dan basis data material standar sesuai praktik permodelan numerik yang umum digunakan [26, 20].

B.2 Peralatan teknik dan perangkat lunak

Berbagai peralatan teknik digunakan untuk dukungan proses perancangan dan analisis dengan cakupan permodelan geometrik, simulasi numerik, pasca-pemrosesan hasil simulasi, dan analisis data. Permodelan geometrik tiga dimensi digunakan untuk presentasi dan modifikasi konfigurasi struktur sebelum proses analisis dilakukan [23, 24]. Peristiwa benturan dengan melibatkan deformasi besar dan perilaku material non-linear, biasanya disimulasikan dengan penggunaan metode elemen hingga dinamis eksplisit [20, 13]. Teknik pasca-pemrosesan digunakan untuk ekstraksi respon gaya-perpindahan, riwayat energi terserap, dan mode deformasi dari hasil simulasi [9, 10]. Selain itu, perangkat analisis data digunakan untuk perlakuan perbandingan sistematis, visualisasi hasil, dan evaluasi parametrik terhadap berbagai metrik kinerja [29, 30].

C. Pelaksanaan Penelitian

Penggunaan simulasi *finite element dynamic explicit* untuk evaluasi penyerapan energi benturan telah banyak digunakan dalam penelitian *crashworthiness* kendaraan [31, 28]. Studi numerik komparatif antara konfigurasi *bumper* dasar dan termodifikasi di bawah kondisi benturan yang sama juga merupakan pendekatan umum untuk kepastian evaluasi kinerja yang objektif [6, 7]. Respon benturan biasanya dianalisis dengan kurva gaya-perpindahan dan energi-waktu untuk evaluasi energi terserap, gaya puncak benturan, dan karakteristik deformasi struktur [32, 5].

C.1 Desain penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan rekayasa berbasis simulasi (*simulation-based engineering approach*) terfokus pada analisis benturan numerik untuk evaluasi efektivitas aksesoris *bumper* depan dalam peningkatan penyerapan energi. Metode kuantitatif ini dengan kemungkinan investigasi parameter desain secara sistematis tanpa harus dilakukan pengukuran eksperimental pada tahap awal yang perlu biaya dan kompleksitas tinggi.

C.2 Strategi analisis komparatif

Strategi penelitian komparatif diterapkan dengan penggunaan dua model numerik utama, yaitu -) model dasar (*baseline model*) dengan representasi sistem *bumper* asli kendaraan dan -) model modifikasi dengan pengintegrasian aksesoris *bumper* depan yang diusulkan. Kedua model tersebut dikenai kondisi benturan yang sama untuk kepastian konsistensi dan objektivitas dalam evaluasi kinerja.

C.3 Prosedur simulasi

Prosedur simulasi berupa beberapa tahapan utama yang meliputi -) pengembangan model geometrik dan material untuk kedua konfigurasi *bumper*, -) penerapan kondisi batas yang setara dan kecepatan benturan yang telah ditentukan, dan -) pelaksanaan simulasi benturan dinamis eksplisit.

C.4 Pengaturan parameter numerik untuk simulasi

Simulasi numerik dilakukan dengan bantuan aplikasi ANSYS Explicit Dynamics, setelah tahap transfer model. Diskretisasi elemen hingga penggunaan elemen cangkang (SHELL163) yang digunakan untuk representasi struktur *bumper* ber dinding tipis. Ukuran elemen global sebesar 3–5 mm yang digunakan, dengan penyempurnaan lokal 2–3 mm di wilayah deformasi kritis untuk secara akurat sebagai penangkap perilaku perlipatan progresif. Kontrol *hourglass* terimplementasi digunakan skema

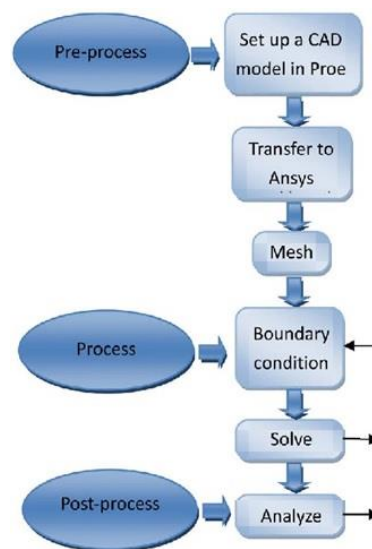
stabilisasi otomatis yang disediakan oleh ANSYS untuk pencegahan mode deformasi non-fisik. Energi *hourglass* dijaga di bawah nilai 5% dari total energi internal untuk kepastian stabilitas numerik. Penskalasian massa diterapkan secara konservatif untuk pencapaian langkah waktu stabil minimum pada kisaran sebesar 1×10^{-6} detik, sambil dipastikan massa tambahan yang tidak melebihi 5% dari total massa struktural. Integrasi waktu dengan pengikutan skema perbedaan pusat eksplisit dan langkah waktu otomatis yang diatur oleh kriteria stabilitas Courant. Total waktu simulasi 0,02 detik yang digunakan untuk representasikan kondisi benturan berkecepatan rendah. Stabilitas numerik dan konvergensi dinilai berdasarkan keseimbangan energi dengan kepastian, bahwa total energi tetap hampir konstan sepanjang simulasi.

C.5 Analisis data

Hasil simulasi dianalisis dengan penggunaan respon gaya–perpindahan dan energi–waktu untuk pengukuran peningkatan kinerja. Efektivitas aksesoris *bumper* yang diusulkan ditentukan dengan perbandingan peningkatan energi terserap dan penurunan gaya puncak benturan terhadap konfigurasi dasar.

C.6 Diagram alir

Bagian ini dengan penyertaan ilustrasi skematis dan rangkuman metode penelitian berbasis simulasi secara visual. Alur pelaksanaan penelitian untuk desain dan evaluasi aksesoris *bumper* depan berbasis simulasi seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Alur pelaksanaan penelitian untuk desain dan evaluasi aksesoris *bumper* depan berbasis simulasi

Berdasarkan Gambar 3 dapat dijelaskan, bahwa alur pelaksanaan penelitian merupakan petunjuk urutan logis tahapan penelitian, dimulai dari perumusan masalah dan persyaratan desain, dilanjutkan dengan permodelan geometrik, penentuan material, simulasi benturan numerik, hingga evaluasi kinerja.

IV. HASIL DAN BAHASAN

Bagian ini berupa penyajian dan pembahasan temuan penelitian sesuai dengan tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Setiap subbagian secara langsung berkaitan dengan masing-masing tujuan penelitian untuk kepastian kejelasan, keterkaitan, dan konsistensi antara tujuan, metode, dan hasil yang diperoleh.

A. Analisis Aksesori Bumper Depan yang Ada

Sesuai dengan tujuan penelitian pertama, dilakukan analisis mendalam terhadap aksesori bumper depan yang telah ada untuk identifikasi keterbatasan dalam hal penyerapan energi benturan dan efektivitas struktural. Sistem bumper dasar (*baseline bumper system*) sebagai representasi konfigurasi konvensional tanpa tambahan aksesori penyerap energi, terlebih dahulu dievaluasi pada kondisi benturan frontal yang sama dengan desain termodifikasi. Hasil simulasi sebagai petunjuk, bahwa sistem dasar tersebut terutama bergantung pada bumper beam sebagai elemen utama dalam pendisipasian energi benturan. Hal itu berakibat, deformasi yang terjadi sangat terlokalisasi pada daerah bumper beam, sementara komponen luar bumper hanya memberikan kontribusi sangat kecil terhadap penyerapan energi. Perilaku ini menghasilkan respons gaya–perpindahan yang relatif curam yang ditandai dengan peningkatan gaya benturan yang cepat pada tahap awal tabrakan.

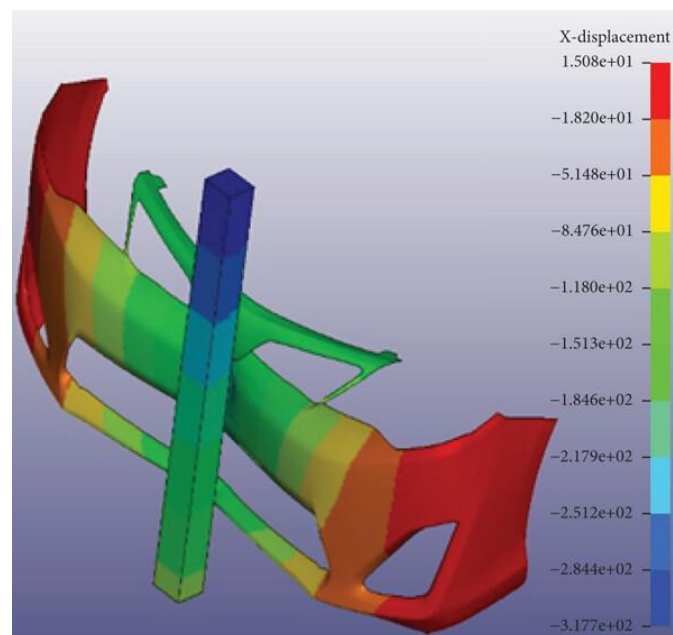
Selain itu, beberapa aksesori bumper yang umum digunakan, seperti pelindung dekoratif kaku atau elemen tambahan dengan kekakuan tinggi, terbukti dengan pemberian manfaat terbatas dalam mitigasi benturan. Aksesori tersebut umumnya tidak dengan zona deformasi khusus (*crush zones*) dan memiliki kekakuan awal yang tinggi, sehingga deformasi tertunda dan proses disipasi energi menjadi tidak efisien. Dalam beberapa kasus, keberadaan aksesori yang terlalu kaku, bahkan dapat meningkatkan gaya benturan puncak, karena pembatasan deformasi alami dari bumper beam.

Pola deformasi teramat pada konfigurasi sistem dasar maupun aksesori konvensional dengan penunjukan mode keruntuhan yang tidak stabil atau dadakan dengan kontrol sangat terbatas terhadap urutan deformasi. Perilaku semacam ini tidak diinginkan dalam perspektif *crashworthiness*, karena peningkatan kemungkinan terjadinya transmisi beban yang besar ke struktur kendaraan di bagian belakang. Secara keseluruhan, hasil analisis dengan penunjukan, bahwa sebagian besar aksesori bumper depan yang ada saat ini tidak dioptimalkan untuk penyerapan energi benturan, melainkan lebih difokuskan pada aspek estetika atau perlindungan permukaan terbatas. Keterbatasan ini sebagai petunjuk keberadaan kebutuhan yang jelas terhadap suatu aksesori bumper yang dirancang secara khusus untuk memicu deformasi lebih awal, sehingga dapat dihasilkan keruntuhan progresif, dan secara efektif untuk pengurangan gaya benturan puncak sebelum beban diteruskan ke struktur bumper utama.

B. Hasil Perancangan Aksesori Bumper Depan yang Diusulkan

Penjawaban terhadap tujuan penelitian kedua, aksesori bumper depan yang diusulkan dikembangkan dengan fokus utama pada peningkatan penyerapan energi benturan melalui pemilihan material dan konfigurasi struktur yang dioptimalkan. Desain yang diusulkan memperkenalkan komponen penyerap energi khusus yang ditempatkan di bagian depan bumper beam yang sudah ada, sehingga komponen ini dapat terlibat lebih awal saat terjadi benturan frontal. Geometri aksesori dirancang dengan memasukkan zona keruntuhan yang telah ditentukan untuk mendorong deformasi progresif dan stabil selama proses benturan.

Variasi bertahap pada ketebalan penampang dan penggunaan struktur berongga atau seluler memungkinkan struktur alami deformasi secara terkendali, sehingga menghindari perubahan kekakuan tiba-tiba yang dapat menghasilkan gaya benturan puncak yang tinggi. Konfigurasi ini untuk kepastian, bahwa energi benturan dapat didisipasikan selama langkah deformasi yang lebih panjang. Kontur deformasi dari aksesori bumper depan yang diusulkan pada berbagai tahap benturan frontal berkecepatan rendah dengan penunjukan transisi dari deformasi elastis terlokalisasi menuju keruntuhan progresif yang terkendali dan deformasi plastis terdistribusi. Tampilan kontur deformasi aksesori bumper depan yang diusulkan pada kondisi benturan frontal, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Tampilan kontur deformasi aksesoris *bumper* depan yang diusulkan pada kondisi benturan frontal

Berdasarkan Gambar 4 dapat dijelaskan, bahwa kontur deformasi dari aksesoris *bumper* depan yang diusulkan, ketika terjadi penerimaan beban benturan frontal tahap kontak awal, deformasi terbatas pada bagian depan struktur.

Seiring dengan keberlangsungan benturan, deformasi plastis mulai terjadi pada zona keruntuhan yang telah ditentukan dan kemudian terjadi penyebaran secara merata ke seluruh struktur. Selama tahap keruntuhan progresif, mekanisme perlipatan dan kompresi terkendali mendominasi respon struktur, sehingga dimungkinkan disipasi energi benturan secara efektif. Pada kondisi deformasi maksimum, aksesoris dengan penunjukan konfigurasi deformasi yang stabil tanpa lokalisasi deformasi berlebihan maupun kegagalan struktural. Hal ini sebagai bentuk konfirmasi efektivitas desain yang diusulkan dalam penurunan gaya benturan puncak dan peningkatan penyerapan energi.

Pemilihan material juga berperan penting terhadap hasil desain yang diperoleh. Sistem material berbasis polimer atau sistem material hibrida dipilih untuk pemberian keseimbangan antara karakteristik ringan dan kemampuan penyerapan energi spesifik yang tinggi. Pengkombinasian dengan elemen struktural logam, konfigurasi hibrida ini mampu untuk peningkatan stabilitas deformasi sekaligus mempertahankan kapasitas penahan beban yang memadai. Kontur deformasi berbasis simulasi sebagai petunjuk, bahwa aksesoris yang diusulkan mulai alami deformasi sebelum *bumper beam*, sehingga secara efektif sebagai pelindung komponen struktural utama dari beban benturan yang besar. Perilaku ini sebagai petunjuk, bahwa aksesoris tersebut berfungsi sebagai penyerap energi pengorbanan (*sacrificial energy absorber*). Parameter geometrik dan material utama untuk desain aksesoris *bumper* depan yang diusulkan, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter-parameter geometrik dan material utama untuk desain aksesoris *bumper* depan yang diusulkan**(A) Parameter-parameter Geometris**

Parameter	Simbol	Nilai	Unit	Deskripsi/Peran Desain
Panjang keseluruhan	L	1.200	mm	Sesuai dengan lebar balok bumper depan
Tinggi keseluruhan	H	120	mm	Kepastian cakupan zona benturan depan
Kedalaman keseluruhan	D	80	mm	Pemberian langkah deformasi yang cukup
Ketebalan dinding	t	2,5	mm	Dioptimalkan untuk keruntuhan progresif
Panjang sel runtuh	l_c	60	mm	Pengontrolan terhadap panjang gelombang lipatan
Jumlah segmen runtuh	n_c	6	–	Kemungkinan penyerapan energi secara bertahap
Ketebalan pelat pemasangan	t_m	4,0	mm	Kepastian transfer beban yang aman
Jarak bebas ke <i>bumper beam</i>	g	10	mm	Kemungkinan deformasi terkontrol tanpa gangguan

(B) Material Properties (Energy-Absorbing Component)

Kepemilikan	Simbol	Nilai	Unit	Catatan
Tipe material	–	Paduan baja ulet	–	Ketersediaan secara komersial
Densitas	ρ	7.850	kg/m ³	Baja struktural tipikal
Modulus Young	E	210	GPa	Rezim elastis linear
Rasio Poisson	ν	0,30	–	Asumsi isotropik
Kekuatan luluh	σ_y	320	MPa	Kemungkinan disipasi energi plastis
Kekuatan tarik maksimum	σ_u	450	MPa	Pencegahan patahan dini
Regangan putus	ε_f	0,25	–	Duktilitas tinggi
Modulus pengerasan regangan	H	1,2	GPa	Pendorongan keruntuhan yang stabil

(C) Contact and Boundary Parameters (Simulation-Relevant)

Parameter	Nilai	Unit	Kegunaan
Koefisien gesek (kontak)	0,3	–	Representasi interaksi baja ke baja
Kecepatan tumbukan	6	km/h	Kondisi kerusakan kecepatan rendah
Kondisi batasan	Tetap pada kedudukan	–	Pensimulasian pemasangan pada balok <i>bumper</i>
Tipe penyelesaian	Dinamika eksplisit	–	Penangkapan dampak deformasi besar

Berdasarkan Tabel 1 dapat dijelaskan, bahwa rangkuman parameter-parameter geometrik dan material utama aksesoris *bumper* depan yang diusulkan. Konfigurasi geometrik dirancang untuk pemberian langkah deformasi yang cukup dan pendorongan keruntuhan progresif selama benturan frontal. Sifat material dipilih untuk kepastian deformasi plastis yang stabil tanpa kegagalan dini. Parameter tersebut kemudian dimasukkan ke dalam model numerik dinamis eksplisit untuk evaluasi penyerapan energi benturan dan respon gaya struktur.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini dengan kajian desain dan evaluasi numerik dari aksesoris *bumper* depan yang bertujuan untuk peningkatan penyerapan energi benturan pada tabrakan frontal berkecepatan rendah. Aksesoris yang diusulkan dikembangkan sebagai komponen tambahan dengan fitur deformasi terkontrol guna meningkatkan kinerja crashworthiness kendaraan. Hasil simulasi numerik dengan penunjukan, bahwa sistem *bumper* yang dimodifikasi memiliki kemampuan penyerapan energi benturan yang lebih tinggi dan gaya benturan puncak yang lebih rendah dibandingkan dengan konfigurasi *bumper* dasar. Analisis deformasi juga mengonfirmasi, bahwa desain yang diusulkan mampu hasilkan keruntuhan progresif stabil, sehingga energi benturan dapat didisipasikan secara lebih efektif sebelum diteruskan ke struktur kendaraan.

Evaluasi kelayakan dengan penunjukan, bahwa aksesoris *bumper* yang diusulkan dapat diterapkan secara praktis dengan peningkatan massa yang relatif kecil dan tanpa modifikasi signifikan pada sistem *bumper* yang sudah ada. Berdasarkan perspektif praktis, hasil penelitian ini dengan penunjukan, bahwa aksesoris *bumper* penyerap energi dapat memberikan manfaat fungsional lebih besar dibandingkan sekadar peningkatan estetika pada skenario benturan berkecepatan rendah. Penelitian

lanjutan direkomendasikan untuk cakupan validasi eksperimental dan pengukuran pada berbagai kondisi benturan tambahan guna evaluasi lebih lanjut terhadap kinerja dan penerapan desain yang diusulkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Sugiri, M.B. Triyono, Y. Budiman, Y.A. Fadlullah, R.J. Setiawan, and M.R. Maulana, “Bumper Impact Test Damage and Static Structural Characterization in Hybrid Composite Aided by Numerical Simulation and Machine Learning Analysis,” *Vehicles*, vol. 7, no. 4, article number 133, 2025. <https://doi.org/10.3390/vehicles7040133>
- [2] D. Jan, M.S. Khan, I.U. Din, K.A. Khan, S.A. Shah, and A. Jan, “A review of design, materials, and manufacturing techniques in bumper beam system,” *Composites Part C: Open Access*, Vol. 14, article number 100496, 2024. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100496>.
- [3] TRL Ltd., “Report 243 - A Study of Accidents Involving Bull Bar Equipped Vehicles,” *DfT Research Database*, Reference: S070M/VF, TRL Ltd., 1996, December 1. [Online], Available: <https://web.archive.org/web/20070612151909/http://www.rmd.dft.gov.uk/project.asp?intProjectID=10328>
- [4] F. Mo, S. Zhao, C. Yu, Z. Xiao, and S. Duan, “Design of a Conceptual Bumper Energy Absorber Coupling Pedestrian Safety and Low-Speed Impact Requirements,” *Appl Bionics and Biomechanics*, vol. 2018, no. 1, Article ID 9293454, 2018 Jan 14. <https://dx.doi.org/10.1155/2018/9293454>.
- [5] H.S. Kim, and T. Wierzbicki, “Crash behavior of thin-walled box sections with various triggering mechanisms,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 25, no. 8, pp. 735–754, 2001. <https://www.dx.doi.org/>
- [6] J. Marzbanrad, M. Alijanpour, and M.S. Kiasat, “Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal impacts,” *Thin-Walled Structures*, vol. 47, no. 8–9, pp. 902–911, 2009.
- [7] M.M. Davoodi, and S.M. Sapuan, “Polymeric-based composite automotive bumper beam: A review,” *Materials and Design*, vol. 35, pp. 676–689, 2012.
- [8] G. Sun, G. Li, S. Zhou, Q. Li, and S. Hou, “Crashworthiness design for energy absorption structures: A state-of-the-art review,” *Thin-Walled Structures*, vol. 124, pp. 87–100, 2018.
- [9] G. Lu, and T. Yu, *Energy absorption of structures and materials*. Sawston, Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2003.
- [10] S.R. Reid, and G. Zhou. *Impact behaviour of energy absorbing structures*. Boca Raton, FL: CRC Press. 2000.
- [11] H.R. Zarei, and M. Kroger, “Multi-objective crashworthiness optimization of circular tubes,” *International Journal of Crashworthiness*, vol. 13, no. 2, pp. 129–141, 2008.
- [12] H.F. Mahmood, and S. Palanivelu, “Crashworthiness design of automotive structures: A review,” *International Journal of Crashworthiness*, vol. 18, no. 4, pp. 1–15, 2013.
- [13] N. Jones, *Structural impact*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.
- [14] R.A. Day, and B. Gastel, *How to write and publish a scientific paper*, 7th ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.
- [15] W.C. Booth, G.G. Colomb, J.M. Williams, J. Bizup, and W.T. Fitzgerald, *The craft of research*, 4th ed. Chicago, IL: University of Chicago Press, 2016.
- [16] European Aluminium. *The Aluminium Automotive Manual*. [Online] Available: https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/11/4_aam_crash-management-systems1.pdf
- [17] K. Chawla, A.A. Hassen, N. Garg, D.K. Pokkalla, D. Yao, T. Smith, B. Rodriguez, B. White, X.R. Zheng, E.C. Lee, H.F. Wu, and S. Kim, “Property optimized energy absorber for automotive bumpers utilizing multi-material and structural design strategies,” *Journal of Materials and Design*, vol. 253, Article ID 113724, 2025. <https://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113724>.
- [18] Dun-Bri, *Guide To: UNECE R127 - Pedestrian Safety*. Dun-bri.com [Online] Available: <https://www.dun-bri.com/Regulations-Standards/UNECE-Regulations/Guide-To-ECE-R127-Pedestrian-Safety>

- [19] J.D. Anderson, *Computational fluid dynamics: The basics with applications*. New York, NY: McGraw-Hill, 2011.
- [20] K.J. Bathe, *Finite element procedures*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2006.
- [21] R. Murray, *How to write a thesis*, 4th ed. London, UK: Open University Press, 2017.
- [22] J.M. Swales, and C.B. Feak, *Academic writing for graduate students*, 3rd ed. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 2012.
- [23] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.-H. Grote, *Engineering design: A systematic approach*, 3rd ed. New York, NY: Springer, 2007.
- [24] K.T. Ulrich, and S.D. Eppinger, *Product design and development*, 6th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2016.
- [25] L.J. Gibson, and M.F. Ashby, *Cellular solids: Structure and properties*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [26] M.F. Ashby, *Materials selection in mechanical design*, 4th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [27] M. Langseth, and O.S. Hopperstad, "Static and dynamic axial crushing of square aluminium extrusions," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 18, no. 7–8, pp. 949–968, 1996.
- [28] J.O. Hallquist, *LS-DYNA theory manual*, Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2006.
- [29] J.P.C. Kleijnen, *Design and analysis of simulation experiments*. Berlin, Germany: Springer, 2008.
- [30] D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 9th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2017.
- [31] T. Belytschko, W.K. Liu, and B. Moran, *Nonlinear finite elements for continua and structures*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.
- [32] W. Abramowicz, and N. Jones, "Dynamic axial crushing of square tubes," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 179–208, 1984. [https://dx.doi.org/10.1016/0734-743X\(84\)90005-8](https://dx.doi.org/10.1016/0734-743X(84)90005-8)