

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

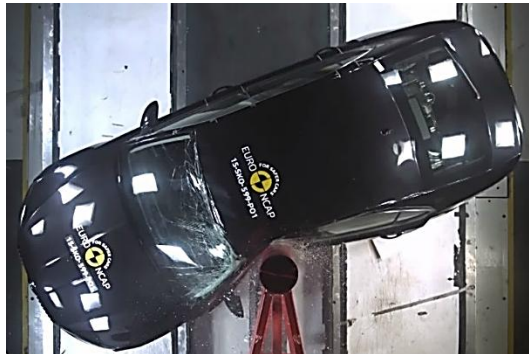
Pada era saat ini, kebutuhan terhadap transportasi semakin meningkat tiap tahunnya, baik itu kendaraan roda dua maupun kendaraan roda empat (Ayodeji Mofolasayo, 2023). Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang cepat membuat produsen kendaraan, terutama dalam jenis mobil, berlomba-lomba menciptakan produk baru yang canggih, aman, ergonomis dan murah (Fauzan Djamiluddin, 2023). Namun, disaat kebutuhan terhadap alat transportasi meningkat, dunia industri dihadapkan pada dua isu global yang sangat penting, yaitu permasalahan energi dan lingkungan (Zahid Muhammad, et al., 2023).

Sejak Indonesia menjadi importir bahan bakar minyak, isu energi selalu menghiiasi media informasi setiap tahun. Berita yang disampaikan pun tidak lepas dari kenaikan harga BBM (Ayodeji Mofolasayo, 2023). Di tahun 2023, pemerintah harus menaikkan harga BBM di sebabkan oleh banyak hal salah satunya kenaikan harga minyak mentah dunia dan ICP (Indonesian Crude Price) (Zahid Muhammad, et al., 2023). Begitu pula dengan isu lingkungan yang selalu dijumpai di media informasi saat ini. Kota-kota besar semakin sesak dan memiliki kualitas udara yang semakin memburuk (Bambang Singichetti, et al., 2020). Tentu saja hal itu akan menimbulkan permasalahan baru, misalnya masalah kesehatan masyarakat dan bencana industri, yang akan membebani negara dikemudian hari. Sehingga diperlukan sebuah solusi bagi industri transportasi untuk dapat mengatasi dua isu tersebut (Fauzan Djamiluddin, 2023).

Pada sejarahnya, mobil listrik lahir bersamaan dengan mobil motor bakar di akhir abad 19. Hanya saja, pengembangan mobil listrik mengalami kendala karena riset yang dilakukan pada mobil listrik tidak menghasilkan produk yang memadai, terutama di bagian baterai (Zahid Muhammad, et al., 2023). Sementara riset di bidang mobil motor bakar sangat pesat perkembangannya ditandai dengan banyaknya industri yang lahir di bidang mobil motor bakar (Wai Kee Liu, et al., 2022). Sehingga tidak dapat dipungkiri, teknologi mobil motor bakar saat ini sangat tinggi karena sudah berkembang selama seratus tahun lebih (Fauzan Djamiluddin, 2023). Namun tetap saja mobil motor bakar memiliki masalah di bidang energi dan lingkungan yang dampaknya pelan tapi terus meningkat (Ayodeji Mofolasayo, 2023).

Keselamatan kendaraan listrik kini menjadi prioritas utama dalam regulasi global. Berbeda dengan standar konvensional yang lama, regulasi modern seperti UN Regulation No. 135 menekankan perlindungan vital pada uji tabrak samping tiang (*Pole Side Impact*) untuk mencegah deformasi berlebih yang dapat merusak paket baterai (Belingardi & Scattina, 2023). Standar keselamatan terkini tidak hanya berfokus pada sabuk pengaman atau ABS semata, tetapi mewajibkan integrasi struktur proteksi baterai yang mampu menahan intrusi ekstrem untuk mencegah risiko *thermal runaway* atau ledakan pasca-tabrakan (Sun et al., 2022). Berkaitan dengan standar tersebut, penelitian ini berfokus pada aspek *crashworthiness* mobil listrik, khususnya pada perlindungan benturan samping. Hal ini krusial karena tidak seperti benturan depan yang memiliki ruang deformasi (*crumple zone*) yang luas, benturan samping memiliki jarak yang sangat

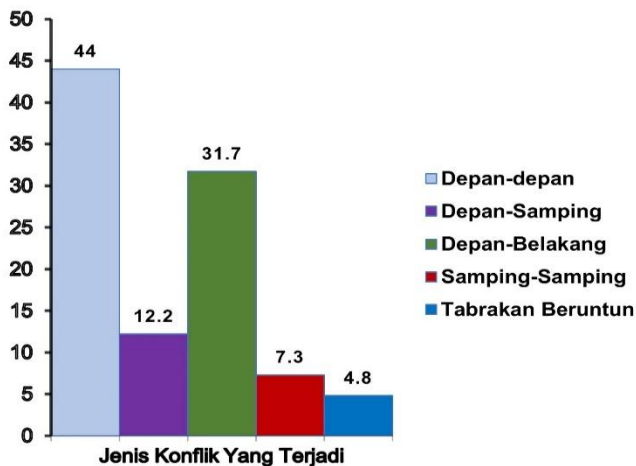
sempit antara sisi luar kendaraan dengan penumpang dan modul baterai (Djamaluddin, 2023).



Gambar 1. Ilustrasi uji tabrak samping pada mobil (www.euroncap.com)

Mobilitas berkelanjutan telah menjadi fokus utama disektor transportasi darat (Ayodeji Mofolasayo, 2023). Mobil listrik telah menjadi solusi yang menjanjikan untuk mengatasi isu terkait energi dan lingkungan (Fauzan Djamaluddin, 2023). Namun, dengan munculnya mobil listrik, juga timbul kekhawatiran terkait keamanan dan keselamatan pengguna (Zahid Muhammad, et al., 2023).

Di Indonesia tercatat jumlah kecelakaan pada tahun 2022 mulai 1 Januari - 31 Desember yakni sebanyak 25.138 laka (Raja Fauzi Siregar, 2022). Terdapat tiga tipe korban kecelakaan lalu lintas, yaitu luka ringan, luka berat, dan meninggal dunia. Jumlah korban tertinggi adalah luka ringan dengan total 29.519 korban atau berkisar 76,44 persen. Sedangkan jumlah yang meninggal dunia menempati posisi kedua terbesar, totalnya mencapai 3.706 korban. Sisanya, sebanyak 3.706 korban mengalami luka berat (Erin Sauber-Schazt, et al., 2020).



Gambar 2. Grafik persentasi tabrakan mobil (Raja Fauzi Siregar.,dkk 2022)

Faktor penyebab kecelakaan lalu lintas adalah 61% oleh faktor manusia, 9% oleh faktor kendaraan, dan 30% oleh faktor prasarana dan lingkungan (Raja Fauzi Siregar,

2022). Meski penyebab kecelakaan ini bervariasi, akibat kecelakaan tetap berujung pada kerusakan kendaraan dan kerugian penumpang. Efek kerusakan ini dapat diminimalisir dengan menerapkan sistem keamanan yang baik pada kendaraan (Erin Sauber-Schazt, et al., 2020). Oleh karena itu, dibutuhkan komponen keselamatan yang dapat melindungi dari sisi samping (Belingardi & Scattina, 2023).

Salah satu komponen struktural utama yang berfungsi menyerap energi kinetik saat terjadi benturan samping adalah *rocker panel* atau *side sill*. Struktur ini berperan sebagai *crumple zone* lateral yang bertugas mendisipasikan energi tumbukan sebelum mencapai modul baterai dan kabin penumpang (Djamaluddin, 2023). Keunggulan aluminium adalah densitasnya yang tiga kali lebih rendah daripada baja. Berkat densitasnya yang rendah, aluminium mengurangi bobot saat digunakan pada kendaraan. Selain itu, ketahanannya tiga kali lebih tinggi daripada baja, yang memberikan ketahanan terhadap benturan dan kemampuan penyerapan energinya yang tinggi serta ketahanan benturannya yang sangat baik. Aluminium dan paduannya juga selangkah lebih maju daripada baja karena sifatnya yang non-magnetik dan tidak menimbulkan percikan api. Aluminium merupakan material yang sangat penting yang dapat digunakan baik pada baterai maupun bodi kendaraan karena strukturnya (Demirkesen, A., & Uçar, M., 2020). Disisi lain rocker panel ini dapat dijadikan sebagai pijakan kaki (foot step).

Beberapa peneliti yang telah mengkaji pelindung yang berbahan dasar aluminium diantaranya (Fauzan Djamaluddin ,2023). *Peak Crushing Force* (PCF) dan *Specific Energy Absorption* (SEA), indeks kelaikan tabrakan, dimuat untuk menentukan desain ambang pintu yang optimal. Dan membuat permasalahan multiobjektif berbasis *Radial Basis Functions* (RBF) dengan menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA). Metode Sorting Genetic Technique II (NSGA-2) Non dominasi untuk optimasi multi-objektif digunakan untuk mengoptimalkan PCF dan SEA dari tabung ganda melingkar berisi busa bersama dengan parameter lainnya. Sedangkan pada penelitian yang lainnya, mengoptimalkan bentuk penampang (pelindung keselamatan) bagian pada fender kapal laut untuk mencegah tabrakan saat kapal sandar atau parkir agar tidak terjadi gesekan langsung pada bodi kapal dengan menggunakan metode taguchi. (zulfish sarah ,2022).

Meskipun demikian, untuk memenuhi tuntutan kekuatan yang diinginkan dalam aplikasi tertentu, Aluminium dengan karakteristik kemampuan permesinan yang baik, kekuatan yang tinggi, dan tingkat ketahanan terhadap korosi yang baik. Namun unsur ini harus dipadukan dengan beberapa unsur dan dilakukan beberapa perlakuan untuk mendapatkan sifat mekanis yang diinginkan. Salah satu paduan dari aluminium adalah Al- Mg2Si yang dinamakan seri Aluminium 6061(Fauzi Widyawati, dkk, 2024).

Paduan ini umumnya dikenal karena bobotnya yang ringan, ketahanan korosi yang tinggi, dan kemampuan las yang baik. Di antara penggunaan umum paduan AA6061, industri otomotif memanfaatkannya secara besar-besaran karena bobotnya yang ringan, yang berarti pengurangan emisi CO₂ ke atmosfer berkat penghematan bahan bakar; selain itu, paduan ini digunakan dalam industri kedirgantaraan karena sifat konduktivitas termal dan listriknya yang sangat baik , bobotnya yang ringan, dan ketahanan korosinya (Isidro Guzman, dkk, 2022).

"Dalam aspek *crashworthiness*, Aluminium 6061-T6 terus menjadi material pilihan utama karena karakteristik mekaniknya yang unggul. Studi terbaru menunjukkan bahwa optimalisasi perlakuan panas (*artificial aging*) pada paduan ini mampu meningkatkan kekerasan dan kekuatan tariknya secara signifikan, yang berkontribusi langsung pada efisiensi penyerapan energi saat terjadi deformasi plastis akibat tumbukan (Widyawati et al., 2024). Hal ini membuktikan kemampuannya dalam menyerap energi benturan, sehingga memberikan dimensi baru dalam desain struktur pelindung.

Berdasarkan uraian di atas, diperlukan penelitian lebih mendalam mengenai struktur pelindung rocker panel dengan variasi bentuk. Hal ini bertujuan untuk memahami perilaku lentur material pelindung aluminium 6061 T6. Metode pengujian test impact akan diaplikasikan menggunakan software metode Elemen Hingga untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam terkait sifat mekaniknya. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif pada pengembangan teknologi material, khususnya dalam moda transportasi modern di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini ialah:

1. Bagaimana Membuat model komponen rocker panel pada baterai mobil listrik?
2. Bagaimana menganalisis kekuatan tegangan dan penyerapan energi model rocker panel menggunakan uji impact?
3. Bagaimana memvalidasi hasil simulasi dengan membandingkan pengujian secara eksperimen?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini ialah:

1. Membuat model komponen rocker panel pada baterai mobil listrik.
2. Menganalisis kekuatan Tegangan dan penyerapan energi model rocker panel menggunakan uji impact.
3. Memvalidasi hasil simulasi dengan membandingkan pengujian secara eksperimen.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagi penulis, sebagai pembelajaran terkait material aluminium dan juga sebagai syarat dalam menyelesaikan studi Sarjana Teknik, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
2. Bagi pembaca, dapat mengetahui pengaruh perilaku lentur rocker panel berbahan aluminium 6061 T6 berdasarkan hasil permodelan metode elemen hingga (Finite Element Method) menggunakan software Abaqus CAE.
3. Bagi universitas, dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya.

1.5 Batasan masalah

1. Analisis dilakukan melalui simulasi numerik menggunakan software abaqus. Tidak dilakukan eksperimen fisik atau pengujian di lapangan
2. Kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban dan faktor eksternal lainnya tidak diperhitungkan.
3. Komponen yang dianalisis difokuskan hanya pada struktur *Rocker Panel (Side Sill)* yang berfungsi sebagai pelindung samping paket baterai (*battery pack*) pada kendaraan listrik, tanpa memodelkan keseluruhan bodi kendaraan (*full vehicle model*)
4. Model spesimen berdimensi panjang 1780 mm, lebar 50 mm, dan tinggi 75 mm. Bentuk penampang dasar yang digunakan adalah *semicircular + rectangle* (setengah lingkaran + persegi) dengan ketebalan dinding 8 mm
5. Jenis material yang digunakan dalam simulasi dibatasi pada Aluminium Alloy 6061-T6. Sifat material diasumsikan homogen dan isotropik, dengan perilaku deformasi mengikuti model plastisitas von Mises.
6. Kondisi batas (*boundary condition*) dan pembebanan pada simulasi mengacu pada skenario uji tabrak samping (*Side Impact*) yang relevan dengan standar keselamatan (seperti *ASEAN NCAP* atau *UN Regulation No. 135*). Parameter tumbukan ditetapkan dengan kecepatan indentor 13,8 m/s (setara 50 km/jam) dan massa penabrak sebesar 950 kg.

1.6 Landasan Teori

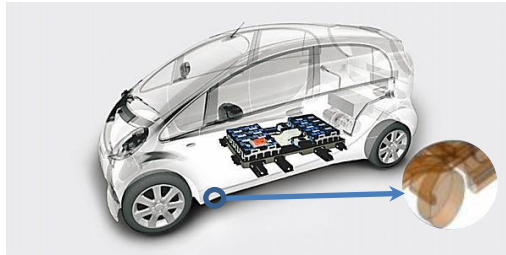
1.6.1 *Rocker panel*

Keselamatan berkendara merupakan salah satu poin terpenting yang harus diperhatikan di jalan raya. Tujuan utama keselamatan kendaraan adalah Peningkatan aksesibilitas, menghasilkan pengalaman transportasi yang lebih aman, kematian yang lebih sedikit dan cedera yang minimal. Kesalahan buatan manusia yang menyebabkan bencana kecelakaan, untuk memastikan keamanan individu, perlu untuk menyebarkan model pembelajaran yang sangat efisien dan akurat dilatih pada berbagai skenario mengemudi untuk secara tepat mendeteksi objek di sekitarnya dalam kondisi cuaca dan pencahayaan yang berbeda. Prosedur pembelajaran melalui pelatihan ini akan menyesuaikan proses pengambilan keputusan kendaraan dan mekanisme kontrol untuk mengambil tindakan yang diperlukan.

Mobil listrik merupakan inovasi yang diklaim lebih rama lingkungan jika dibandingkan dengan mobil konvensional. Beberapa tahun ini mobil listrik tengah populer dikalangan masyarakat hal ini disebabkan performanya yang tak kalah dengan kendaraan konvensional. Disisi lainnya, terkait kelayakan kendaraan listrik telah memenuhi standar dan sertifikasi oleh badan tertentu. *Global Technical Regulations (GTRs)* yang mengeluarkan standar untuk kendaraan listrik yang dimulai pada sistem pengereman, sistem pengamanan baterai, sistem pengisian, perlindungan terhadap kejut serta perlindungan terhadap air. (*unece.org*)

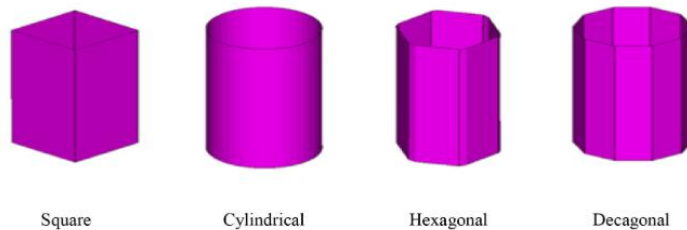
Dalam kecelakaan kecepatan rendah, kerusakan pada struktur samping mobil sering terjadi. Peran struktur side mobil adalah untuk menghalangi baterai dan pempang dari benturan ke rangka kendaraan dengan menyerap energi benturan. Untuk memaksimalkan energi yang diserap oleh struktur rocker panel dipasang di sisi samping

bawah pintu kendaraan untuk menyerap energi tabrakan. Bentuk rocker panel dan materialnya sangat mempengaruhi penyerapan energi saat terjadi tumbukan.



Gambar 3. Posisi penampang pada rangka mobil listrik (Fauzan 2022)

Rocker panel (sering disebut sebagai *side sill* atau *door sill beam*) didefinisikan sebagai komponen struktural longitudinal utama yang terletak di bagian paling bawah dari sisi bodi kendaraan. Disisi lainnya, pemilihan bentuk di pengaruhi oleh beberapa faktor yaitu struktur geometri, material penyusun dan jenis pembeban. Terlihat pada gambar di bawah terdapat bentuk bentuk.



Gambar 4. Bentuk Penampang

Lebih lanjut, struktur penampang tidak hanya bermuara pada bentuk penampangnya. Kajian mengenai dinding strukturnya, juga dibagi ke dalam dua kategori, yaitu Struktur dinding tebal (*thick-wall structure*) dan Struktur dinding tipis (*thin-wall structure*).

1.6.2 Tegangan-Regangan

Tegangan dapat di definisikan sebagai sistem gaya atau beban eksternal yang bekerja pada suatu benda, gaya internal baik sama dan berlawanan dipasang diberbagai bagian benda yang menahan gaya eksternal. Tegangan dapat di rumuskan sebagai perbandingan jumlah perbandingan gaya atau reaksi dengan luas penampang. Maka persamaan yang di gunakan adalah

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Dimana:

- σ = Tegangan (N/mm²)
 F = Gaya yang bekerja (N)
 A = Luas penampang (mm²)

Regangan merupakan perubahan ukuran dari panjang mula mula, sebagai hasil dari gaya yang menekan atau menarik pada material. Batasan sifat elastis perbandingan tegangan regangan akan linier dan akan berakhir pada titik luluh. Regangan juga dapat di artikan sebagai kondisi material yang mengalami deformasi. Regangan dapat di notasikan dengan persamaan berikut ini:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\delta}{l} \quad (2)$$

Dimana:

- ε = Regangan
 l = Panjang mula-mula benda (mm)
 δ = Pertambahan Panjang benda (mm)

1.6.3 Tegangan Von Mises

Teori von Mises membantu kita memahami kapan bahan bisa rusak. Konsep ini diciptakan oleh Huber pada tahun 1904 dan diperbaiki oleh von Mises serta Hencky. Teori tersebut menjelaskan bahwa suatu bahan akan rusak ketika kita memberikan tekanan dari banyak arah sekaligus. Persamaan von Mises yang dihasilkan mengindikasikan bahwa kegagalan tergantung pada hubungan antara tegangan utama. Jadi, teori ini membantu kita memahami dan mencegah kerusakan pada bahan saat dikenakan tekanan dari berbagai arah.

$$\sigma_V = \sqrt{\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] + 6[\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2]} \quad (3)$$

Tegangan von Mises menunjukkan kemampuan bahan menyerap energi distorsi akibat tegangan normal dan geser dari tiga arah tegangan utama. Dalam teori kegagalan von Mises, jika nilai tegangan von Mises lebih besar atau sama dengan kekuatan luluh (S_y) bahan, itu berarti bahan tersebut memiliki kekuatan struktural yang baik. (*Iremonger, 1990*)

1.6.4 Uji Impact

Impact tester adalah uji jangka pendek yang memberikan informasi tentang perilaku kegagalan material atau komponen yang mengalami pemuatan cepat dan pada temperature yang bervariasi. System pengujian yang digunakan untuk pengujian ini adalah penguji impak pendulum atau penguji drop weight. Dari uji impak terjadi proses penyerapan energi yang besar ketika beban menumbuk spesimen. Energi yang diserap material ini dapat dihitung dengan menggunakan prinsip perbedaan energi potensial. Prinsip pengujian impak ini adalah menghitung energi yang diserap oleh specimen. Uji

impak dilakukan untuk mengetahui keuletan suatu bahan atau material yang diberikan beban secara tiba-tiba. Cara kerja alat uji impact adalah dengan memukul benda yang akan diuji kekuatannya dengan pendulum yang berayun. Pendulum tersebut ditarik hingga ketinggian tertentu lalu dilepas, sehingga pendulum tersebut memukul benda uji hingga patah.

Pengujian impact charpy (juga dikenal sebagai tes Charpy v-notch) merupakan standar pengujian laju regangan tinggi yang menentukan jumlah energi yang diserap oleh bahan selama terjadi patahan. Energi yang diserap adalah ukuran ketangguhan bahan tertentu dan bertindak sebagai alat untuk belajar bergantung pada suhu transisi ulet getas. Tujuan uji impact charpy adalah untuk mengetahui kegetasan atau keuletan suatu bahan (spesimen) yang akan diuji dengan cara pembebanan secara tiba-tiba terhadap benda yang akan diuji secara static (Supriono, A. D., & Wicaksono, D., 2022

1.6.5 Crashworthinnes

kemampuan kendaraan untuk menyerap energi benturan dan melindungi penumpang kendaraan pada saat terjadi kecelakaan. Dirancang dengan beberapa sistem pelindung yang bertujuan untuk meningkatkan kelayakan kendaraan. (Ardian, & FX. Djamari, 2015). Crashworthiness merupakan kemampuan struktur pada kendaraan yang digunakan untuk mengurangi cedera pada penumpang saat terjadi kecelakaan. Crashworthiness mempunyai kriteria antara lain gaya tumbukan puncak (F_{max}), penyerapan energi spesifik (SEA), dan efisiensi gaya tumbukan (CFE) (Dionisius dkk, 2018).

1.6.6 Parameter Crushworthiness

Beberapa indikator kinerja telah dikembangkan untuk mengevaluasi efektivitas komponen perangkat penyerap energi yang diberikan untuk aplikasi crush. Penyerap energi yang ideal akan mampu mencapai beban maksimum dengan segera dan mempertahankannya untuk seluruh panjang komponen. Tujuan untuk merancang perangkat penyerap energi yang efisien adalah untuk memaksimalkan langkahnya, untuk memiliki beban rata-rata yang setara dengan beban puncak, dan untuk memiliki kemampuan penyerapan energi spesifik yang tinggi. Berdasarkan (Pei, Nadiah, Aishah, & Nadiah, 2017), parameter-parameter ini didefinisikan sebagai berikut:

a. Beban Maksimum (F_{maks})

Beban maksimum adalah beban tertinggi yang diperlukan untuk menyebabkan deformasi dan distorsi permanen yang signifikan pada suatu komponen. Penting untuk parameter crashworthiness karena dua alasan. Pertama, selama dampak kecepatan rendah dan energi rendah, diinginkan bahwa tidak ada deformasi permanen terjadi, karena ini akan dianggap kerusakan pada struktur. Kedua, beban puncak seringkali merupakan beban maksimum yang diamati pada langkah berguna perangkat penyerap energi karena memiliki pengaruh langsung pada struktur material.

b. Specific Energi Absorption (SEA)

SEA atau penyerapan energy spesifik menunjukkan energi total yang diserap dalam tumbukan (Total Energy Absorption, TEA), dalam menghancurkan struktur sama dengan area di bawah kurva perpindahan beban. Dimana,

$$TEA = \int_0^{\delta} F \cdot \delta \quad (2)$$

Oleh karena itu, penyerapan energi spesifik didefinisikan sebagai energi yang diserap persatuan massa material seperti yang diberikan dalam persamaan 2.

$$SEA = \frac{TEA}{m} \quad (3)$$

Keterangan :

TEA : Total energy serap (Joule)

F : Energi serap (N)

δ : Jarak tempuh tekan (mm)

SEA : Energi serap spesifik (kJ/kg)

m : Berat tabung (kg)

c. Average Crush Force (ACF)

Average crush load juga dikenal sebagai beban rata-rata. Mean crush load (F_{mean}) didefinisikan sebagai energi yang diserap dibagi dengan jarak tempuh (ΔL).

$$F_{mean} = \frac{TEA}{\Delta L} \quad (4)$$

Ini adalah rasio energi yang diserap pada jarak tekan pada tabung yang diuji secara ditekan.

Keterangan :

F_{mean} : Gaya rata-rata (kN)

TEA : Total energi serap (Joule)

ΔL : Jarak tempuh tekan (mm)

d. Crush Force Efficiency (CFE)

Rata-rata dan beban puncak adalah parameter penting yang harus ditentukan karena berkaitan langsung dengan perlambatan yang akan dialami oleh penghuni dalam kendaraan. Cara terbaik untuk mengukur ini adalah dengan menentukan rasio antara beban rata-rata dengan beban puncak. Dan rasio ini adalah efisiensi gaya tekan. Dalam penyerapan energi yang ideal ialah yang memiliki nilai crush force

efficiency (CFE) sama atau hampir sama dengan 100% (Vinayagar & Senthil Kumar, 2017).

$$CFE = \frac{F_{mean}}{F_{peak}} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan :

CFE : Gaya tekan efisiensi (%)

Fmean : Gaya rata-rata (kN)

Fmaks : Gaya maksimum (kN)

1.6.7 Aluminium 6061 T6

Penggunaan aluminium untuk berbagai keperluan didasarkan pada kenyataan bahwa aluminium memiliki berbagai keunggulan, seperti: B. Ringan, tahan korosi, konduktivitas termal dan listrik yang tinggi, tidak beracun, kecerahan cahaya, mudah dibentuk dan non-magnetik. Aluminium adalah jenis bahan logam yang memiliki ketahanan korosi yang baik dan sifat baik lainnya Umumnya, aluminium ditambahkan dengan elemen lain untuk membentuk paduan aluminium. Menambahkan elemen paduan ke aluminium dapat meningkatkan kekuatan mekanik logam, yang lebih baik (Zulhanif, Z., & Hasymi, Z.,2023).

aluminium merupakan jenis logam non fero yang sangat berbeda dengan besi maupun baja, dikarenakan pada logam alumunium memiliki massa jenis hanya 2,7 g / cm³, kira-kira sepertiga dari baja yakni (7,83 g / cm³) dan temperatur cairnya cenderung lebih rendah yakni hanya 660°C. Didalam udara terbuka atau udara bebas aluminium sangat mudah mengalami oksidasi yang membentuk lapisan tipis berupa oksida yang membuat tahan terhadap korosi dan juga terdapat sifat atmosfer yang mampu bereaksi dilarutkan basa ataupun asam. Aluminium seri 6061 merupakan salah satu paduan 18 aluminium dari kategori seri 6xxx yang memiliki sifat dengan kekuatan sedang (Medium Strength) dan juga mampu untuk diperlaku panaskan (Heat Treatable). Unsur paduan utamanya yaitu Al dengan tambahan Mg + Si, penambahan Mg dan Si dalam Al menghasilkan suatu senyawa magnesium silicide yang mampu menjadi solution heat treated yang dapat memperbaiki kekuatan dari material tersebut (Davis, J. R, 2001)

Syamsul Hadi, (2016) mengatakan sifat aluminium dibedakan menjadi dua, yaitu aluminium yang mampu diberi perlakuan panas dan tidak dapat diperlaku panaskan. Seri dari paduan aluminium proses tempa dengan seri 1xxx, 3xxx, dan 5xxx adalah paduan aluminium yang tidak dapat diberi perlakuan panas (non-heat treatable) dan hanya mampu atau dapat dikeraskan dengan peregangan (strain hardenable). Alumunium yang dapat diberi perlakuan panas adalah seri 2xxx, 6xxx, 7xxx, dan seri 4xxx dan cenderung tidak bisa untuk dilakukan pengerasan regangan.

1.6.8 Metode Elemen Hingga

1.6.8.1 Definisi Metode Elemen Hingga

Finite Elemen Method (FEM) atau Metode Elemen Hingga adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi permasalahan diferensial, baik persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) maupun persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equation*). Karena persamaan diferensial seringkali digunakan sebagai model permasalahan teknik maka penting bagi para insinyur untuk dapat memahami dan mampu menerapkan FEM. Saat ini FEM merupakan salah satu metode numerik paling versatile untuk memecahkan problem dalam domain kontinu.

Susatio (2004) menyatakan bahwa metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis. Tipe masalah teknis dan matematika yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisis struktur dan kelompok masalah non-struktur. Masalah analisis struktur, meliputi analisis tegangan, buckling, dan analisis getaran. Sedangkan masalah non-struktur antara lain adalah perpindahan panas dan massa, mekanika fluida, serta distribusi dari potensial listrik.

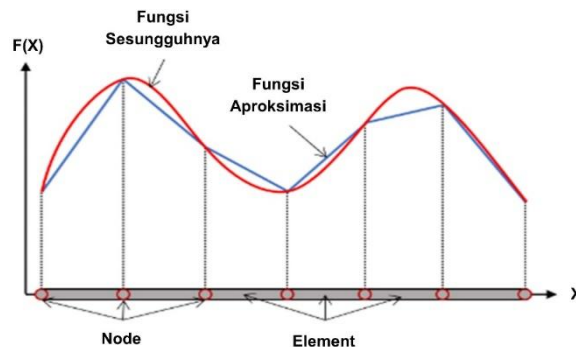
Menurut Purba dan Tarigan (2012), persoalan yang menyangkut geometri yang rumit terhadap struktur yang kompleks, pada umumnya sulit dipecahkan melalui matematika analisis. Formulasi dari metode elemen hingga dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini. Akibat adanya beban pada balok, akan mengakibatkan lendutan. Permasalahan ini dapat ditinjau dan diselesaikan dengan menghitungnya secara elemen hingga.

Konsep yang mendasari metode elemen hingga menurut Bargess dkk (2009) adalah prinsip discretization. Discretization atau diskritisasi adalah membagi sesuatu menjadi bentuk yang lebih kecil dan penyatuan secara keseluruhan yang dapat menstimulir keadaan tersebut secara menyeluruh.

Katili (2008) menyebutkan bahwa struktur diskrit terbentuk dari gabungan elemen yang perilakunya diharapkan mewakili perilaku struktur kontinu. Perilaku tiap elemen digambarkan dengan fungsi pendekatan yang mewakili peralihan dan tegangan yang akhirnya dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan matrik seperti pada gambar 8.

Pada awalnya FEM dikembangkan untuk memecahkan problem di bidang mekanika benda padat (solid mechanics) tetapi sekarang FEM sudah merambah ke hampir semua permasalahan rekayasa teknik seperti mekanika fluida (fluid mechanics), elektromagnetik (electromagnetism), getaran (vibration), analisis modal (modal analysis), dan banyak lagi persoalan rekayasa teknik lainnya. Proses inti FEM adalah membagi sistem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil atau elemen-elemen sehingga solusi yang lebih sederhana dapat dengan mudah diperoleh. Solusi dari setiap elemen jika digabungkan akan menjadi solusi sistem secara keseluruhan. Gambar 8 menjelaskan cara kerja FEM dimana solusi suatu sistem kompleks diaproksimalkan oleh solusi elemen. Untuk mendapatkan solusi elemental, FEM menggunakan fungsi interpolasi untuk mengaproksimasi solusi elemen. Untuk contoh tersebut suatu fungsi linear yang sederhana digunakan sebagai fungsi interpolasi. Setelah solusi setiap elemen diperoleh, dengan menggabungkan solusi-solusi elemen maka solusi secara keseluruhan sistem dapat diperoleh. Dengan menggunakan fungsi

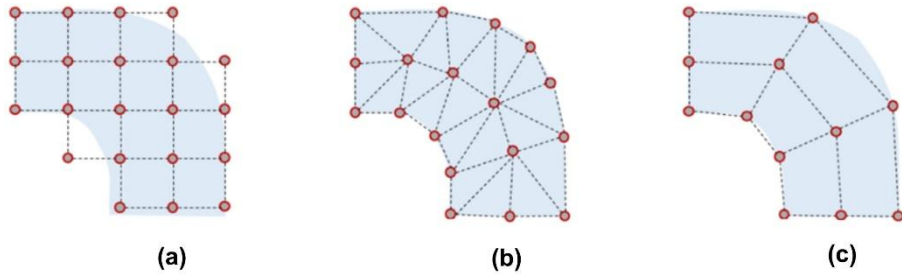
polynomial seperti fungsi kuadratik sebagai fungsi interpolasi, solusi yang lebih akurat bisa diperoleh.



Gambar 5. Aproximasi solusi keseluruhan diperoleh dari penggabungan solusi-solusi elemen (Jahuddin, 2019)

1.6.8.2 Penerapan Metode Elemen Hingga

Prinsip FEM adalah membagi domain permasalahan, baik itu domain ruang (spatial domain) atau domain waktu (time domain), menjadi sub-domain atau elemen yang lebih kecil. Dengan menghitung solusi pada elemen-elemen dan selanjutnya menggabungkan keseluruhan solusi elemental, solusi total dari permasalahan dapat diperoleh. Dalam menghitung solusi per elemen, solusi elemen tersebut harus memenuhi beberapa ketentuan, seperti kontinuitas pada titik-titik persambungan (node) dan antarmuka (interface) elemen. Di samping FEM, metode numerik lain yang umum digunakan adalah Metode Perbedaan Hingga (MPH). Perbedaan utama dari kedua metode ini terletak pada solusi yang diperoleh dan juga bentuk (geometri) dari domain. MPH menghasilkan solusi aproksimasi pada titik-titik nodal (pointwise solution). Guna memperoleh solusi yang lebih akurat, jumlah titik nodal diperbanyak. MPH sulit digunakan pada domain dengan bentuk geometri yang kompleks. Hal ini dapat dipahami dari Gambar 9 yang berupa sebuah seperempat profil annulus. Mesh MPH digambarkan pada Gambar 9(a) dan mesh FEM pada Gambar 9(b) dan 9(c) terlihat bahwa dengan menggunakan MPH, titik-titik mesh (nodes) tidak berada pada batas annulus dengan tepat. Hal ini akan mengurangi akurasi hasil dari MPH. Secara teori MPH dapat digunakan pada problem dengan domain yang kompleks dengan syarat bahwa mesh berukuran kecil sehingga batas domain dapat diikuti oleh titik mesh secara lebih akurat. Hal tersebut tidak menjadi masalah untuk FEM karena titik-titik mesh FEM dapat diletakkan pada batas domain (Gambar 9(b) dan 9(c)). Gambar 9 menampilkan dua jenis elemen FEM, yaitu segitiga (triangular element) dan segiempat (quadrilateral element).



Gambar 6. (a) Mesh Metode Perbedaan Hingga, (b) elemen segitiga, dan (c) elemen segiempat

Solusi yang diperoleh dengan menggunakan FEM adalah fungsi interpolasi pada setiap elemen. Setelah fungsi interpolasi elemen dihitung, solusi keseluruhan dapat diperoleh. Fungsi-fungsi interpolasi setiap elemen ditentukan oleh nilai pada titik mesh. Pada persamaan (10) dan (11) notasi matrik gaya dinyatakan dalam $\{F\}$ dan matriks perpindahan dalam $\{u\}$.

$$\{F\} = \{F_{1x} \ F_{1y} \ F_{1z} \ F_{2x} \ F_{2y} \ \dots \ F_{nx} \ F_{ny} \ F_{nz}\}^T \quad (10)$$

$$\{u\} = \{u_{1x} \ u_{1y} \ u_{1z} \ u_{2x} \ u_{2y} \ \dots \ u_{nx} \ u_{ny} \ u_{nz}\}^T \quad (11)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{21} & \dots & k_{n1} \\ k_{12} & k_{22} & \dots & k_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{1n} & k_{2n} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{21} & \dots & K_{n1} \\ K_{12} & K_{22} & \dots & K_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{1n} & K_{2n} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Sedangkan pada persamaan (12) dan (13), matriks kekakuan elemen dinyatakan dalam $[k]$ dan matriks kekakuan global komponen dinyatakan dalam $[K]$.

1.6.9 Software Abaqus CAE

Software Abaqus merupakan aplikasi perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan analisis metode elemen hingga atau Finite Element Analysis (FEA). Perangkat lunak ini dapat melakukan program simulasi linear mulai dari yang paling sederhana sampai dengan analisis non-linear yang cukup kompleks dan rumit. Dalam software ini kita dapat menentukan berbagai kondisi yang dialami oleh material maupun indenter sehingga nantinya reaksi yang dihasilkan dari simulasi permodelan yang telah dibuat tersebut sesuai dengan reaksi yang terjadi pada keadaan aslinya (Fauzan, 2022).

Terdapat beberapa perangkat lunak yang umumnya berada di pasaran saat ini digunakan untuk simulasi dinamis pada kendaraan. Abaqus adalah salah satu dari beberapa perangkat lunak besar dengan kode FE (Finite Element) yang berada di pasaran saat ini untuk memecahkan berbagai masalah dalam multiphysics, baik itu

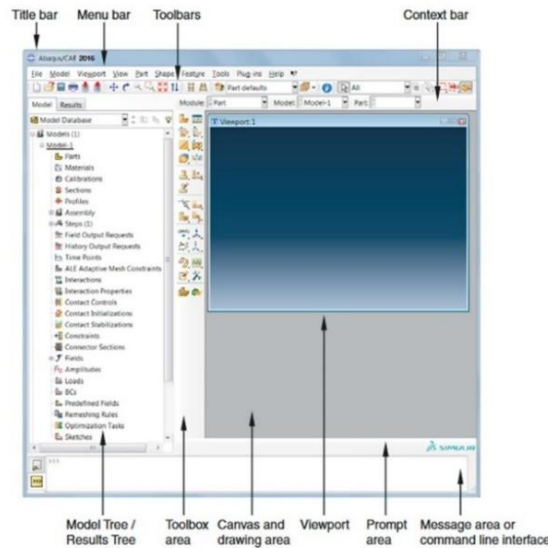
berupa cairan (fluida), termal, mekanik, kopling listrik dan sebagainya (Ukhrawi, 2021). Dassault menjelaskan, terdapat empat rangkaian produk inti dari Abaqus yaitu:

1. Abaqus / Standard adalah pemecah tujuan umum yang menggunakan skema integrasi mutlak (tradisional) untuk menyelesaikan analisis elemen hingga.
2. Abaqus / Eksplisit, menggunakan skema integrasi eksplisit untuk menyelesaikan analisis dinamis transien nonlinier yang sangat tinggi.
3. Abaqus / CAE, menyediakan lingkungan pemodelan terpadu (preprocessing) dan visualisasi (pasca-pemrosesan) untuk produk analisis.
4. Abaqus / Multiphysics, menyediakan kemampuan yang signifikan dalam menganalisis dan memecahkan masalah-masalah multifisika.

a. Komponen pada windows utama abaqus

Adapun komponen-komponen pada Windows Utama Abaqus yakni :

1. Title Bar
Title bar menunjukkan versi Abaqus yang sedang kita gunakan dan juga menunjukkan judul dari file yang kita buat atau kita gunakan.
2. Menu Bar
Menu bar berisi semua menu yang tersedia, menu ini memberikan akses ke semua fungsi dalam produk.
3. Toolbars
Tools ini memberikan akses cepat yang tersedia pada menu.
4. Context Bar
Dalam context bar memungkinkan kita untuk berpindah antar modul serta mengambil bagian yang sudah ada ketika membuat geometri model.
5. Model Tree / Result Tree
Model Tree menyediakan grafik sebagai Review dari model objek dari masing-masing bagian, material, langkah, pembebanan. Results Tree memberikan grafik dari output database dan spesifik data hasil plot x-y.
6. Toolbox Area
Memungkinkan akses cepat ke banyak fungsi modul yang tersedia.
7. Canvas dan Drawing Area
Merupakan tempat atau lokasi untuk area gambar.
8. Viewport
Merupakan jendela pada area gambar di mana Abaqus menampilkan model yang telah dibuat.
9. Prompt Area
Berfungsi untuk menampilkan petunjuk atau panduan yang telah kita lakukan pada software Abaqus.
10. Message Area or Command Line Interface
Pada bagian ini Abaqus akan memunculkan informasi dan peringatan yang terjadi ketika ada informasi atau kesalahan



Gambar 7. Tampilan main windows pada Abaqus (user'sguide,CAE 2016)

b. Tahap tahap menjalankan abaqus

Dalam abaqus "Getting Started With Abaqus, Interactive Edition", dijelaskan bahwa untuk menganalisis sampai selesai dengan program Abaqus biasanya melalui tiga tahap yang berbeda yaitu proses awal (*Pre-processing*), simulasi (*Processing*) dan proses akhir (*Post Processing*).

1. Proses Awal (*Preprocessing*)

Pada bagian ini kita mulai menentukan model awal yang akan dianalisis. Pemodelan part dilakukan dalam software Abaqus dengan memasukkan geometri yang telah kita ketahui sebelumnya. Dalam menggambarkan model, kita bisa menentukan koordinat sistem yang akan dibuat. Sebelum dilakukan Simulasi kita perlu memeriksa semua keyword dan parameter yang digunakan sehingga tidak terjadi kesalahan. Selain itu urutan dalam memasukkan data harus kita perhatikan dengan benar. Adapun module yang termasuk dalam proses ini yaitu part, property, assembly, step, interaction, load, dan mesh.

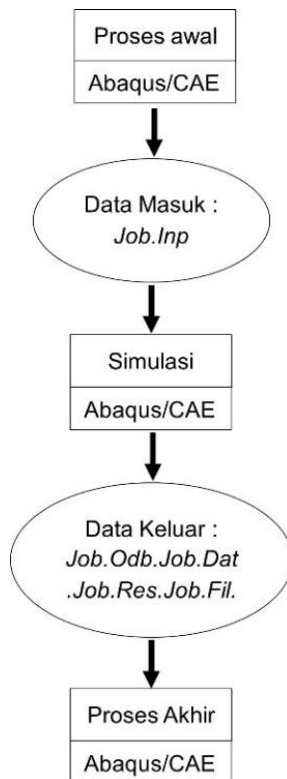
2. Simulasi (*Processing*)

Simulasi yang biasanya dijalankan sebagai pengantar proses adalah tahap dimana program Abaqus memulai proses untuk memecahkan masalah numerik yang diidentifikasi dalam model. Sebagai contoh, keluaran dari stress analisis termasuk perpindahan dan tekanan yang disimpan dalam berkas biner untuk proses akhir. Adapun module yang termasuk dalam proses ini yaitu, optimization dan job.

3. Proses akhir (*Post Processing*)

Pada proses akhir kita dapat mengambil kesimpulan dari hasil simulasi yang sudah selesai pada perpindahan, gaya atau variable lainnya yang sudah dilakukan perhitungan. Hasil akhir biasanya dibuat dalam suatu laporan atau sebuah catatan. Adapun module yang termasuk dalam proses ini yaitu visualization.

Kemudian dari ketiga tahap tersebut dihubungkan sehingga menjadi seperti Gambar dibawah ini.



Gambar 8. Tahapan menjalankan program Abaqus (Fauzan 2022)

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu & Tempat Penelitian

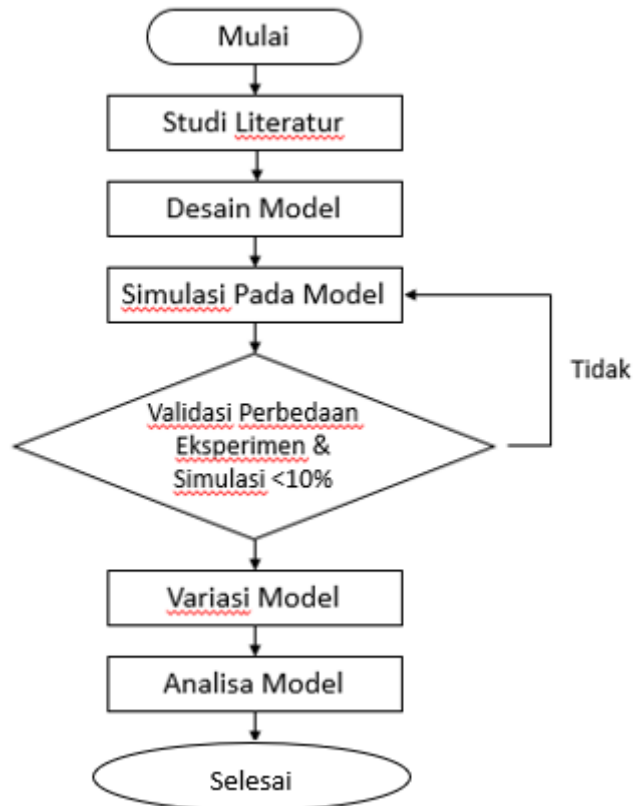
Proses penelitian dimulai sejak bulan Juli 2025 hingga Desember 2025. Lokasi penelitian secara umum dilaksanakan di Laboratorium Akustik & Getaran, Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.



Gambar 9. Alur Proses Penelitian

2.2 Diagram Alir (Flowchart)

Gambar 10 adalah diagram alir penelitian hingga diperoleh kesimpulan. Diagram alir terdiri atas karakterisasi awal material, simulasi pembebanan, eksperimen untuk proses validasi, pengolahan dan analisis data hasil penelitian.



Gambar 10. Flowchart

2.3 Alat dan Bahan

2.3.1 Alat

a. Komputer

Komputer digunakan sebagai alat untuk menjalankan *software 3D design Autodesk fusion 360*, dan untuk melakukan komputasi elemen hingga berupa simulasi pada *software simulia Abaqus*.



Gambar 11. Komputer

b. Mouse

Mouse berfungsi sebagai alat untuk menggerakkan kursor pada komputer



Gambar 12. Mouse

2.3.2 Bahan

a. Software Abaqus

Abaqus CAE (Computer Aided Engineering) adalah perangkat lunak simulasi berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) yang digunakan untuk menganalisis struktur, mekanika, thermal, gaya, interaksi dan gesekan. Abaqus didesain untuk mendukung simulasi mulai dari analisis linear sederhana hingga analisis non-linear yang kompleks, termasuk kondisi kontak yang rumit. Keunggulan utama Abaqus adalah kemampuannya dalam melakukan analisis elastis dan plastis, yang memungkinkan pemodelan perubahan bentuk material baik dalam keadaan kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan maupun mengalami deformasi permanen.

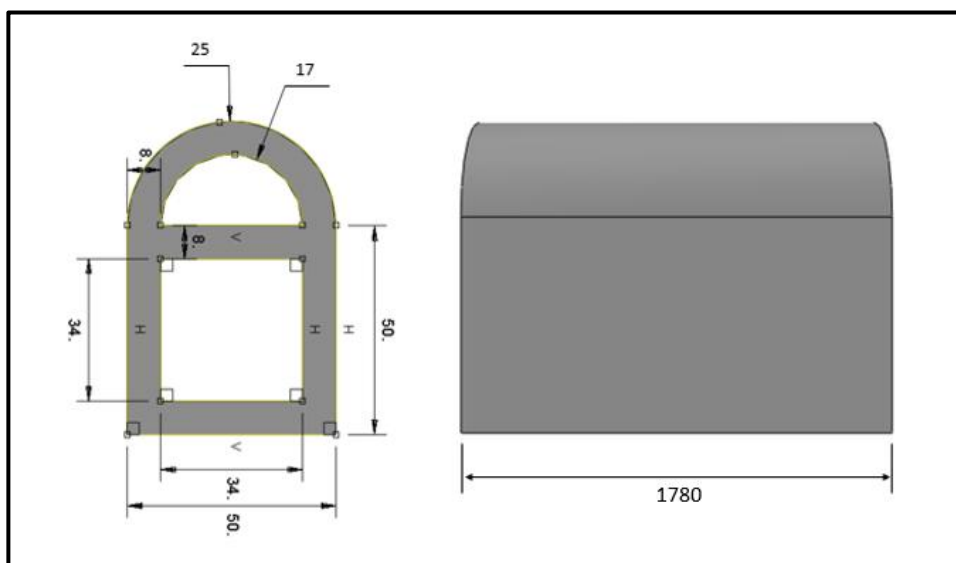


Gambar 13. Software Abaqus CAE

2.4 Spesifikasi dan Karakteristik

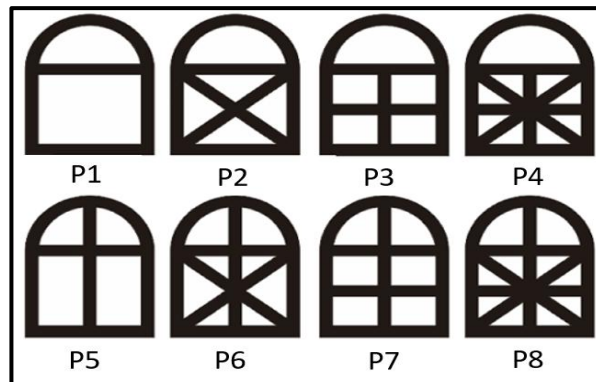
a. Rocker panel

Rocker panel merupakan bahan uji yang tersusun dari dinding aluminium 6061 T6. Bentuknya ini terinspirasi dari bentuk penampang pada vender kapal yang nantinya akan diterapkan pada mobil listrik atau mobil konvensional. Ukuran tinggi *rocker panel* yaitu 75 mm dengan lebar 50 mm sedang untuk Panjang senilai 1780 mm. Bentuk *rocker panel* didesain *semicircular* yang mana, untuk posisi dengan bidang kotak terletak di bagian sisi dalam dan di posisi terluar yang terkena benturan di desain setengah lingkaran dengan jari-jari 25 mm. hal ini, dimaksudkan agar terhindar dari sisi yang tajam saat berada disamping ataupun saat pemasangan. Seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 14. Dimensi rocker panel

Adapun variasi yang diterapkan pada desain *rocker panel* ini yaitu terdapat 8 variasi dengan bentuk yang berbeda beda. Meski demikian delapan variasi ini memiliki volume yang sama dengan bentuk penyangga yang berbeda. Hal ini di maksudkan agar dapat membantu proses analitis perbandingan terhadapap kekuatan lentur dari masing masing variasi. Kemudian untuk membantu pengenalan setiap variasi maka pemberian nama dilakukan terhadap masing-masing variasi dengan nama yang sama yaitu P1-P8.



Gambar 15. Variasi rocker panel

b. Material

Untuk mekanika properties material yang akan diuji impact pada simulasi abaqus akan tertampil pada Tabel 1.

Tabel 1: Mekanik Properti Aluminium 6061 T6

Parameter	Keterangan
Density	2,70 g/cm ³
Young Modulus	68.900 MPa
Yield Stress	276 MPa
Ultimate Tensile Strength	310 Mpa
Plastick Strain	0.12
Poisson's Ratio	0.33
Shear Strength	207 MP

(Sigit Adhi Nugroho, dkk, 2020)

2.5 Metodologi Penelitian

Dalam penelitian ini, pendekatan yang digunakan melibatkan simulasi komputasional dengan menggunakan perangkat lunak Abaqus untuk melakukan analisis dinamis pada penampang pelindung. Langkah pertama melibatkan pemodelan geometri penampang. Setelah itu, sifat material dan interaksi antar komponen didefinisikan dalam perangkat lunak. Proses berikutnya mencakup simulasi dengan menerapkan beban akustik pada model dan menginterpretasikan hasil untuk mengidentifikasi kemungkinan penampang melewati batas tegangan izin yang ada serta memberikan rekomendasi ketahanan penampang yang memiliki tahanan tegangan yang tahan terhadap benturan. Metode elemen hingga dalam Abaqus dipilih untuk mendapatkan analisis yang rinci dan akurat tentang distribusi tegangan di dalam struktur *rocker panel*.

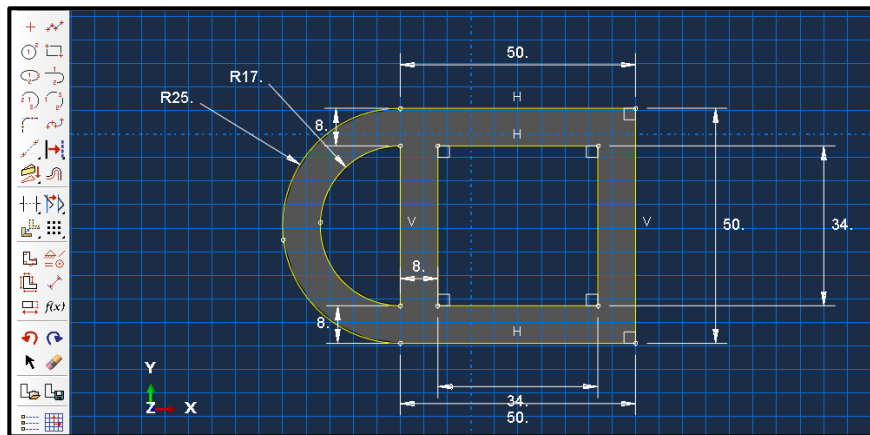
2.6 Prosedur Pembuatan Model

Model simulasi berdasarkan desain penampang samping mobil dibuat melalui beberapa serangkaian tahapan menggunakan perangkat lunak Abaqus CAE untuk pembuatan model serta sebagai alat simulasi. Tahap-tahapnya meliputi proses

perancangan model dan pengujian simulasi untuk memastikan kinerja dan keandalan penampang.

a. Sketch

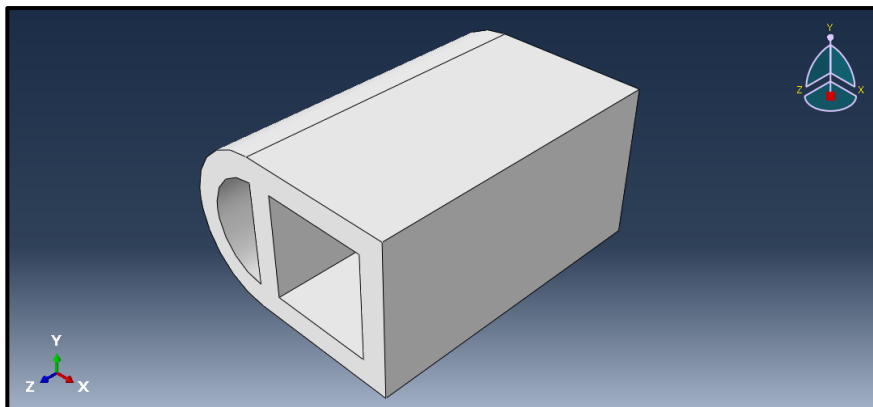
Membuat sketsa, mode ini merupakan tempat untuk membuat profil geometris yang menentukan fondasi desain. Kemudian dengan menggunakan perintah seperti extrude dan fillet untuk membuat model 3D dari sketsa



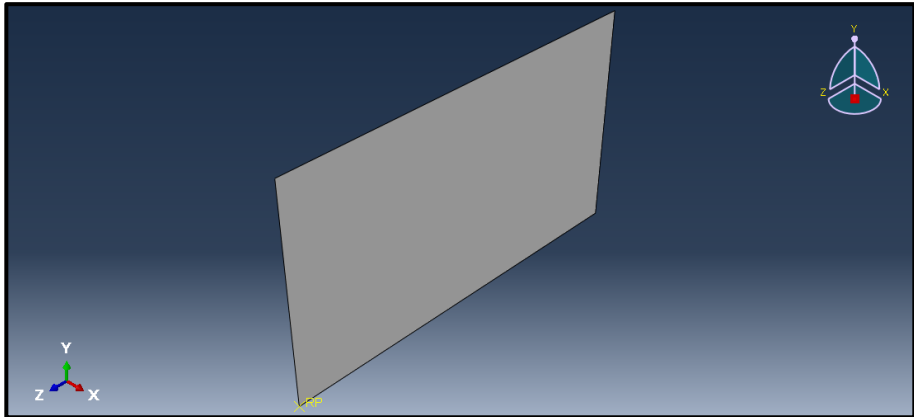
Gambar 16. Mode Sketch

b. Extrude

Extrude adalah sebuah fungsi dasar untuk mengubah bentuk dua dimensi (2D) menjadi objek tiga dimensi (3D) dengan menarik bentuk tersebut sepanjang sumbu tertentu, sehingga menambah volume dan menciptakan bentuk 3D.



Gambar 17. Model *Rocker Panel*



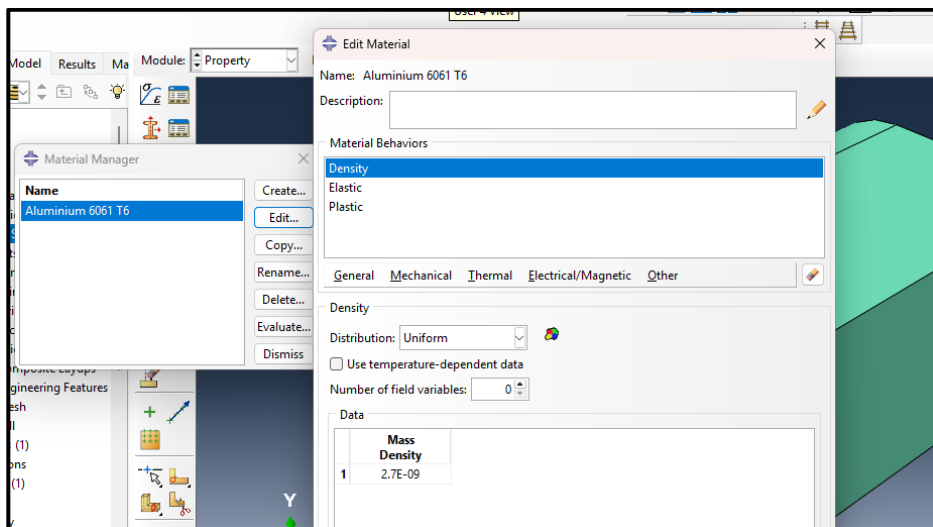
Gambar 18. Model wall

c. Penentuan material

Pada percobaan ini menggunakan material Baja. Material yang ditentukan pada simulasi metode elemen hingga ini kemudian dikonfigurasi pada part yang telah dibuat sebelumnya sesuai dengan spesifikasi.

Adapun tahapan pada Abaqus CAE yaitu:

1. General → density → mass density, massa jenis disesuaikan dengan karakteristik model
2. Mechanical → elasticity → elastic → dikonfigurasi dari karakteristik model
3. Mechanical → plasticity → plastic → dikonfigurasi dari karakteristik model

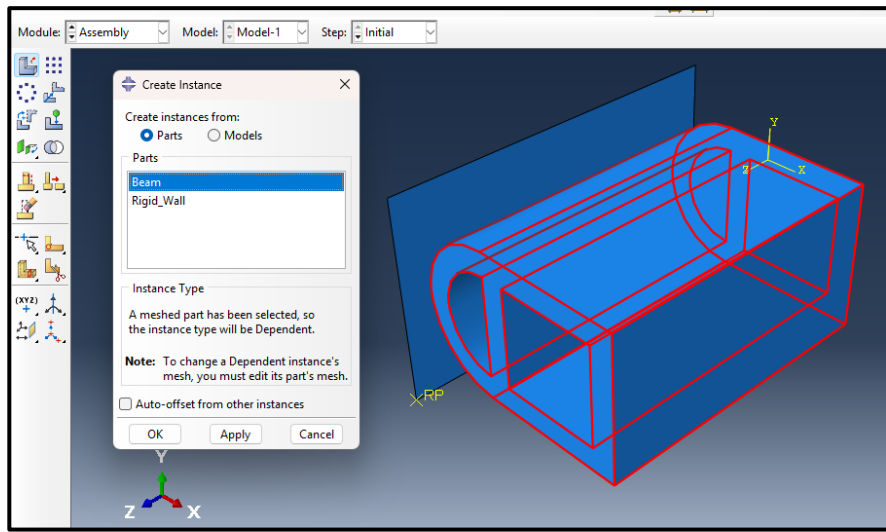


Gambar 19. Menu Material

d. Assembly

Tahapan pada Abaqus CAE untuk proses assembly ini dilakukan sebagai berikut:

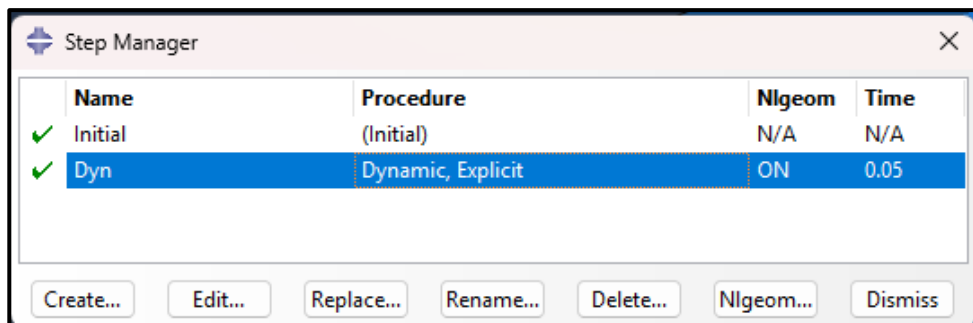
Module: assembly → klik dua kali pada opsi Instances → pilih semua part- part yang telah disatukan kemudian diberikan ketentuan surfaces & nodes serta engineering features (momen inersia).



Gambar 20. Part penampang dan wall yang digabungkan

e. Step

Tahapan selanjutnya pada menu step sebagai berikut: *Step Manager: Creat* → *Step 1* → *dynamic explicit*

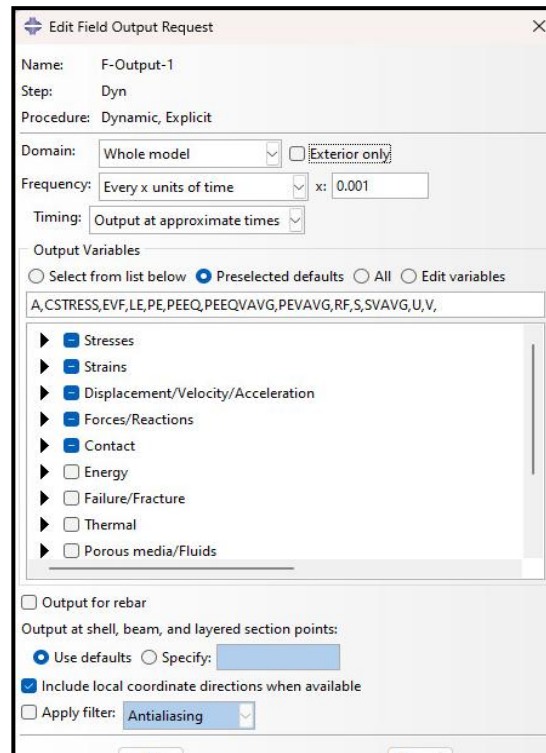


Gambar 21. Menu Step Manager

f. Field Output Manager

Selanjutnya pilih menu *Field output Request* untuk memberikan data keluaran yang diinginkan dengan cara sebagai berikut:

Create → Lalu pilih data keluaran yang diinginkan → Ok

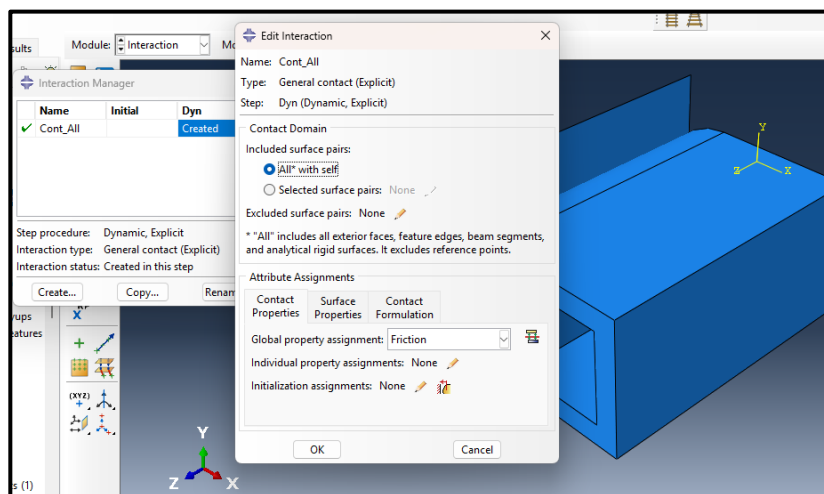


Gambar 22. Menu *Field Output*

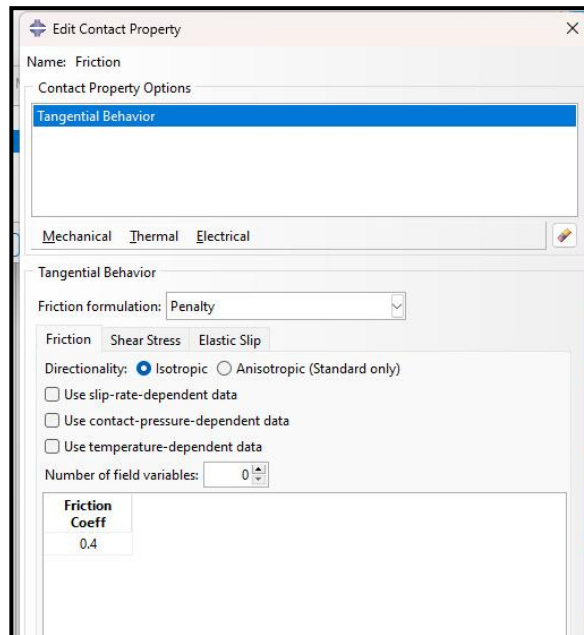
g. Interaction

Interaction merupakan ikon pada abaqus yang digunakan untuk menghubungkan antara *skin* dan inti pada material dilakukan sebagai berikut:

- a. Interaction Manager → Create → General Contact
- b. Contact Property → Create → Tangential Property → penalty



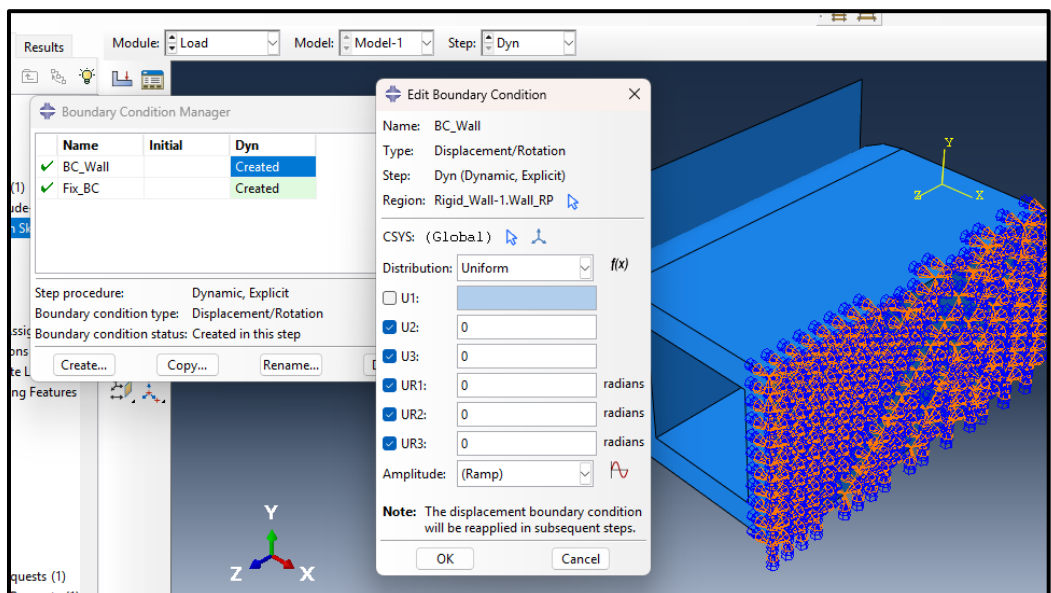
Gambar 23. Tampilan *Interaction*



Gambar 24. Contact Property

h. Load

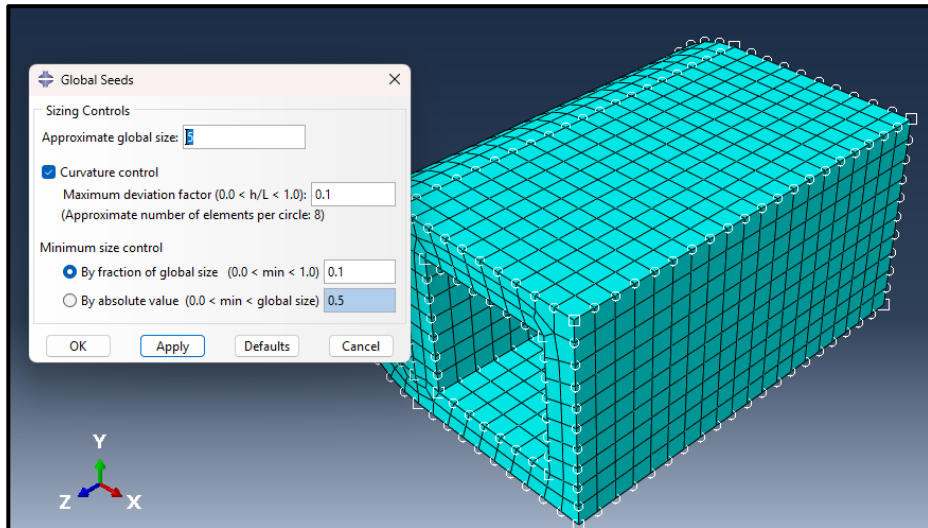
Pada menu *Load* pilih ikon *Boundary Condition*, *Boundary Condition* digunakan untuk mendefinisikan batasan atau kondisi batas pada model simulasi. *Boundary Condition* menentukan bagaimana model bisa bergerak atau bereaksi yang tahapannya dilakukan sebagai berikut :



Gambar 25. Tampilan *Boundary Condition Manager*

i. Meshing

Tahapan selanjutnya yang perlu dilakukan yaitu membuat *mesh* atau biasa juga dikenal dengan istilah *meshing* pada semua part dalam simulasi. Adapun pada *Abaqus* CAE dibuat dengan tahapan: Module: mesh → pilih part yang akan dilakukan perlakuan → seed part → konfigurasi sesuai dengan gambar, berikut.

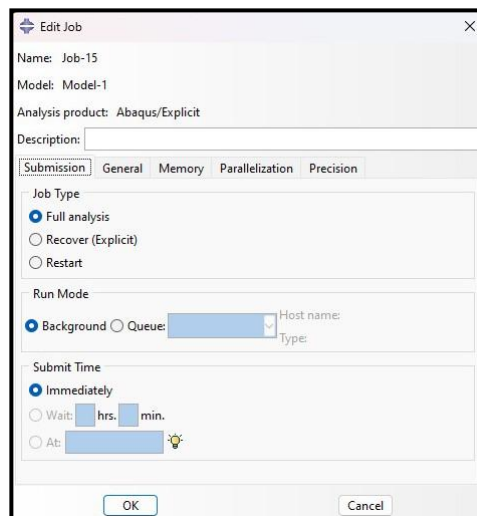


Gambar 26. Tampilan *global seeds* pada Abaqus CAE

j. **Job**

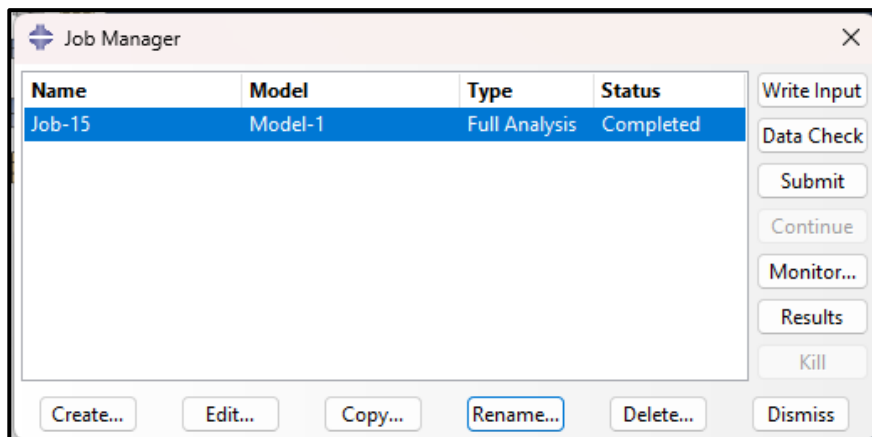
Module: Job → Create job → konfigurasi sesuai dengan Gambar 27.

Tampilan panel job pada Abaqus CAE



Gambar 27. Tampilan panel *job* Abaqus CAE

Klik submit pada Gambar 28, untuk mengupload simulasi, dan kemudian tunggu beberapa saat hingga selesai.



Gambar 28. Tampilan panel *job manager*

Setelah Job berhasil dibuat, klik result pada Gambar 28, untuk melihat hasil simulasi.