

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi manufaktur material saat ini terus mengalami peningkatan pesat, didorong oleh kebutuhan akan material baru yang lebih ringan, kuat, dan efisien untuk berbagai aplikasi industri, termasuk transportasi. *Aluminium foam sandwich* (AFS) merupakan salah satu inovasi utama dalam kategori ini, yang terdiri dari dua lapisan permukaan padat berbahan aluminium atau logam lainnya yang diikat secara metalurgi dengan inti busa aluminium berpori tinggi (sekitar 80-90% porositas), menghasilkan struktur sandwich yang ringan namun memiliki rasio kekakuan terhadap berat yang superior serta kemampuan penyerapan energi yang tinggi (Astra et al., 2021).

Material ini telah diaplikasikan dalam prototipe kereta cepat seperti *Intercity-Express* (ICE) di Jerman, di mana AFS digunakan pada penutup kepala daya (power head cover) yang dilas dengan serat karbon, berhasil mengurangi massa hingga 18% sambil mempertahankan kekakuan, meningkatkan peredaman getaran, dan menyederhanakan proses manufaktur dibandingkan panel honeycomb konvensional, khususnya untuk bagian melengkung. Tren global saat ini mengarah pada penggantian bahan struktur kereta cepat berbasis logam dengan komposit seperti AFS, karena mampu mengurangi berat keseluruhan kendaraan hingga signifikan, sehingga meningkatkan efisiensi energi dan kecepatan operasional (Astra et al., 2021).

Data karakteristik mekanis dari AFS sangat krusial sebagai variabel input dalam desain dan simulasi struktur gerbong kereta cepat. Misalnya, struktur pori AFS yang seragam (dengan diameter pori 0.5-3 mm berbentuk poligonal) menunjukkan kekuatan lentur sekitar 31.3 MPa, modulus elastis 637.91 MPa, dan kapasitas penyerapan energi tertinggi mencapai 16.3 MJ/m³, dengan perilaku deformasi yang melibatkan keruntuhan sel busa secara bertahap di bawah beban lentur, membuatnya ideal untuk menahan beban statik seperti bobot penumpang dan barang pada lantai kereta. Karakteristik ini memungkinkan AFS untuk menahan beban mekanis dari operasi sehari-hari, termasuk ketahanan terhadap getaran yang dihasilkan dari percepatan, pengereman, atau kondisi lintasan, sebagaimana diungkapkan dalam studi yang menekankan peran material komposit dalam meredam getaran pada bagian struktural (Astra et al., 2021).

Kemampuan struktur AFS untuk bertahan terhadap deformasi, seperti pada uji tiga titik lentur di mana sampel dengan pori tidak seragam mengalami penurunan tegangan hingga 36.5 MPa akibat retak dinding sel, menyoroti pentingnya optimasi pori untuk aplikasi kritis seperti lantai kereta cepat. Di era globalisasi, kebutuhan transportasi di Indonesia semakin meningkat seiring pertumbuhan penduduk, mobilitas tinggi, dan pembangunan ekonomi. Transportasi darat, khususnya kereta

api, menjadi pilihan utama, dengan proyek kereta cepat Jakarta-Bandung (Whoosh) yang telah beroperasi sejak Oktober 2023 sebagai tonggak inovasi, menggunakan teknologi Cina seperti rangkaian KCIC400AF yang mampu mencapai kecepatan operasional hingga 350 km/h dan dirancang untuk mengurangi getaran secara signifikan agar perjalanan lebih nyaman. Namun, sebagian besar lintasan kereta di Indonesia masih single-track, yang menimbulkan tantangan getaran lebih tinggi dibandingkan sistem double-track modern. Kereta cepat dirancang untuk meminimalkan getaran, dengan level yang lebih rendah daripada kereta konvensional, tetapi analisis mendalam tetap diperlukan untuk memastikan faktor keamanan tinggi pada komponen seperti lantai, yang harus menahan beban statik dari penumpang (hingga ribuan kilogram per gerbong) tanpa deformasi berlebihan (Yudistirani et al., 2021).

Penggunaan AFS pada struktur kereta cepat menawarkan keuntungan teknis dan ekonomis, seperti tahan korosi, kemampuan operasi dalam bentuk kompleks, dan pengurangan degradasi lingkungan, sehingga mengurangi biaya perawatan dan konsumsi energi (Wang et al., 2022).

Dalam konteks Indonesia, di mana proyek HSR telah melayani lebih dari 10 juta penumpang hingga Juni 2025 dengan rencana ekstensi ke Surabaya, inovasi material seperti AFS bisa menjadi langkah strategis untuk meningkatkan efisiensi, meskipun saat ini masih mengandalkan komponen impor dari Cina. Studi tentang kapasitas beban komposit sandwich, seperti honeycomb pada lantai kereta cepat, menunjukkan bahwa struktur ini memiliki prospek luas untuk desain ringan, dengan analisis statik yang melibatkan uji beban untuk memverifikasi ketahanan terhadap tekanan vertikal dan lentur, yang relevan untuk mengoptimalkan lantai AFS. Selain itu, material komposit tahan korosi mengurangi frekuensi penggantian, mendukung keberlanjutan operasional (Inspeksi, 2023).

Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan material komposit/sandwich seperti AFS pada gerbong kereta cepat merupakan langkah strategis untuk mendukung kemajuan teknologi transportasi modern di Indonesia. Maka dari itu, penulis akan melakukan penelitian dengan judul "**ANALISIS PEMBEBANAN STATIK PADA LANTAI KERETA CEPAT BERBAHAN SANDWICH ALUMINIUM FOAM**".

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh pembebanan statik pada lantai gerbong kereta cepat yang menggunakan material komposit dan sandwich sebagai bahan konstruksi?
2. Bagaimana pengaruh variasi material skin pada struktur sandwich aluminium foam terhadap kinerja statik lantai gerbong kereta cepat?
3. Bagaimana menentukan material skin yang memberikan performa statik paling optimal pada lantai gerbong kereta cepat dengan core aluminium foam?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui pengaruh pembebanan statik pada lantai gerbong kereta cepat yang menggunakan material komposit dan sandwich.
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi material skin pada struktur sandwich aluminium foam terhadap kinerja statik lantai gerbong kereta cepat.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah batasan pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini terfokus pada analisis pembebanan statik pada gerbong kereta cepat.
2. Analisis dilakukan melalui simulasi numerik menggunakan software abaqus, tidak dilakukan eksperimen fisik atau pengujian dilapangan.
3. Penelitian ini tidak mencakup analisis getaran pada bagian eksternal gerbong kereta cepat.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat pada penelitian ini adalah:

1. Sebagai perbandingan antara penggunaan bahan lain atau menggunakan *Sandwich Aluminium Foam*.
2. Menambah pengetahuan dalam bidang teknologi manufaktur dalam mengembangkannya suatu inovasi material.
3. Sebagai bahan informasi untuk penelitian selanjutnya, agar dapat dikembangkan.

1.6 Teori

1.6.1 Kereta Cepat (*High speed Railway*)

Transportasi merupakan salah satu sarana yang dapat digunakan untuk memindahkan orang atau barang dari tempat asal ke tempat tujuan. Saat ini, Indonesia sudah memiliki beragam jenis transportasi diantaranya transportasi darat, laut, udara, dan transportasi berbasis rel. Transportasi berbasis rel mempunyai daya tarik yang cukup tinggi oleh masyarakat, karena transportasi berbasis rel mempunyai kelebihan yaitu mempunyai kapasitas penumpang yang tinggi dan tidak akan mengalami kemacetan karena mempunyai jalur khusus. Sehingga kereta menjadi moda transportasi yang sangat cocok sebagai transportasi massal perkotaan pada koridor yang padat (Rahmatunnisa, dkk., 2021)

Indonesia saat ini mulai membangun kereta cepat dalam rangka mengurangi masalah transportasi. Kebutuhan akan moda transportasi baru sangat memungkinkan untuk membangun kereta cepat. Dibandingkan dengan kereta konvensional kereta cepat memiliki inovasi teknologi yang dapat memperpendek waktu perjalanan terutama untuk perjalanan jarak menengah. Terdapat beberapa perbedaan antara kereta cepat yang ada di Indonesia dan yang ada di luar negeri salah satunya adalah inisiasi dari kereta cepat dalam suatu negara. Di Eropa hampir

semua kereta cepatnya diinisiasi oleh pemerintah sehingga keuntungan yang didapat dari adanya kereta cepat adalah dari manfaat sosial misalnya penghematan waktu perjalanan. Di Indonesia kereta cepat diinisiasi oleh swasta sehingga keuntungan didapat dari tiket kereta. Keunikan ini dapat menjadi salah satu topik penting yang dapat di bahas dalam pembangunan kereta cepat Indonesia Kajian kereta cepat di Indonesia akan membandingkan pengalaman negara lain dari segi ekonomi dan juga deskripsi teknis yang menjadi parameter dalam menentukan biaya pembangunan kereta cepat (Lestari, dkk., 2018).

Secara umum, di perusahaan manapun baik produk maupun jasa, selalu mengupayakan untuk pencapaian kepuasan konsumen. Sama halnya pada PT. KAI, dimana pencapaian kepuasan penumpang dalam gerbong kereta api merupakan hal prioritas utama yang menjadi pertimbangan perusahaan. Salah satu faktor yang mempengaruhi kepuasan penumpang kereta api adalah kelengkapan dan kondisi pembaharuan dari fasilitas yang tersedia di setiap gerbong karena pada beberapa gerbong kereta api kelas ekonomi, fasilitas-fasilitas didalam gerbongnya bukan dalam kondisi yang baru, melainkan barang bekas (second hand) dari gerbong kereta api yang digunakan di Luar Negeri (Liansari, dkk., 2018).



Gambar 1. Kereta Cepat
(Sumber: Kompas.com)

Kereta cepat adalah transportasi massal dengan menggunakan rel yang mempunyai kecepatan di atas 200 km/jam (Pasal 4 Huruf b UU No.23, 2007). Transportasi sendiri merupakan bidang kegiatan yang sangat penting dalam kehidupan masyarakat Indonesia. Pentingnya transportasi bagi masyarakat Indonesia disebabkan oleh beberapa faktor antara lain, keadaan geografis Indonesia yang terdiri dari ribuan pulau kecil dan besar, perairan yang terdiri dari sebagian laut, sungai, dan danau yang memungkinkan pengangkutan dilakukan melalui darat, perairan, dan udara guna untuk menjangkau seluruh wilayah Indonesia. Hal lain yang

tidak kalah pentingnya adalah peran transportasi dalam perekonomian dan pembangunan. Fungsi dari transportasi diibaratkan sebagai urat nadi perekonomian sebagai fasilitas penunjang pembangunan.

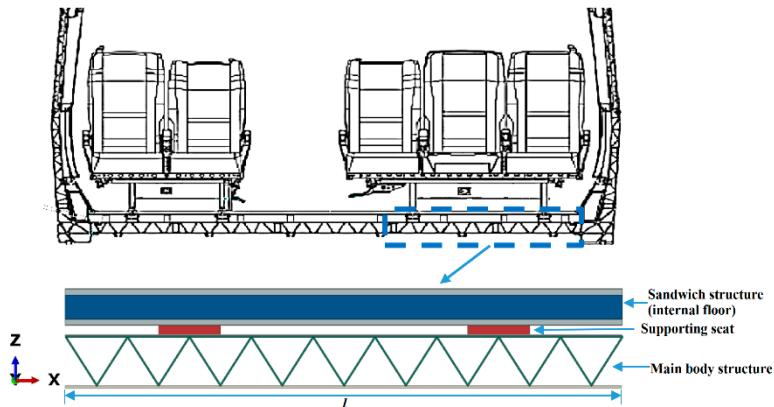
Menurut UIC (*International Union of Railways*), kereta cepat adalah kereta dengan kecepatan minimal 250 km/jam. Menurut Komisi Eropa (2010), kereta cepat adalah kereta yang mampu mencapai kecepatan diatas 200 km/jam dengan jalur konvensional dan diatas 250 km/jam pada jalur baru yang dirancang khusus untuk kecepatan tinggi. Biasanya kereta kecepatan tinggi berjalan dengan kecepatan antara 250 km/jam (150 mil/jam) sampai 300 km/jam (180 mil/jam), meskipun rekor kecepatan dunia untuk kereta beroda dipecahkan pada tahun 2007 oleh kereta Perancis TGV yang mencapai kecepatan 574,8 km/jam (357,16 mpj), sedangkan kereta MagLev eksperimen Jepang telah mencapai kecepatan 581 km/jam (Giantara, 2018).

1.6.2 Lantai Gerbong Kereta Cepat

Secara umum, di perusahaan manapun baik produk maupun jasa, selalu mengupayakan untuk pencapaian kepuasan konsumen. Sama halnya pada PT. KAI, dimana pencapaian kepuasan penumpang dalam gerbong kereta api merupakan hal prioritas utama yang menjadi pertimbangan perusahaan. Salah satu faktor yang mempengaruhi kepuasan penumpang kereta api adalah kelengkapan dan kondisi pembaharuan dari fasilitas yang tersedia di setiap gerbong karena pada beberapa gerbong kereta api kelas ekonomi, fasilitas-fasilitas didalam gerbongnya bukan dalam kondisi yang baru, melainkan barang bekas (second hand) dari gerbong kereta api yang digunakan di Luar Negeri (Liarsari, Febrianti, and Tama Gt 2018).

Keberhasilan perusahaan sangat ditentukan oleh kemampuan perusahaan dalam memberikan pelayanan kepada pelanggannya, seperti keamanan dan kenyamanan gerbong kereta api tetap terjaga dengan baik dan pelanggan yang telah menggunakan jasa transportasi tersebut merasa puas atas layanan yang telah diberikan oleh pihak penyedia jasa transportasi. Pada dasarnya kepuasan suatu pelanggan itu dilihat berdasarkan harapan dan kinerja yang telah dirasakan. Pelanggan akan merasa puas terhadap layanan atau jasa transportasi itu apabila pelayanan yang diberikan oleh perusahaan transportasi sesuai dengan keinginan dan kebutuhan pelanggan (Sudharto et al. 2015).

Pada penelitian yang dilakukan György Kovács ini berfokus pada pengoptimalan lantai kereta berkecepatan tinggi menggunakan struktur sandwich komposit, khususnya Fiber Metal Laminates (FML) sebagai lapisan permukaan dan inti berbentuk sarang lebah. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi berat dan biaya sambil mempertahankan integritas struktural. Algoritma Genetik Budidaya Lingkungan (NCGA) dan Metode Elemen Terbatas (FEM) digunakan untuk mengidentifikasi desain yang optimal. Penghematan berat yang signifikan sekitar 62% dan 32% dicapai dengan Fiber-Reinforced Plastic (FRP) dan FML, masing-masing, dibandingkan dengan struktur aluminium, meskipun desain yang lebih ringan mengeluarkan biaya yang lebih tinggi (Sahib, M.M. and Kovács, G., 2023).



Gambar 2. Struktur lantai kereta cepat dan subpanel.
(Sumber: Sahib, M.M. and Kovács, G. 2023)

1.6.3 Pembebanan Kereta Cepat

Sistem kereta cepat beroperasi pada kecepatan tinggi, menciptakan kondisi pembebanan yang kompleks pada seluruh komponen strukturalnya. Secara fundamental, pembebanan pada sistem perkeretaapian dapat diklasifikasikan menjadi beban statik dan beban dinamis. Beban statik mencakup berat mati struktural dari gerbong, lokomotif, serta beban hidup yang diasumsikan konstan seperti berat penumpang dan barang bawaan. Beban-beban ini menjadi dasar penting dalam perhitungan kekuatan dan kekakuan struktural sistem

Di sisi lain, operasi kereta cepat juga tidak terlepas dari pengaruh beban dinamis yang signifikan, timbul dari berbagai faktor seperti percepatan, pengereman, serta interaksi kompleks antara roda dan rel yang dapat menghasilkan getaran dan dampak. Dalam konteks ini, tinjauan mereka tentang pemantauan ketahanan jalur kereta api, menyoroti bagaimana berbagai pembebanan ini memengaruhi kinerja dan integritas jalur. Meskipun fokus analisis dalam proposal ini adalah pada pembebanan statik lantai gerbong, pemahaman mengenai spektrum pembebanan yang lebih luas pada kereta cepat sangat penting untuk menempatkan analisis statik dalam konteks operasional yang realistis dan memahami implikasinya terhadap komponen struktural utama seperti lantai gerbong (Ngamkhanong et al., 2018).

Untuk memahami sepenuhnya respons struktural terhadap pembebanan ini, pemodelan interaksi yang rinci antara kereta, rel, dan jembatan menjadi sangat krusial. Pemodelan ini tidak hanya mempertimbangkan sifat material dan geometri komponen, tetapi juga fenomena kompleks seperti getaran, resonansi, dan dampak dinamis. Pemodelan yang akurat memungkinkan perancang untuk memprediksi perilaku sistem di bawah berbagai skenario beban, sehingga dapat memastikan keselamatan operasional dan kinerja jangka panjang sistem transportasi secara keseluruhan. (Zhai et al., 2019).

Interaksi berkelanjutan antara beban kereta dan infrastruktur rel juga dapat secara signifikan memengaruhi karakteristik profil roda dan rel. Beban dinamis yang

berulang dan tekanan kontak yang tinggi dapat menyebabkan keausan dan perubahan bentuk pada permukaan kontak roda dan rel. Penelitian oleh Maorui Hou mengidentifikasi bahwa perubahan profil roda dan rel yang terjadi pada kereta cepat di Cina, akibat akumulasi beban dan keausan, dapat mengurangi stabilitas perjalanan, meningkatkan kebisingan, dan mempercepat kerusakan komponen, yang pada akhirnya memengaruhi kinerja keseluruhan sistem rel. Oleh karena itu, meskipun fokus analisis dalam proposal ini adalah pada pembebanan statik lantai gerbong, pemahaman mengenai spektrum pembebanan yang lebih luas pada kereta cepat, termasuk dampaknya pada keausan komponen, sangat penting untuk menempatkan analisis statik dalam konteks operasional yang realistis dan memahami implikasinya terhadap komponen struktural utama seperti lantai gerbong (Hou et al., 2022).

1.6.4 Pembebanan Statik

Analisis pembebanan statik pada struktur gerbong kereta cepat merupakan langkah penting dalam proses perancangan untuk memastikan bahwa lantai gerbong mampu menahan beban konstan seperti berat penumpang, peralatan interior, dan struktur itu sendiri tanpa mengalami kegagalan material atau deformasi yang melebihi batas yang diizinkan. Berbeda dengan kereta konvensional, kereta cepat beroperasi pada kecepatan tinggi (di atas 250 km/jam), sehingga desainnya harus mempertimbangkan efisiensi bobot tanpa mengorbankan kekuatan struktural. Pembebanan statik pada gerbong lantai kereta cepat meliputi beban vertikal dari distribusi penumpang yang berdiri atau duduk, beban peralatan seperti kursi dan panel kontrol, serta beban tambahan akibat tekanan aerodinamis yang diteruskan ke struktur lantai saat kereta melaju pada kecepatan ekstrem.

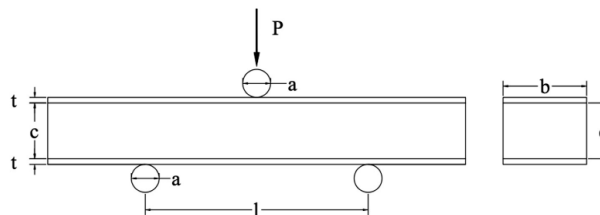
Metode elemen hingga (finite element method) sangat efektif untuk mensimulasikan distribusi tegangan dan deformasi pada struktur seperti bogie gerbong datar, yang dapat diterapkan pada analisis lantai gerbong kereta cepat berbahan komposit sandwich. Dalam simulasi ini, parameter seperti modulus elastisitas, tegangan izin, dan faktor keamanan menjadi acuan utama untuk mengevaluasi kinerja material di bawah beban statik maksimum. Analisis pembebanan statik pada kereta cepat juga harus mempertimbangkan distribusi beban yang tidak merata, misalnya ketika penumpang terkonsentrasi di salah satu sisi gerbong atau saat kereta dalam kondisi diam dengan muatan penuh (Saputra dan Sudarmawan., 2022)

Dalam perancangan struktur lantai gerbong kereta cepat, analisis pembebanan statik merupakan langkah fundamental untuk menjamin integritas dan keamanan struktural. Beban statik didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada struktur secara konstan atau perlahan tanpa adanya percepatan signifikan yang menyebabkan efek inersia. Pada konteks lantai gerbong kereta cepat, sumber utama pembebanan statik meliputi berat mati (dead load) dari struktur lantai itu sendiri, material komposit/sandwich, serta komponen penguat lainnya. Selain itu, beban hidup (live load) yang berasal dari berat penumpang dan barang bawaan juga diperlakukan sebagai beban statik dalam analisis dasar (Gu et al., 2018).

Dalam konteks penggunaan material komposit/sandwich untuk lantai gerbong, analisis statik menjadi lebih kompleks namun juga memberikan potensi optimasi bobot dan kekuatan. Orientasi serat pada lapisan kulit (face sheets) dari material komposit memegang peranan krusial dalam menentukan karakteristik mekanis dan ketahanan struktur terhadap berbagai jenis pembebanan. Susunan serat seperti $[0/90]$ atau $[\pm 45]$ secara signifikan memengaruhi kekuatan tarik, tekan, dan geser material, dan sangat penting untuk menahan beban tekan dan geser yang dominan pada lantai gerbong (Gibson., 2007).

Pembebanan statik merupakan salah satu parameter utama dalam analisis struktural lantai gerbong kereta cepat, karena struktur tersebut harus mampu menahan beban yang bersifat tetap maupun berubah perlahan dalam jangka waktu panjang. Material sandwich berbasis aluminium foam (aluminium foam sandwich/AFS) menjadi kandidat unggul untuk struktur lantai karena memiliki kombinasi unik antara kekakuan tinggi, bobot ringan, dan kapasitas redaman energi yang baik. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengkaji respons AFS terhadap beban statik, baik melalui simulasi numerik maupun pengujian eksperimental.

Studi yang dilakukan oleh Haifeng Chang mengembangkan model elemen hingga (finite element) untuk menganalisis lantai kereta cepat berbahan aluminium dengan inti PVC foam. Penelitian ini memodelkan interaksi struktur secara kompleks, termasuk pengaruh dukungan dan tulangan internal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa beban statik maksimum yang dapat ditahan berada pada kisaran 50 hingga 575 kPa, dengan konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada daerah sambungan antara penutup dan inti foam. Untuk meningkatkan kapasitas beban, direkomendasikan penggunaan struktur penguat berupa rib grid serta penyesuaian geometri dukungan untuk mendistribusikan beban lebih merata dan mengurangi deformasi local (Chang et al., 2021).



Gambar 3. Sistematis diagram of three-point bending test.
(Sumber: Chang. 2021)

Uji beban vertikal merupakan simulasi uji struktur gerbong akibat fungsinya sebagai sarana transportasi yaitu untuk memindahkan barang maupun manusia. Besar muatan berupa barang atau manusia tersebut merupakan besar beban vertikal yang harus ditahan oleh struktur gerbong. Struktur gerbong kereta barang, direncanakan menerima beban vertikal dalam dua kondisi, yaitu kondisi beban kosong (tare load) dan kondisi beban penuh (full load).

Kondisi beban kosong mensimulasikan kondisi dimana kereta dalam keadaan kosong (tanpa muatan), sehingga besar beban kondisi kosong hanya berupa komponen-komponen yang berada diatas struktur rangka bawah gerbong. Besar beban kosong direncanakan sebesar 1.3 ton. Kondisi kedua yaitu kondisi beban penuh, diartikan struktur gerbong menerima beban maksimum yang direncanakan mampu ditopang oleh struktur gerbong. Besar beban penuh atau beban uji P_v dihitung dengan persamaan: (Anwar, A. and Ruhimat, A., 2014).

$$P_v = k (P_1 + P_2) \dots \dots \dots (1)$$

k = faktor dinamis = 1.3

P_1 = berat rangka dasar + badan
= 1.3 ton

P_2 = kuat muat
= berat muat + toleransi

Toleransi = 5% berat muat

Sementara itu pengujian lentur tiga titik secara quasi-static terhadap panel sandwich berbahan aluminium foam dengan pelat penutup (facesheet) dari CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Penelitian ini menyoroti peran tebal dan densitas inti terhadap kinerja struktural. Semakin tinggi densitas dan tebal inti, maka semakin tinggi pula kekakuan lentur dan kapasitas beban panel. Selain itu, berbagai mode kegagalan seperti core shear, debonding, hingga facesheet fracture berhasil diidentifikasi, menandakan bahwa desain struktur AFS harus memperhatikan kualitas ikatan antar lapisan serta karakteristik inti yang digunakan. Hasil ini menegaskan bahwa struktur sandwich dengan desain yang tepat mampu mempertahankan performa optimal di bawah pembebanan statik, bahkan dalam kondisi pembebanan yang berulang.

Temuan-temuan tersebut sangat penting dalam konteks pengembangan lantai gerbong kereta cepat yang mengutamakan efisiensi massa, kekuatan struktural, serta keandalan jangka panjang. Analisis statik yang dikombinasikan dengan pengujian eksperimental dan simulasi numerik menjadi pendekatan yang ideal untuk mengoptimalkan desain lantai berbahan aluminium foam sandwich, sehingga mampu memenuhi tuntutan keselamatan dan kenyamanan dalam sistem transportasi berkecepatan tinggi (Wang et al., 2022).

1.6.5 Spesifikasi Kereta cepat Jakarta-Bandung Tipe CR400AF

Kereta cepat CR400AF, yang digunakan dalam layanan Jakarta-Bandung, merupakan generasi terbaru dari pengembangan tipe CRH380A oleh CRRC Qingdao Sifang, menawarkan spesifikasi teknis canggih. Dengan lebar 3,36 meter, tinggi 4,05 meter, dan panjang yang mencapai 27,2 meter untuk kepala kereta serta 25 meter untuk kereta intermediate, CR400AF dirancang untuk kecepatan desain hingga 420 kilometer per jam dan kecepatan operasional 350 kilometer per jam. Rangkaian kereta terdiri dari delapan kereta, termasuk empat kereta bermotor dan empat kereta tanpa motor, yang mendukung efisiensi dan kinerja kecepatan tinggi. Fitur keselamatan termasuk dua sistem rem darurat, Emergency Brake (EB) yang

dapat diaktifkan melalui driver controller dan fasilitas emergency brake untuk penumpang, menegaskan komitmen terhadap keselamatan penumpang (Indonesiabaik.id, 2021).



Gambar 4. Kereta Cepat CR400AF
(Sumber: Good News, 2019)

Tabel 1. Spesifikasi Kereta Cepat CR400AF

NO	Uraian	Speifikasi
1	Tipe	CR400AF
2	Pengembangan dari	CRH380A oleh CRRC Qingdao Sifang
3	Dimensi	Lebar: 3,36 m, Tinggi: 4,05 m, Panjang Loko: 27,2 m, Intermediate Kereta: 25 m
4	Umur Operasional	30 tahun
5	Biaya Perawatan	Rendah
6	Perlindungan Petir	Dilengkapi dua lightning arrester
7	Kemampuan Operasional	Beroperasi dalam iklim tropis, cuaca ekstrem, suhu kelembapan tinggi
8	Daya	9750 kilo watt
9	Akselerasi dan Kapasitas	Mampu memberikan akselerasi lebih baik, dapat menarik kereta lain meski di gradien atau elevasi tinggi
10	Sistem Rem Darurat	Berbasis kontrol pengemudi dan automatic train protection (ATP)
11	Komposisi Rangkaian	8 gerbong (4 bermotor, 4 tanpa motor)
12	Kecepatan	Desain: 420 km/jam, Operasional: 350 km/jam
13	Waktu Tempuh Jakarta-Bandung	Langsung: 36 menit, Dengan berhenti: 46 menit

(Sumber: Tempo.co, 2024)

1.6.6 Material Komposit

Dalam bidang teknologi material, bahan-bahan serat alam merupakan kandidat sebagai bahan penguat untuk dapat menghasilkan bahan komposit yang ringan, kuat, ramah lingkungan serta ekonomis. Salah satunya adalah bahan-bahan serat alam. Jenis-jenis serat alam seperti misalnya; Sisal, Flex, Hemp, Jute, Rami, Kelapa, mulai digunakan sebagai bahan penguat untuk komposit polimer.

Komposit didefinisikan sebagai kombinasi antara dua material atau lebih yang berbeda bentuknya, komposisi kimianya, dan tidak saling melarutkan antara materialnya dimana material yang satu berfungsi sebagai penguat dan material yang lainnya berfungsi sebagai pengikat untuk menjaga kesatuan unsur-unsurnya. Secara umum terdapat dua kategori material penyusun komposit yaitu matrik dan reinforcement. Matriks dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu termoplastik dan termoset. Beberapa jenis matrik polimer termoset yang sering digunakan ialah polyester, epoxy, phenolics, dan polyamids, sedangkan yang termasuk jenis matrik polimer termoplast adalah polyethylene, polypropylene, nilon, polycarbonate, dan polyether-ether keton. Dalam penelitian ini matriks yang digunakan adalah resin polyester (Maryanti et al., 2011).

1.6.7 Jenis-Jenis Komposit dalam Kereta Cepat

Menurut (Bayu Saputra & Rusli Ahyar, 2023) di kutip dari (Karmila, Agoes, Tavio, 2013). FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) adalah serat karbon yang didefinisikan sebagai serat yang mengandung setidaknya 90% serat karbon. Serat karbon tidak menunjukkan korosi atau pecah pada suhu kamar. Fungsi perkuatan dengan sistem FRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas lentur, geser, axial dan daktilitas. Cara pemasangan FRP adalah dengan melilitkannya mengelilingi permukaan perimeter elemen struktur yang diperkuat dengan menggunakan perekat epoxy resin. Sistem kerjanya sama dengan tulangan transversal konvensional.

a. *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP)

CFRP merupakan salah satu jenis dari FRP. CFRP digunakan untuk perbaikan dan memperkuat elemen struktur pada konstruksi. Teknik perkuatan menggunakan CFRP dapat dibuat efisien, tidak menyebabkan karat seperti plat baja. Fungsi perkuatan dengan sistem komposit CFRP adalah untuk meningkatkan kekuatan atau memberikan peningkatan kapasitas geser, aksial dan daktilitas, atau berbagai kombinasi lainnya. Daya tahan CFRP yang tinggi lebih ekonomis digunakan pada lingkungan korosif (baja akan mudah berkarat). Penggunaan CFRP akan lebih populer dibandingkan dengan jenis FRP lainnya seperti glass dan aramid (Bayu Saputra & Rusli Ahyar, 2023).

b. *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP)

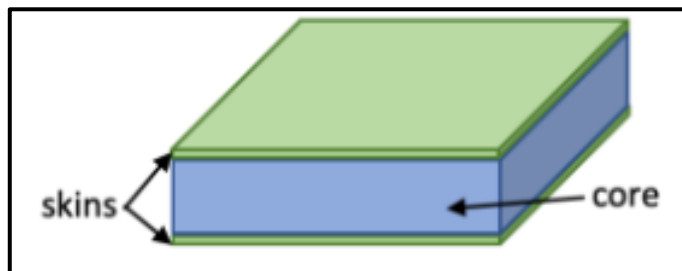
GFRP adalah serat polimer yang terbuat dari matriks plastik diperkuat oleh serat halus dari kaca (S. Nurlina, H. Suseno, M. T. Hidayat, 2016). GFRP merupakan jenis FRP yang relatif lebih murah dibanding jenis FRP lainnya (Sundar, 2019). Selain itu, GFRP memiliki karakteristik bahan yang lebih elastis

dan memiliki elongation yang lebih besar sehingga memiliki daktilitas yang lebih besar dari CFRP (I. Putu, P. Rusmana, G. Nyoman, P. Wijaya, 2018).

1.6.8 Aluminium and Sandwich Foam

Penggunaan komposit material di berbagai sektor industri, seperti dirgantara (pesawat komersial dan militer), otomotif, dan infrastruktur telah meningkat secara pesat selama beberapa tahun terakhir.

Struktur komposit sandwich merujuk pada gabungan antara lapisan luar (*skin*) yang terbuat dari bahan komposit dengan modulus elastisitas tinggi dan inti (*core*) komposit yang memiliki kepadatan rendah. Kombinasi ini menghasilkan material yang memiliki kekakuan, kekuatan, dan ringan secara bersamaan. Komposit dengan struktur *sandwich*, yang juga dikenal sebagai komposit *sandwich*, memperoleh sifat-sifat material tersebut (Ratuningtyas 2023).



Gambar 5. Struktur komposit *Sandwich*
(Sumber Ratuningtyas 2023)

Terdapat beberapa faktor dari material penguat yang memengaruhi karakteristik mekanik komposit, seperti tipe *core*, dimensi *core*, bentuk *core*, ukuran serat, bentuk serat, arah serat, konsentrasi serat, dan distribusi serat. (Delavari & Dabiryan, 2021; Prayoga et al., 2018).

Konstruksi *sandwich* yang secara konsisten digunakan melibatkan penggunaan material *core* yang dikelilingi oleh lapisan kulit pada kedua sisinya. Pendekatan konstruksi ini diharapkan dapat memberikan kekakuan yang memadai dengan bobot yang relatif ringan. Struktur komposit sandwich terdiri dari elemen berikut:

1. Skin, yang berperan dalam menahan tegangan tarik dan tekan. Untuk bagian ini, material konvensional seperti *aluminium*, baja, dan *stainless steel* dapat digunakan. Selain itu, material berbentuk plastik yang diperkuat dengan serat gelas atau serat lainnya juga merupakan pilihan yang baik, karena material-material ini memiliki keuntungan seperti kemudahan dalam penggabungan, kemampuan desain yang disesuaikan dengan kebutuhan, dan permukaan yang memiliki kualitas yang baik. Sebagian besar struktur *composite sandwich* yang digunakan dalam konstruksi pesawat memiliki *skin aluminium*, *fiberglass*, *Kevlar*, atau *Carbon Fiber*. Bahan inti (*core*) yang paling umum digunakan untuk struktur sarang lebah pesawat adalah kertas aramid.

2. Inti (*core*) merupakan komponen krusial dalam struktur komposit *sandwich*, yang perlu memiliki kekakuan yang memadai untuk menjaga jarak antara permukaannya. Fungsi utama *core* adalah mencegah geseran atau pergeseran antara permukaan. Oleh karena itu, *core* harus memiliki kekakuan yang cukup untuk menahan geseran dan menjaga stabilitas *sandwich*. Penggunaan bahan dengan kekakuan rendah tidak diinginkan untuk *core* karena hal tersebut dapat mengurangi atau menghilangkan kekakuan keseluruhan *sandwich*. Selain memiliki kekuatan dan densitas rendah, *core* biasanya harus memenuhi persyaratan lain, seperti tingkat kelembaban, resistensi *buckling*, masa pakai yang panjang, dan faktor-faktor lainnya. komposit sebagai bahan material yang terdiri dari matriks dan penguat, di mana matriks adalah material yang membungkus dan mengikat penguat, sedangkan penguat adalah material yang memberikan kekuatan tambahan pada komposit, di mana setiap material tersebut memiliki sifat-sifat yang berbeda, namun digabungkan secara bersama-sama untuk menciptakan sifat-sifat yang lebih baik tanpa mengubah sifat dari masing-masing material tersebut

Aluminium foam adalah suatu bahan logam yang sangat berpori yang mempunyai struktur selular dengan volume pori mencapai 70%-95% dari total volume. Material ini dapat diaplikasikan dalam dunia otomotif, pesawat terbang, kapal, konstruksi dan bangunan, alat rumah tangga dan furniture dan alat-alat teknik. Aluminium banyak dipakai karena sifatnya yang ringan, kuat, dan tahan terhadap korosi menjadi sebab banyaknya penggunaan material aluminium.

Cara pembuatan aluminium foam dapat dibuat dengan dua cara yaitu *melt route process* dan *solid route process* dan *powder metallurgy*. Pembuatan aluminium foam dengan *solid route process* lebih rumit karena mencampurkan serbuk aluminium dengan bahan kimia berupa serbuk yang berfungsi sebagai penghasil gelembung gas atau dikenal sebagai *foaming agent* atau *blowing agent* kemudian campuran dipadatkan atau dikompaksi dan kemudian dilakukan proses sintering hingga titik lebur aluminium dan di atas suhu dekomposisi foaming agent. Sedangkan pembuatan aluminium foam dengan cara *melt route process* lebih sederhana dengan mencairkan logam aluminium ditambahkan *foaming agent* dan dilakukan pengadukan agar *foaming agent* dapat tercampur secara merata sehingga terbentuk pori-pori yang merata pula.

Dalam pembuatan aluminium foam ada beberapa bahan kimia yang bisa digunakan sebagai *foaming agent* seperti titanium hidrida (TiH_2), zirkonium hidrida (ZrH_2), dan magnesium hidrida (MgH_2) (Banhart, 2000). Selain bahan tersebut, kalsium karbonat ($CaCO_3$) dan NaCl juga biasa digunakan sebagai foaming agent oleh para peneliti (Curran, 2003) menggunakan $CaCO_3$ sebagai blowing agent sebagai pengganti TiH_2 menggunakan metode melt route. Fida (2008) juga memanfaatkan $CaCO_3$ sebagai blowing agent untuk pembuatan aluminium foam yang memvariasikan temperatur (Nugroho, and Rahman 2012).

1.6.9 Metode Elemen Hingga

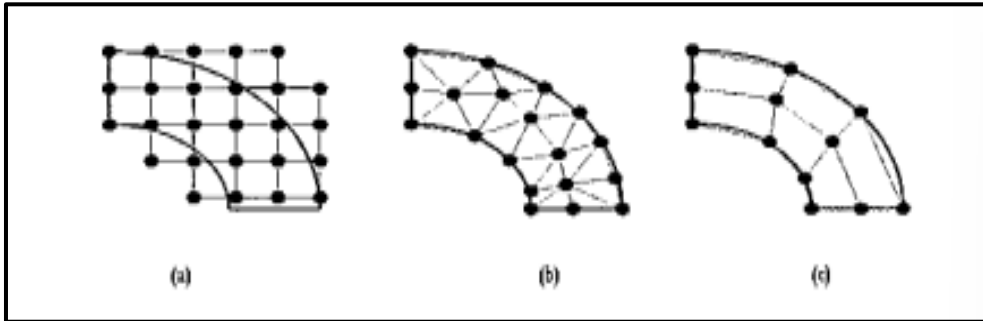
Perkembangan dunia komputer telah begitu cepatnya mempengaruhi bidang-bidang penelitian dan industri, sehingga impian para ahli dalam mengembangkan ilmu pengetahuan dan industri telah menjadi kenyataan. Pada trend sekarang ini, metoda dan analisa desain telah banyak menggunakan perhitungan matematis yang rumit dalam penggunaan sehari-hari (Mulyadi 2011).

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk mengatasi masalah nilai batas yang dikarakteristikan dengan persamaan diferensial parsial dan kondisi batas. Domain geometrik dari masalah nilai batas didiskritisasi menggunakan elemen subdomain, yang disebut sebagai elemen hingga, dan persamaan diferensial tersebut diterapkan terhadap elemen tunggal setelah diubah ke dalam bentuk integral-diferensial. Satu set bentuk fungsi digunakan untuk mewakili variabel utama yang tidak diketahui dalam domain elemen. Satu set persamaan linier diperoleh untuk setiap elemen dalam domain diskrit. Sebuah sistem matriks global dibentuk setelah menyusun seluruh elemen. Ada beberapa permasalahan yang dapat diselesaikan oleh metode elemen hingga diantaranya adalah permasalahan phisis. Berikut merupakan type-type permasalahan phisis yang dapat dipecahkan oleh metode elemen hingga diantaranya pemecahan masalah tegangan (stress), buckling (tekukan) dan analisis getaran.

Metode elemen hingga (finite element method) banyak memberikan andil dalam melahirkan penemuan-penemuan bidang riset dan industri, Hal ini dikarenakan dapat berperan sebagai research tool pada eksperimen numerik. Aplikasi banyak dilakukan pada problem kompleks diselesaikan dengan metode elemen hingga seperti rekayasa struktur, steady state dan time dependent heat transfer, fluid flow, dan electrical potential problem, aplikasi bidang medikal.

Prinsip MEH 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 diperoleh. Dalam menghitung solusi per elemen tentunya solusi elemen harus memenuhi beberapa ketentuan, seperti kontinuitas pada titik-titik nodal dan antarmuka (interface) elemen. Disamping Metode Elemen Hingga, 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 10 yang berupa sebuah seperempat profil annulus. Mesh MPH digambarkan pada Gambar 10 a dan mesh MEH pada Gambar 10 b dan 10 c jelas terlihat bahwa dengan menggunakan MPH, titik-titik mesh (nodes) tidak dengan tepat berada pada batas annulus. Hal ini akan mengurangi akurasi hasil dari MPH. Secara logika MPH dapat digunakan pada problem dengan domain yang kompleks asalkan kita gunakan ukuran mesh yang

kecil sehingga boundari domain dapat diikuti titik-titik mesh secara lebih akurat. Hal ini tidak menjadi masalah jika MEH digunakan karena titik-titik mesh MEH dapat diletakan pada batas domain (Gambar 10 b dan 10 c). Gambar 10 menggambarkan dua jenis elemen MEH, yaitu elemen segitiga (triangular element) dan segiempat (quadrilateral element).



Gambar 6. (a) Mesh Metode perbedaan hingga, (b) elemen segitiga (c) elemen segiempat titik adalah titik mesh (nodes)
(Sumber: Mulyadi 2011)

Dengan MEH, solusi yang diperoleh adalah fungsi interpolasi setiap elemen. Setelah fungsi interpolasi elemen dihitung, solusi keseluruhan dapat diperoleh. Fungsi-fungsi interpolasi setiap elemen ditentukan oleh nilai pada titik mesh (Mulyadi 2011).

1.6.10 Aluminium dan Paduannya

Aluminium adalah logam yang ringan dengan berat jenis 2.7 gram/cm³ setelah Magnesium (1.7 gram/cm³) dan Berilium(1.85 gram/cm³) atau sekitar 1/3 dari berat jenis besi maupun tembaga. Konduktifitas listriknya 60 % lebih dari tembaga sehingga juga digunakan untuk peralatan listrik. Selain itu juga memiliki sifat penghantar panas, memiliki sifat pantul sinar yang baik sehingga digunakan pula pada komponen mesin, alat penukar panas, cermin pantul, komponen industri kimia dan lain-lain.

Aluminium merupakan logam yang reaktif sehingga mudah teroksidasi dengan oksigen membentuk lapisan aluminium oksida, alumina (Al₂O₃) dan membuatnya tahan korosi yang baik. Namun bila kadar Fe, Cu dan Ni ditambahkan akan menurunkan sifat tahan korosi karena kadar aluminanya menurun. Penambahan Mg, Mn tidak mempengaruhi sifat tahan korosinya. Aluminium bersifat ulet, mudah dimesin dan dibentuk dengan kekuatan tarik untuk aluminium murni sekitar 4~5 kgf/mm². Bila diproses penguatan regangan seperti dirol dingin kekuatan bisa mencapai ± 15 kgf/mm² (Irawan).

Tabel 2: Klasifikasi aluminium

Al paduan untuk di mesin	Paduan jenis tidak dapat di perlakuan panas (non-heat-treatable)	Al murni (seri 1000) Paduan Al-Mn (seri 3000) Paduan Al-Si (seri 4000) Paduan Al-Mg (seri 5000)
	Paduan jenis dapat perlakuan panas (heat-treatable)	Paduan Al-Cu (seri 2000) Paduan Al-Mg-Si (seri 6000) Paduan Al-Zn (seri 7000)
Al paduan untuk coran	<i>Non-heat-treatable alloy</i>	Paduan Al-Si (Silumin) Paduan Al-Mg (Hydronarium)
	<i>Heat-treatable alloy</i>	Paduan Al-Cu (Lautal) Paduan Al-Si-Mg (Silumin, Lo-ex)

(Sumber: Irawan)

Berikut ini dibahas beberapa jenis paduan aluminium dan karakteristiknya:

a. Seri 1000

Seri 1000 merupakan paduan yang mengandung 99.00 % - 99.75 % Al. Paduan ini biasanya diaplikasikan pada peralatan-peralatan listrik. Sifat dari paduan ini yaitu strain hardenable, mudah dibentuk, tahan korosi dan memiliki konduktivitas listrik yang baik. Beberapa contoh dari paduan ini yaitu 1100 (99.00 % Al), 1050 (99.50 % Al), 1350 (99.50 % Al), dan 1175 (99.75 % Al) (The Aluminum Association, Inc., 1998).

b. Seri 2000 (Al-Cu Alloys)

Seri 2000 mempunyai elemen pepadu tembaga dengan penambahan elemen minor seperti mangan dan magnesium. Paduan ini memiliki kekuatan dan weldability yang baik, namun paduan ini tidak tahan korosi atmosferik sehingga biasanya paduan ini dicat atau di-clad. Paduan Al seri 2000 yang mempunyai kekuatan paling tinggi yang biasa digunakan adalah Al 2024 yaitu untuk pesawat terbang, dan Al 2014 untuk body truck (The Aluminum Association, Inc., 1998).

c. Seri 3000 (Al-Mn Alloys)

Seri 3000 merupakan paduan aluminium yang paling banyak digunakan. Paduan ini merupakan paduan aluminium dengan mangan mempunyai kekuatan hingga 20 % di atas seri 1000. Sifat dari paduan ini yaitu mudah dibentuk dan

disambung, tahan korosi, mempunyai kekuatan medium, dan biasanya memiliki ultimate tensile strength dalam rentang 16 - 41 ksi. Paduan yang populer digunakan dari seri ini yaitu Al 3003 yang umumnya digunakan untuk aplikasi-aplikasi yang membutuhkan kekuatan yang medium dan kemampu-bentukan yang baik seperti rumah, arena rekreasi dan peralatan- peralatan industri yang ringan. Paduan ini biasanya tidak digunakan pada industri pesawat terbang (The Aluminum Association, Inc., 1998).

d. Seri 4000 (Al-Si Alloys)

Seri 4000 merupakan paduan aluminium dengan silikon sebagai elemen utama paduan. Paduan seri ini mempunyai fluiditas yang sangat baik dalam keadaan leleh karena kandungan Si yang tinggi sehingga mampu mengisi celah (crevice) saat pengelasan, mempunyai kekuatan sedang, dan ultimate tensile strength dalam rentang 25-55 ksi. Paduan yang sering digunakan dari seri ini yaitu Al 4032 dan Al 4043 (The Aluminum Association, Inc., 1998).

e. Seri 5000 (Al-Mg Alloys)

Seri 5000 merupakan paduan aluminium dengan magnesium sebagai elemen utama paduan. Paduan ini mempunyai sifat dapat dikeraskan (hardenable), kekuatan tinggi, ketahanan korosi yang sangat baik meskipun dalam air laut, dan mempunyai ketangguhan (toughness) yang tinggi. Paduan ini dapat di-las sampai ketebalan 20 cm. Seri 5000 ini dapat ditingkatkan kekuatannya dengan menambahkan Mg. Paduan ini banyak diaplikasikan pada bangunan dan konstruksi, jalan tol, jembatan, storage tank, dan sistem pada suhu lebih rendah dari 270 °C, dan juga struktur yang berada di dalam laut. Contoh dari paduan ini yang diaplikasikan pada dunia otomotif yaitu Al 5252, Al 5457, dan Al 5657 (The Aluminum Association, Inc., 1998).

f. Seri 6000 (Al-Mg-Si Alloys)

Seri 6000 merupakan paduan aluminium dengan magnesium dan silikon sebagai elemen pepadu utama. Paduan ini memiliki kekuatan sedang dan tahan korosi. Paduan ini dapat juga dianodisasi untuk meningkatkan ketahanan korosinya. Paduan ini banyak diaplikasikan pada pesawat terbang, transportasi darat dan laut. Salahsatu contoh dari paduan ini yaitu Al 6063 yang banyak digunakan pada aplikasi arsitektur (The Aluminum Association, Inc., 1998).

g. Seri 7000 (Al-Zn Alloys)

Seri 7000 merupakan paduan aluminium dengan seng sebagai elemen pepadu utama. Paduan ini mempunyai kekuatan tinggi, diaplikasikan untuk pesawat terbang, dan dapat dilakukan spot welding. Paduan ini tidak tahan korosi jika tidak dilakukan proteksi misalnya dengan anodizing atau painting. Contoh dari paduan ini yang biasa digunakan yaitu Al 7049 dan Al 7050 (The Aluminum Association, Inc., 1998).

h. Seri 8000

Seri 8000 merupakan paduan aluminium dengan elemen-elemen lain selain pada paduan seri 1 s/d 7 seperti Fe, Ni dan Li. Elemen tersebut memberikan karakteristik khusus pada paduan, misalnya elemen Fe dan Ni dalam paduan Al

8071 memberikan kekuatan dengan sedikit kehilangan konduktivitas listrik. Elemen Li dalam paduan 8090 memberikan kekuatan dan modulus yang tinggi (The Aluminum Association, Inc., 1998).

1.6.11 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).

1.6.12 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, Nadiyah, Aishah, & Nadiyah, 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 fender kapal.

b. Spesific 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,

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

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 (%)

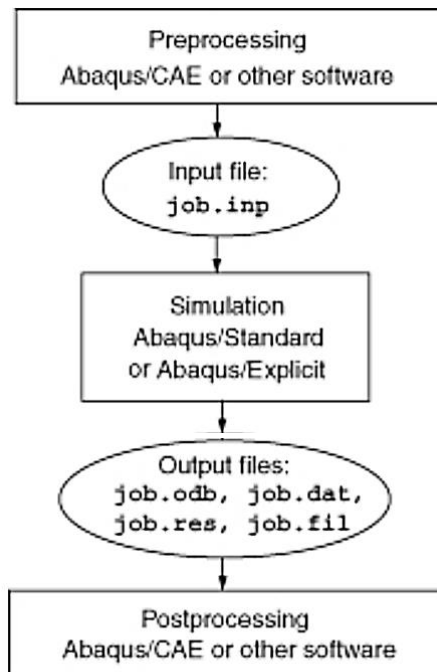
F_{mean} : Gaya rata-rata (kN)

F_{maks} : Gaya maksimum (kN)

1.6.13 Perangkat Lunak Abaqus

Abaqus 16.3-1 adalah paket program simulasi rekayasa berdasarkan metode elemen hingga yang dapat memecahkan masalah mulai dari analisis linear yang relatif sederhana sampa pada simulasi nonlinier yang rumit. Abaqus menawarkan berbagai kemampuan untuk simulasi aplikasi linear dan nonlinear. Masalah pada sistem dengan beberapa komponen dimodelkan dengan menghubungkan geometri dan mendefinisikan setiap komponen dengan model bahan yang tepat kemudian menentukan interaksi komponen. Untuk analisis nonlinear Abaqus memilih kenaikan beban dan nilai toleransi konvergensi yang sesuai secara otomatis serta kontinyu dan melakukan penyesuaian selama analisis untuk memastikan solusi yang akurat dan efisien.

Analisis lengkap dengan Abaqus biasanya terdiri dari tiga tahap yang berbeda: Soleh file-file seperti yang ditunjukkan di bawah ini:



Gambar 7. Tahapan Proses Analisa Numerik Program Abaqus
(Sumber: Leonardo Johanis 2019)

Preproccesing (Abaqus/CAE); pada tahap ini dilakukan pemodelan masalah secara grafis menggunakan Abaqus/CAE atau dengan program CAD lain yang mendukung, pada dasarnya untuk pemodelan permasalahan yang sederhana pada Abaqus dapat dilakukan dengan text editor yang tersedia. Simulation (Abaqus/Standard or Abaqus/Explicit); Tahap simulasi dimana Abaqus memroses komputasi numerik dibelakang layar untuk pemecahan permasalahan yang sudah didefinisikan sebelumnya.

Hasil komputasi yang termasuk nilai stress dan defleksi tersimpan dalam bentuk file biner yang siap ditampilkan pada tahap *postprocessing*. Lama waktu yang dibutuhkan untuk tahapan ini sangat tergantung pada kompleksitas masalah yang dianalisis serta kemampuan hardware komputer yang digunakan. Postprocessing (Abaqus/CAE); setelah proses komputasi pada tahap simulation telah selesai hasilnya dapat ditampilkan dan dievaluasi. Evaluasi umumnya dilakukan secara interaktif menggunakan modul Visualisasi Abaqus/CAE atau *postprocessor* lain. Modul Visualisasi yang membaca database hasil komputasi numerik memiliki banyak variasi pilihan untuk menampilkan hasil analisis, termasuk plot kontur warna, animasi, plot deformasi bentuk dan plot pada bidang X-Y (Leonardo Johanis 2019). Adapun beberapa fitur dan kemampuan utama dari software ini antara lain:

1. Analisis Elemen Hingga: Abaqus menggunakan metode elemen hingga untuk membagi objek menjadi elemen-elemen kecil yang lebih mudah dihitung. Ini memungkinkan simulasi mekanika yang kompleks dan akurat.
2. Material Nonlinear: Abaqus mendukung perilaku material yang nonlinear, termasuk hiperelastisitas, plastisitas, dan krioplasitas. Ini memungkinkan simulasi dalam kondisi beban yang ekstrim dan material yang kompleks.
3. Analisis Struktur: Abaqus dapat melakukan analisis tegangan dan deformasi pada struktur, baik dalam kondisi statis maupun dinamis. Hal ini bermanfaat untuk memahami bagaimana struktur akan berperilaku di bawah berbagai beban.
4. Analisis Termal: Perangkat lunak ini dapat melakukan analisis perpindahan panas dan perubahan suhu pada objek.
5. Analisis Dinamika: Abaqus dapat memodelkan dan menganalisis respons dinamis sistem terhadap beban getaran, kejutan, atau perubahan gaya dalam waktu tertentu.
6. Analisis Komposit: Abaqus memiliki kemampuan untuk menganalisis material komposit.
6. Simulasi Proses Manufaktur: Selain analisis struktur, Abaqus juga dapat digunakan untuk menganalisis proses manufaktur seperti pemadatan logam, pengecoran, dan berbagai proses pembentukan lainnya.
7. Interaksi Kontak: Perangkat lunak ini memungkinkan pemodelan interaksi kontak antara komponen yang berbeda, seperti komponen mekanis yang saling bersentuhan (Lintang 2023).

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Proses Penelitian dimulai sejak bulan Maret 2024 hingga Agustus 2024 di laboratorium *Vibration and Accoustics*, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin



Gambar 8. Tempat Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

1. 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 Simulink*.



Gambar 9. Komputer

2. Mouse

Mouse berfungsi sebagai alat untuk menggerakkan kursor pada komputer



Gambar 10. Mouse

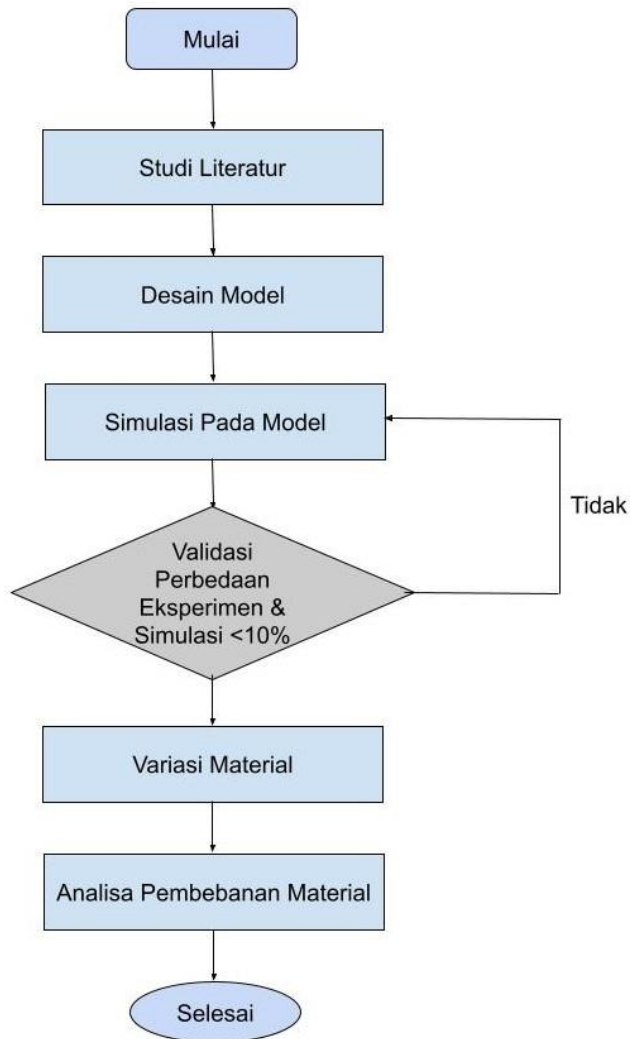
3. Software Abaqus CAE

Abaqus adalah perangkat lunak simulasi berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) yang digunakan untuk menganalisis struktur, mekanika, termal, dan fluida.



Gambar 11. Software Abaqus CAE

2.3 Flowchart Penelitian

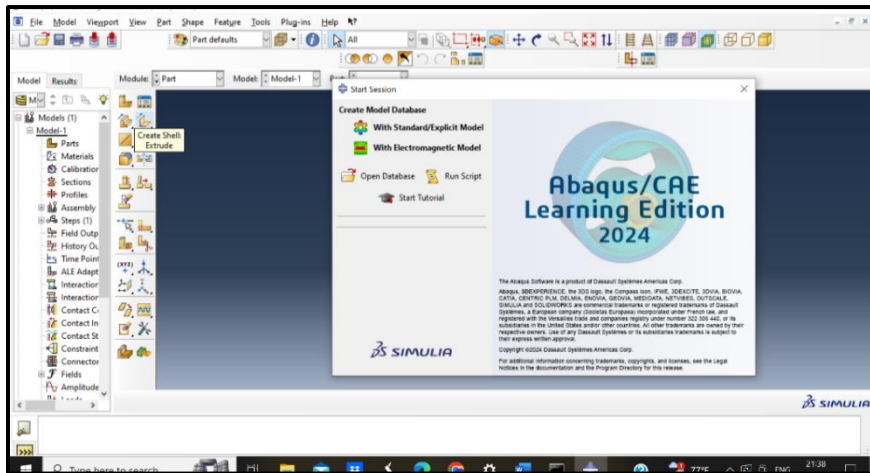


Gambar 12. Alur proses Penelitian

2.4 Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak Abaqus untuk melakukan simulasi rekayasa berdasarkan metode elemen hingga. Komponen dimodelkan dengan menghubungkan geometri dan mendefinisikan setiap komponen dengan model bahan yang tepat kemudian menentukan interaksi yang terjadi pada *floor* kereta cepat yang terbuat dari bahan komposit.

2.5 Simulator



Gambar 13. Home Screen Aplikasi Abaqus

Simulator yang digunakan dalam penelitian ini adalah aplikasi Abaqus, rangkaian produk Abaqus ini menawarkan solusi yang kuat dan lengkap untuk permasalahan di bidang teknik dan canggih yang mencakup spektrum aplikasi industri yang luas. Dalam kelompok kerja teknik dapat mempertimbangkan beban kendaraan penuh, getaran dinamis, sistem multibody, benturan/tabrakan, statis nonlinier, kopling termal, dan kopling struktural akustik menggunakan struktur data model umum dan teknologi solver terintegrasi. Perusahaan terbaik di kelasnya memanfaatkan Abaqus FEA untuk mengkonsolidasikan proses dan alat mereka untuk mengurangi biaya juga mendapatkan keunggulan kompetitif.

2.6 Karakteristik Material

1. Aluminium 7075

Tabel 3. Mekanika Properti Aluminium 7075 T651

Sifat Mekanik	
<i>Density</i>	2,81 g/cm ³
<i>Ultimate tensile strength</i>	572 MPa
<i>Modulus of Elasticity</i>	71,7 GPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,33
<i>Termal Conductivity</i>	0,960 J/g-°C
<i>Yield Strength</i>	503 MPa

(Sumber: gabrian.com).

2. Aluminium 6082 T6

Tabel 4. Mekanika Properti Aluminium 6082 T6

Sifat Mekanik	
<i>Density</i>	2,71 g/cm ³
<i>Ultimate tensile strength</i>	330 MPa
<i>Modulus of Elasticity</i>	70 GPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,33
<i>Young Modulus</i>	71 GPa
<i>Yield Strength</i>	280 MPa

(Sumber: Chen, W, 2021).

3. Aluminium 6061 T6

Tabel 5. Mekanika Properti Aluminium 6061 T6

Sifat Mekanik	
<i>Density</i>	2,7 g/cm ³
<i>Ultimate tensile strength</i>	310 MPa
<i>Modulus of Elasticity</i>	68,9 GPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,33
<i>Shear Modulus</i>	26 GPa
<i>Shear Strength</i>	207 MPa

(Sumber: Ardiansyah, 2019).

4. Aluminium 5083 H

Tabel 6. Mekanika Properti Aluminium 5083 H

Sifat Mekanik	
<i>Density</i>	2,65 g/cm ³
<i>Ultimate tensile strength</i>	317 MPa
<i>Modulus of Elasticity</i>	72 GPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,33
<i>Shear Modulus</i>	26,4 GPa
<i>Shear Strength</i>	190 MPa

(Sumber: azom.com).

5. Aluminium Foam

Tabel 7. Mekanika Properti Aluminium Foam

Sifat Mekanik		
Kekuatan Kompresi	367 psi	2.53 MPa
Kekuatan tarik	180 psi	2.53 MPa
Kekuatan geser	190 psi	1.24 MPa
Modulus Elastis (Tekanan)	15 x 103 psi	1.31 MPa
Modulus Elastis (Tegangan)	14.6 x 103 psi	103.08 MPa
Modulus Geser	2.9 x 104 psi	101.84 MPa
Nilai Piramida Vicker	35 HV	
Panas Spesifik	214 BTU/lb-°F	895J/g-C
Konduktivitas Termal Massal	3.4 BTU/ft-hr-F	5.8 W/m-C
Koefisien Ekspansi Termal (0 - 100 °C)	13.1 x 10-6 in/in- °f	23.58 x 10-6 m/m – C
Resistivitas Massal	2.84 x 10-5ohm - in	7.2 x 10-5 ohm-cm
Titik Lebur	1220°F	660°C

(Sumber: Firstiawaty, 2022).

2.7 Spesifikasi Floor

Penelitian ini menggunakan model komputasional untuk menganalisis floor (lantai) kereta cepat dengan dimensi panjang 2991 mm dan lebar 1915 mm. Floor tersebut didesain sebagai material komposit sandwich, yang terdiri dari lapisan luar (*skin*) dari aluminium 7075 T651, 6082 T6, 6061-T6, 5083, dan inti (*core*) berupa aluminium foam.

Penelitian ini mengevaluasi beberapa variasi material pada *skin* untuk memahami pengaruhnya terhadap performa struktur lantai. Variasi pertama menggunakan *skin* aluminium 7075 dengan ketebalan 0.5 mm dan *core* setebal 19 mm. Pada variasi kedua, menggunakan *skin* aluminium 6082 T6 ketebalan *skin* 0.5 mm, sementara ketebalan *core* tetap 19 mm. Variasi ketiga menggunakan *skin* aluminium 6082 T6 dengan ketebalan 0.5 mm dan *core* 19 mm, dan variasi keempat menggunakan *skin* aluminium 5083 dengan ketebalan 0.5 mm dengan *core* yaitu 19 mm.

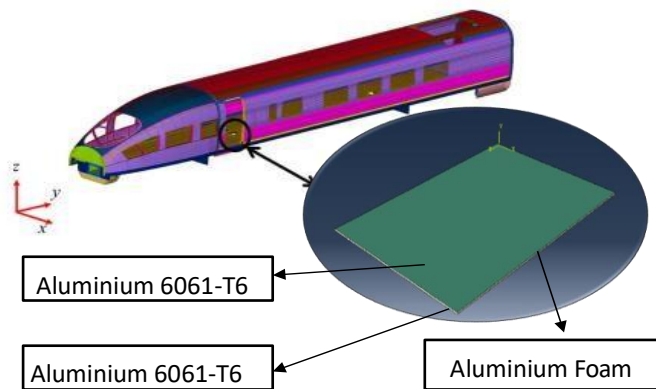
Variasi-variasi ini dirancang untuk menganalisis respons statik dari struktur lantai, dengan tujuan menemukan konfigurasi material yang paling efektif dalam pembebanan statik dan getaran. Hal ini penting untuk meningkatkan kenyamanan dan keamanan penumpang saat diterapkan pada kereta cepat, khususnya dalam membandingkan jenis material paduan aluminium untuk pengaplikasian di kehidupan nyata, seperti bidang transportasi darat yaitu kereta cepat. Lantai kereta cepat modern, seri CR400AF, umumnya dibangun menggunakan panel komposit aluminium. Panel-panel ini sering kali memiliki

struktur honeycomb (sarang lebah). Struktur ini terdiri dari inti heksagonal ringan yang terbuat dari aluminium yang diapit di antara dua lapisan penutup yang tipis dan kuat. Dan untuk seri CR400AF dapat menampung beban maksimal 501,24 ton yang terdiri dari 8 gerbong (Sobarudin, T.S. 2025).

Tabel 8. Spesifikasi *Floor* Kereta Cepat

No	Kereta Cepat Tipe CR400AF	Dimensi
1	Panjang	2991 mm
2	Lebar	1915 mm

(Sumber: You et al., 2022)



Gambar 14. Ilustrasi Lantai kereta cepat

(Sumber: You et al., 2022)

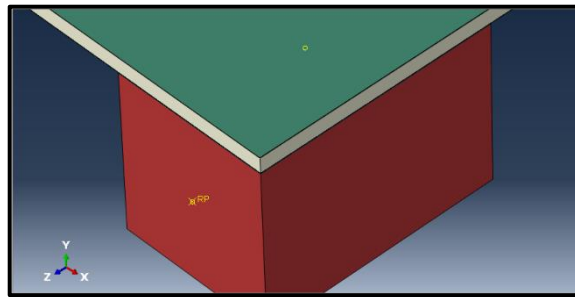
2.8 Konfigurasi *Floor*

Konfigurasi dilakukan sebagai bahan perbandingan antara penggunaan aluminium 7075 T651, 6082-T6, 6061-T6, 5083 dan *sandwich aluminium foam* terhadap penyerapan energi saat proses landing berlangsung.

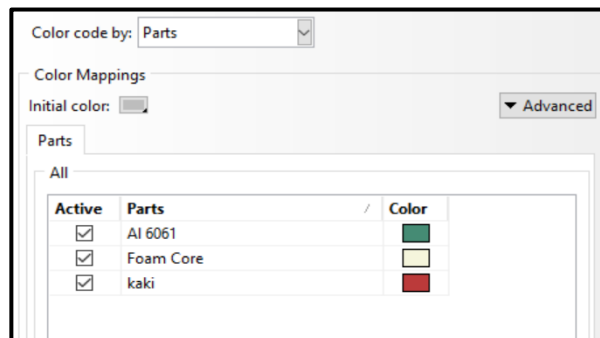
Perbandingan antara material aluminium paduan dan *sandwich aluminium foam* dibuat dengan variasi seri aluminium paduannya yang menyerupai satu antar yang lain, agar dapat dibuat kesimpulan berdasarkan data tegangan yang didapatkan dari hasil pengujian simulasi pada software Abaqus CAE.

Tabel 9. Konfigurasi desain *Floor*

Konfigurasi	Material	Ketebalan Al (mm)	Ketebalan Foam (mm)
1	<i>Aluminium 7075</i>	0.5	19
2	<i>Aluminium 6061</i>	0.5	19
3	<i>Aluminium 6082</i>	0.5	19
4	<i>Aluminium 5083</i>	0.5	19



Gambar 15. Desain *Floor*



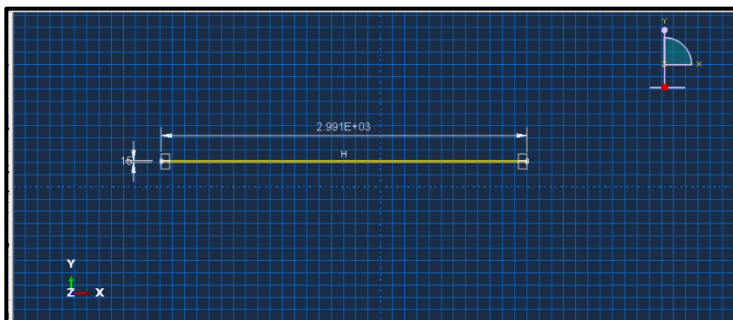
Gambar 16. *Color Code*

2.9 Prosedur Pembuatan Model

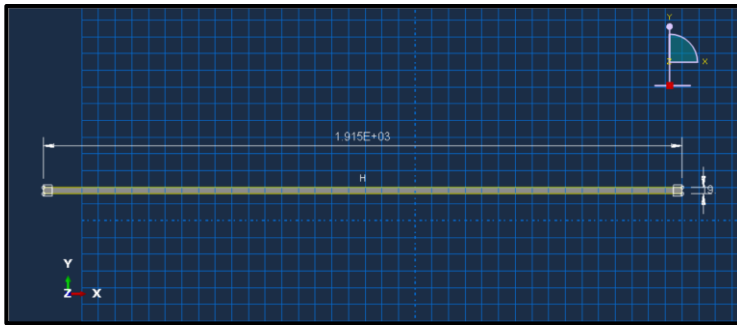
Model simulasi berdasarkan desain Kereta Cepat Tipe CR400AF dibuat melalui beberapa serangkaian tahapan menggunakan perangkat lunak Autodesk Fusion 360 untuk pembuatan model, serta *Abaqus* CAE sebagai alat simulasi. Tahap-tahapnya meliputi proses perancangan model dan pengujian simulasi untuk memastikan kinerja dan keandalan Kereta Cepat.

a. Sketch

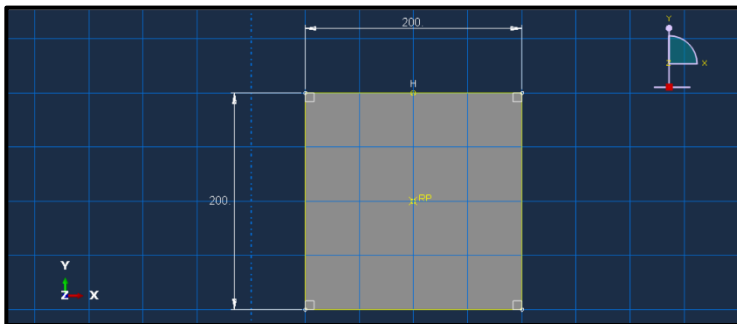
Membuat sketsa, mode ini merupakan tempat untuk membuat profil geometris yang menentukan fondasi desain. Kemudian dengan menggunakan perintah seperti extrude dan fillet untuk membuat model 3D dari sketsa.



Gambar 17. Model Sketch plat Al 6061



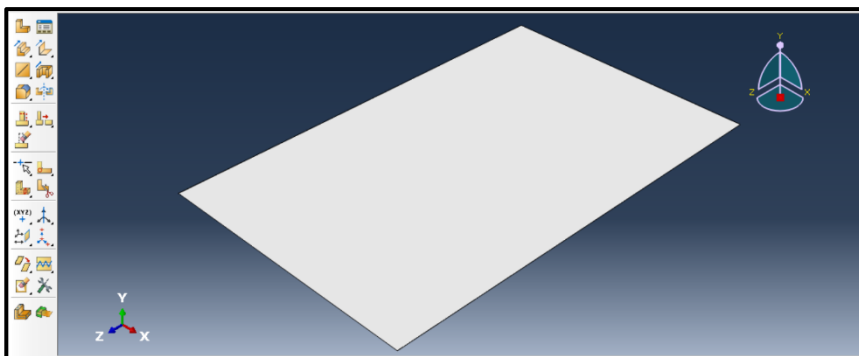
Gambar 18. Model Sketch plat Foam



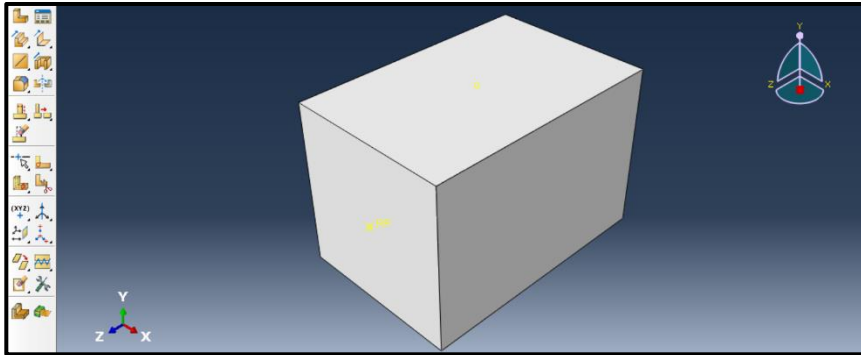
Gambar 19. Model Sketch supporting

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 20. Model plat



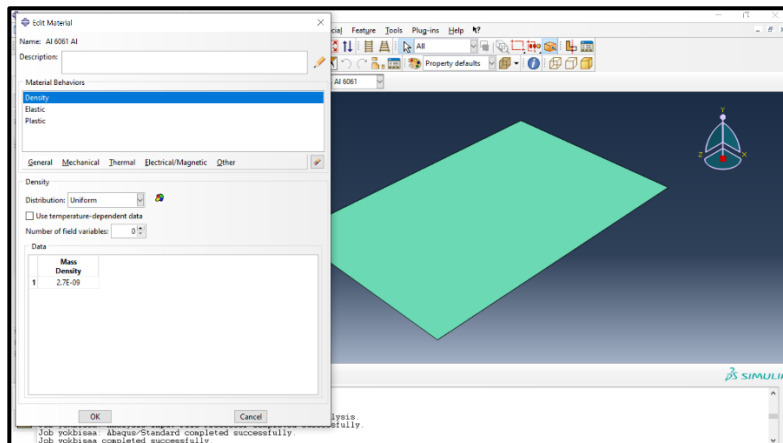
Gambar 21. Model supporting

c. Penentuan material

Pada percobaan ini menggunakan material Aluminium 6061 T6. 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

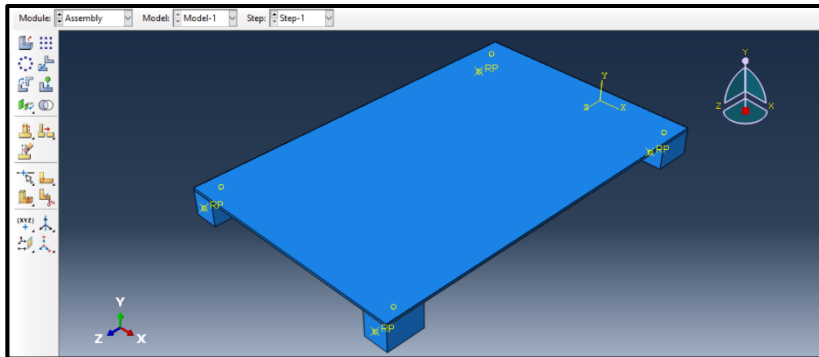


Gambar 22. Menu Material

d. Assembly

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

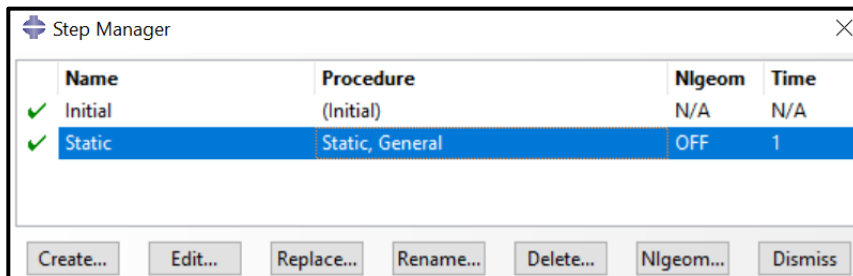
Module: *assembly* → klik dua kali pada opsi *Instances* → klik ok



Gambar 23. Part plat dan tumpuan yang digabungkan

e. Step

Tahapan selanjutnya pada menu step sebagai berikut: *Step Manager: Creat* → *Step 1* → *static, general*

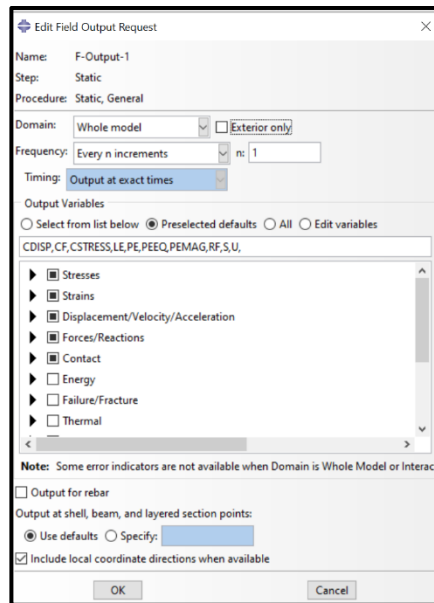


Gambar 24. Menu *Step Manager*

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

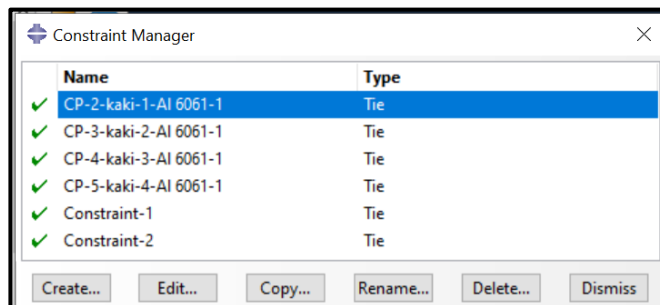


Gambar 25. Menu *Field Output*

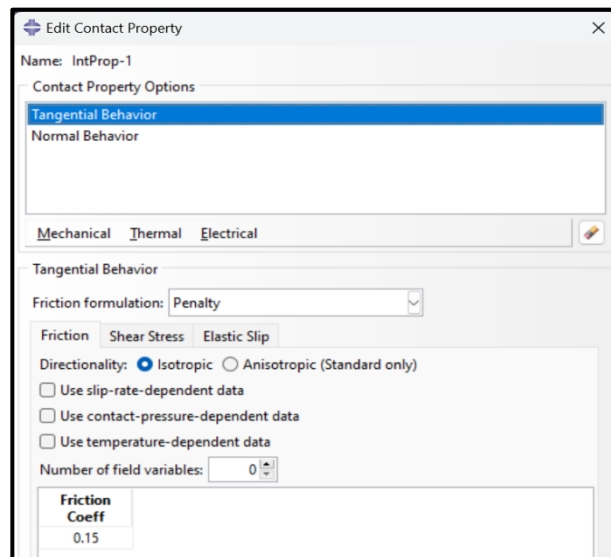
g. Interaction

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

Module: *Interaction* → *Constrain manager* → *Type, Tie*



Gambar 26. Tampilan *Interaction*

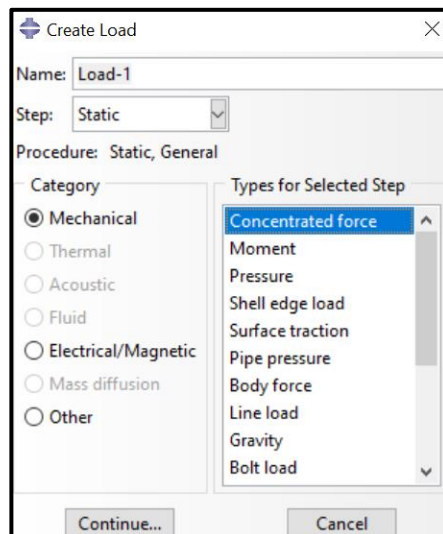


Gambar 27. Contact Property


h. Load

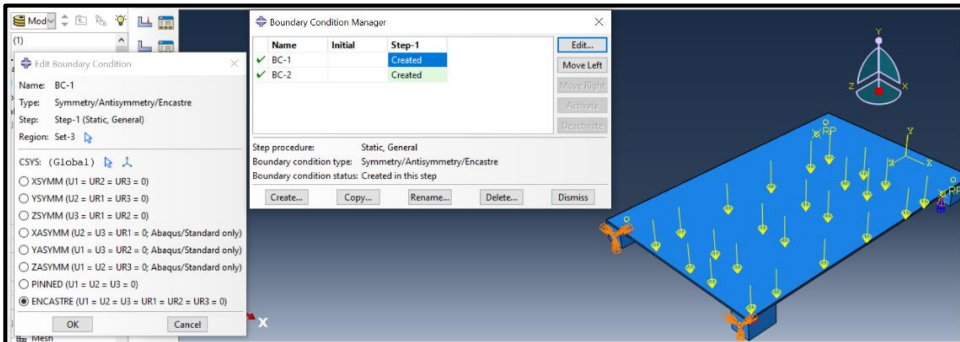
Pada tahap ini kita akan memberikan beberapa beban yang akan digunakan pada *part* dengan langkah berikut :

Module: Load →  → Konfigurasi seperti pada Gambar 25.



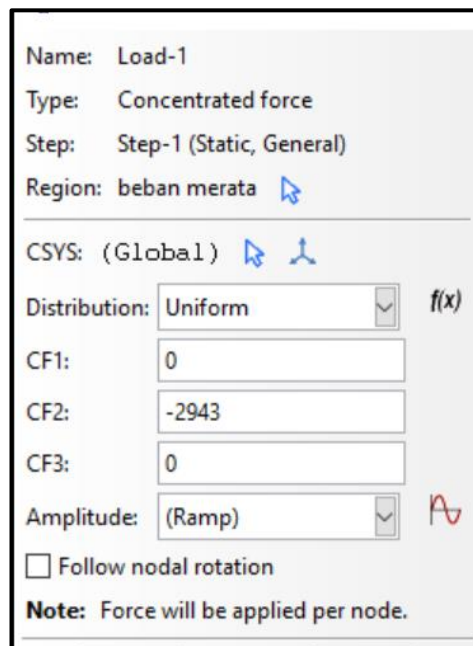
Gambar 28. Menu *create load*

Module: Load →  → Konfigurasi seperti pada Gambar 29



Gambar 29. Tampilan *Boundary Condition*


Module: Load →  → Konfigurasi seperti pada Gambar 30

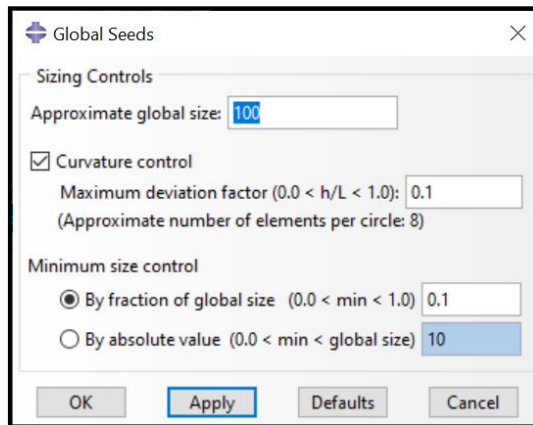


Gambar 30. Tampilan *Load*


i. *Meshing*

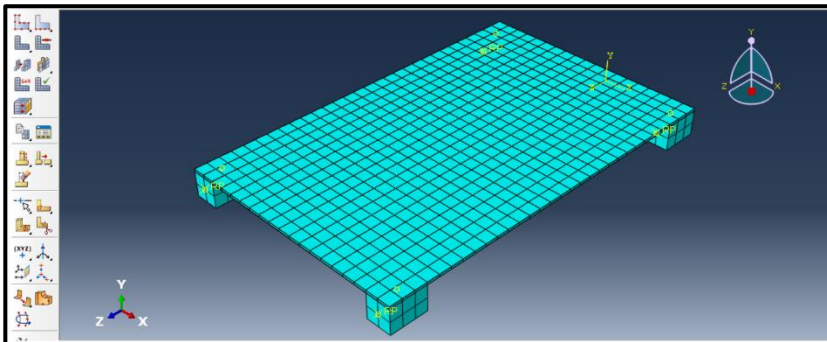
Tahapan selanjutnya yang perlu dilakukan yaitu membuat *mesh* atau biasa juga dikenal dengan istilah *meshing* pada semua part dalam simulasi.

Adapun pada *Abaqus* CAE dibuat dengan tahapan: *Module*  (*mesh*)
 → pilih *part* yang akan dilakukan perlakuan → *seed part* →
 konfigurasi sesuai dengan gambar, berikut.




Gambar 31. Tampilan *global seeds* pada *Abaqus* CAE

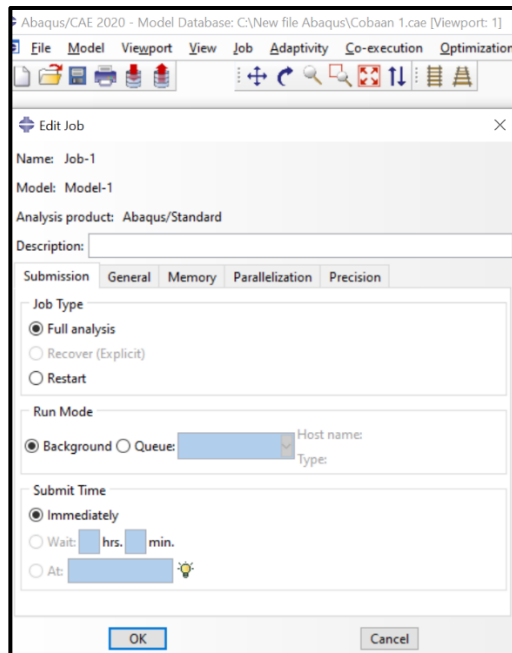
Module: Mesh →  → Ok.



Gambar 32. Tampilan *sandwich mesh*

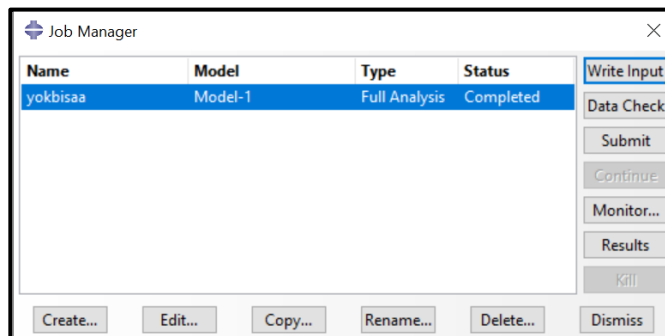
j. **Job**

Module:  *Job* → *Create job* → konfigurasi sesuai dengan Gambar 33. Tampilan panel *job* pada *Abaqus* CAE



Gambar 33. Tampilan panel *job* Abaqus CAE

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



Gambar 34. Tampilan panel *job manager*

Setelah Job berhasil dibuat, klik result pada Gambar 34, untuk melihat hasil simulasi.