

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

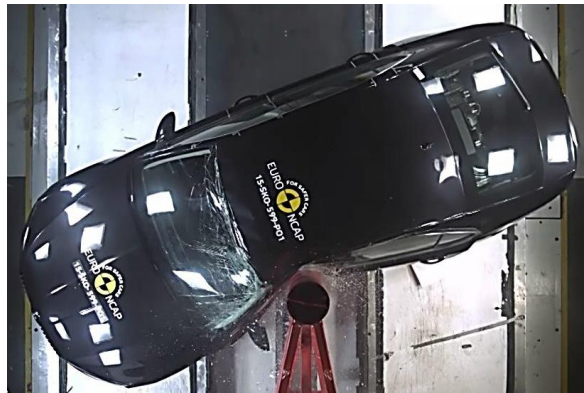
Pada era saat ini, kebutuhan terhadap transportasi semakin meningkat tiap tahunnya, baik itu kendaraan roda dua maupun kendaraan roda empat. Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang cepat membuat produsen kendaraan, terutama dalam jenis mobil, berlomba-lomba menciptakan produk baru yang canggih,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

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. 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). 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. 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.

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. Sementara riset di bidang mobil motor bakar sangat pesat perkembangannya ditandai dengan banyaknya industri yang lahir di bidang mobil motor bakar. Sehingga tidak dapat dipungkiri, teknologi mobil motor bakar saat ini sangat tinggi karena sudah berkembang selama seratus tahun lebih. Namun tetap saja mobil motor bakar memiliki masalah di bidang energi dan lingkungan yang dampaknya pelan tapi terus meningkat.

Menurut World Health Organization (WHO), 80% mobil yang terjual di seluruh dunia (mayoritas di negara berkembang) tidak memenuhi standar keselamatan utama dan hanya ada 40 negara yang menerapkan secara utuh 7 (tujuh) aturan terpenting dalam keselamatan berkendara (Sauber-Schatz, 2020). Tujuh aturan ini meliputi: (1) mobil mampu menahan benturan dari depan maupun samping, (2) control kestabilan elektronik, (3) fasilitas pengamanan untuk pejalan kaki, (4) penggunaan sabuk pengaman, (5) standar keamanan penumpang anak-anak, (6) perangkat anti-lock braking system (ABS), dan (7) menyalakan lampu di siang hari bagi kendaraan roda dua. Berkaitan dengan aturan tersebut, penelitian ini berfokus pada aturan pertama, yaitu

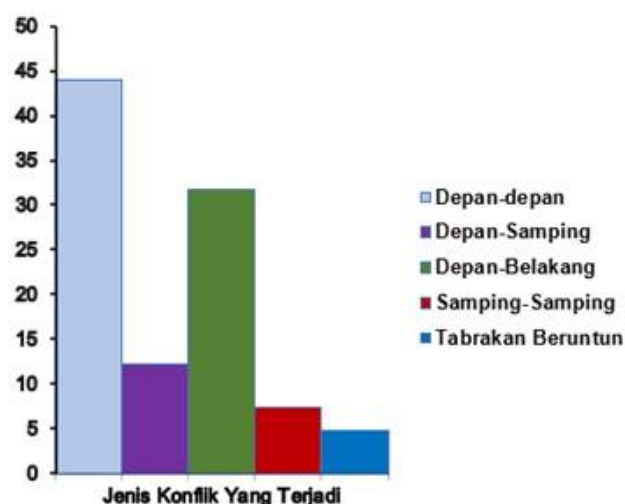
standar pada benturan depan dan samping untuk melindungi penumpang dan memastikan bahwa mobil tahan terhadap benturan dari arah depan atau samping saat diuji pada kecepatan tertentu.



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

Mobilitas berkelanjutan telah menjadi fokus utama disektor transportasi darat. Mobil listrik telah menjadi solusi yang menjanjikan untuk mengatasi isu terkait energi dan lingkungan. Namun, dengan munculnya mobil listrik, juga timbul kekhawatiran terkait keamanan dan keselamatan pengguna.

Di Indonesia tercatat jumlah kecelakaan pada tahun 2022 mulai 1 Januari - 31 Desember yakni sebanyak 25.138 laka. Dengan jenis kecelakaan tertinggi tabrakan depan dilanjutkan tabrakan samping, jumlahnya mencapai 3.503 laka. 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.



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. 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. Oleh karena itu, dibutuhkan komponen keselamatan yang dapat melindungi dari sisi samping.

Salah satu aspek krusial dalam keselamatan kendaraan adalah kekuatan serap energi ketika terjadi benturan atau tumbukan di bagian pintu. Pentingnya peningkatan material komposit pelindung pada komponen bawah pintu mobil listrik menjadi pondasi utama peneliti dalam mendesain dan membentuk struktur yang dapat melindungi dan mengurangi benturan yang akan terjadi pada pengemudi, penumpang dan baterai. Disisi lain struktur pelindung ini dapat dijadikan sebagai pijakan kaki (*foot step*). Keunggulan dari struktur pelindung ini berdasarkan sifat mekaniknya, seperti kekakuan dan kekuatan spesifik yang tinggi, menjadikannya pilihan utama dalam pengembangan struktur pelindung.

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 dan anova. zulfish sarah (2022).

Meskipun demikian, untuk memenuhi tuntutan kekuatan yang diinginkan dalam aplikasi tertentu, komposit Aluminium foam dengan karakteristik ringan, kekuatan tinggi, ketahanan terhadap korosi, dan kemampuan menyerap energi yang unik, memberikan dimensi baru pada struktur material pelindung. Pengisian inti komposit sandwich dengan aluminium foam dapat meningkatkan kemampuan penyerapan energi dan menstabilkan kurva struktur, menciptakan kombinasi material yang optimal. (Renreng., dkk. 2020). Di sisi lain di penelitian (Z. Ahmad dkk.2009) menyoroti keuntungan menggunakan tabung kerucut berisi busa sebagai penyerap energi. Hasil juga menunjukkan bahwa kinerja penghancuran dan penyerapan energi tabung kerucut ditingkatkan secara signifikan dengan pengisian busa. Hasil utama dari penelitian ini adalah informasi penelitian baru dan pengembangan hubungan empiris yang akan memfasilitasi desain tabung kerucut berisi busa sebagai penyerap energi dalam aplikasi benturan.

Berdasarkan uraian di atas, diperlukan penelitian lebih mendalam mengenai struktur pelindung dengan variasi bentuk dan pengisian foam. Hal ini bertujuan untuk

memahami perilaku lentur material pelindung aluminium foam. Metode pengujian beban lentur tiga titik akan diaplikasikan menggunakan software metode Elemen Hingga untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam terkait sifat mekaniknya, mengevaluasi respon struktur pada kendaraan listrik dengan divalidasi menggunakan metode ANOVA. 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 menganalisis kekuatan lentur variasi Penampang di bawah beban lentur tiga titik?
2. Bagaimana memvalidasi hasil simulasi dengan membandingkan pengujian secara eksperimen?
3. Bagaimana menerapkan nilai optimum penyerapan energi dengan menggunakan metode ANOVA (Analysis of variance)?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini ialah:

1. Menganalisis kekuatan lentur variasi Penampang di bawah beban lentur tiga titik
2. Memvalidasi hasil simulasi dengan membandingkan pengujian secara eksperimen
3. Menerapkan nilai optimum penyerapan energi dengan menggunakan metode ANOVA (Analysis of variance)

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 Magister Teknik, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
2. Bagi pembaca, dapat mengetahui pengaruh perilaku lentur penampang pelindung berbahan komposit aluminium foam berdasarkan hasil permodelan metode elemen hingga (Finite Element Method) menggunakan software Abaqus CAE.
3. Bagi universitas, dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya.

1.5. Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini adalah mendesain komponen penampang yang kuat dengan mengkaji karakteristik material aluminium dan foam. Mengevaluasi respon struktur dengan simulasi dan eksperimen terhadap uji lentur tiga titik serta menentukan pengaruhnya menggunakan metode ANOVA (Analysis of variance).

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penampang Pelindung

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 ramah lingkungan jika dibandingkan dengan mobil konvensional. Beberapa tahun ini mobil listrik tengah populer di kalangan 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 kejutan serta perlindungan terhadap air. (unece.org)

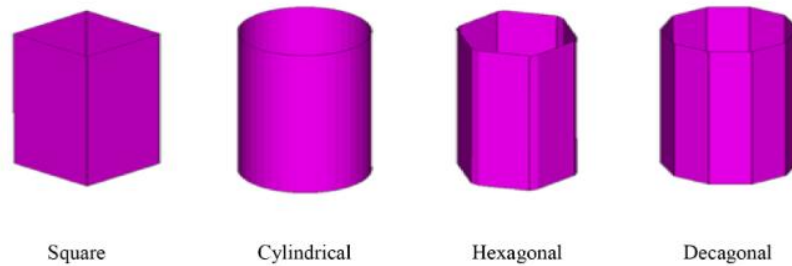
Dalam kecelakaan kecepatan rendah, kerusakan pada struktur samping mobil sering terjadi. Peran struktur side mobil adalah untuk menghalangi baterai dan pemampang dari benturan ke rangka kendaraan dengan menyerap energi benturan. Untuk memaksimalkan energi yang diserap oleh struktur penampang pelindung dipasang di sisi samping bawah pintu kendaraan untuk menyerap energi tabrakan. Bentuk penampang dan material penampang pelindung sangat mempengaruhi penyerapan energi saat terjadi tumbukan.



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

Penampang pelindung merupakan komponen pengamanan tambahan yang terbuat dari aluminium berbentuk *semi circulars* yang terisi busa, terletak di bagian bawah pintu

pada kendaraan mobil listrik. Penampang pelindung ini berfungsi sebagai pelindung benturan atau tumbukan dari samping dan dapat dijadikan sebagai pijakan kaki saat keluar maupun masuk kendaraan. Disisi lainnya, pemilihan bentuk penampang di pengaruhi oleh beberapa faktor yaitu struktur geometri, material penyusun dan jenis pembeban. Terlihat pada gambar di bawah terdapat bentuk bentuk penampang.



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*).

2.2. 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)

2.3. 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.

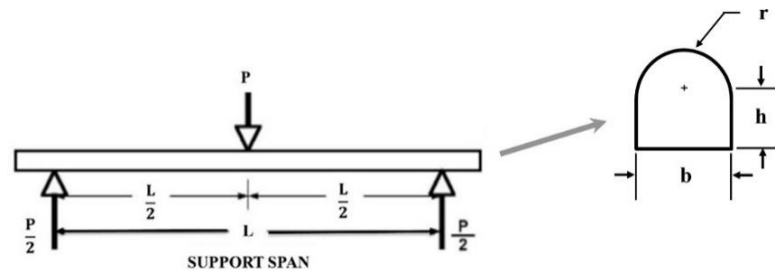
$$\sigma_V = \sqrt{\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] + 6[\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2]} \quad (3)$$

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*)

2.4. Uji Lentur Tiga Titik

Alat uji lentur tiga titik adalah alat yang digunakan untuk melakukan pengujian kekuatan lengkung pada suatu bahan atau material. Pada umumnya alat uji bending memiliki beberapa bagian utama, seperti: rangka, alat tekan, titik bending dan alat ukur. Rangka berfungsi sebagai penahan gaya balik yang terjadi pada saat melakukan uji bending. Rangka harus memiliki kekuatan lebih besar dari kekuatan alat tekan, agar tidak terjadi kerusakan pada rangka pada saat melakukan pengujian. Alat tekan berfungsi sebagai alat yang memberikan gaya tekan pada benda uji pada saat melakukan pengujian. Alat penekan harus memiliki kekuatan lebih besar dari benda yang di uji. Titik bending berfungsi sebagai tumpuan benda uji dan juga sebagai penerus gaya tekan yang dikeluarkan oleh alat tekan. Panjang pendek tumpuan titik lengkung berpengaruh terhadap hasil pengujian. Alat ukur adalah suatu alat yang yang menunjukkan besarnya kekuatan tekan yang terjadi pada benda uji.

Pada pengujian lentur tiga titik, permukaan atas spesimen berlaku proses tekan dan permukaan bawah berlaku proses tarik. Sehingga kegagalan yang terjadi yaitu patah permukaan dikarenakan tidak mampu menahan beban yang diberikan. Three point bending adalah proses pengujian dengan dua titik tumpu dibagian alas dan satu titik penekanan dibagian atas.



Gambar 5 Skema uji lentur tiga titik (ASTM D 7264: 2)

Momen inersia material penampang tersebut dapat ditemukan menggunakan persamaan berikut:

$$I = \frac{bh^3}{12} + \frac{\pi r^4}{4} \quad (4)$$

Momen yang berlaku pada balok dan circular spesimen mampu dicari menggunakan persamaan:

$$M = \frac{1}{2} \cdot P \cdot \frac{1}{2} \cdot L + \frac{1}{2} \cdot P \cdot \frac{1}{2} \cdot L \quad (5)$$

$$M = \frac{1}{4} \cdot P \cdot L + \frac{1}{4} \cdot P \cdot L \quad (6)$$

Nilai tegangan bending maksimal pada spesimen berbentuk balok yang ditumpu oleh dua titik dan diberikan pembebanan pada titik tengahnya mampu dicari menggunakan formula berikut:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{\frac{1}{4}PL + \frac{1}{4}PL \times \frac{h}{2} + r}{\frac{bh^3}{12} + \frac{\pi r^4}{4}} \quad (8)$$

$$\sigma_{maks} = \frac{3PL}{2bh^2} + \frac{PL}{\pi r^3} \quad (9)$$

Keterangan rumus:

Dimana:

σ_{maks} = Tegangan bending maksimal (MPa)

M = Momen (N.m)

P = Beban yang bekerja (N)

L = Jarak antar titik tumpu (mm)

b = Lebar spesimen (mm)

h = Tebal spesimen (mm)

r = Jari-jari (mm)

2.5. Aluminium Busa (Foam)

Aluminium busa (*aluminum foam*) adalah bahan dengan struktur berpori, ringan dengan sifat fisik yang unggul dan berkinerja sangat baik di berbagai bidang seperti penyerapan energi, bantalan dan pelindung ledakan juga sebagai pengisi dalam

meningkatkan stabilitas dari kekakuan tabung tunggal. Sedangkan untuk aplikasi aluminum foam digunakan sebagai desain perlindungan tabrakan kendaraan. Salah satu contoh penerapan penggunaan aluminium foam yaitu tabung auxetic berisi busa (foam) berfungsi sebagai sistem bumper, melindungi kontak crash pada bodi mobil dan melindungi pejalan kaki. (Ru yuanhuo, 2023) *Aluminum foam* terbagi ke dalam 2 kategori berdasarkan jenis porinya, yaitu:

2.5.1. Foam Berpori Sel Tertutup

Pori-pori pada tipe ini saling tidak bersentuhan dan terisolasi oleh permukaan logam. *Foam* jenis ini banyak digunakan sebagai komponen penyerap benturan seperti halnya dengan busa polimer pada helm sepeda, hanya saja *metal foam* dapat menerima benturan yang lebih besar. Tidak seperti busa polimer yang memiliki sifat elastis, *metal foam* tidak elastis dan tetap dalam kondisi deformasinya setelah menerima benturan.



Gambar 6 *Foam* berpori sel tertutup

Meskipun begitu, *metal foam* memiliki bobot yang ringan sehingga sangat cocok dijadikan komponen penyusun struktur ringan. Gambar 6 memperlihatkan bentuk permukaan *metal foam* yang berpori-sel tertutup.

2.5.2. Foam Berpori Sel Terbuka

Berbeda dengan *foam* berpori-sel tertutup, pori pada *foam* ini saling berhubungan sehingga memungkinkan adanya aliran yang melewati pori-pori tersebut. *Foam* jenis ini dapat diaplikasikan pada sistem perpindahan kalor, seperti pendingin komponen elektronik, tangki kriogenik, dan penukar kalor PCM, juga pada sistem penyerapan energi kalor, dan difusi suatu aliran. Untuk ukuran pori yang lebih kecil (tidak kasat mata), *foam* ini dapat digunakan dalam aplikasi filter temperatur tinggi pada industri kimia. Secara umum, *foam* ini digunakan pada aplikasi perpindahan kalor. Gambar 7 di bawah memperlihatkan bentuk struktur pori terbuka pada *metal Aluminum foam* umumnya mempertahankan beberapa sifat fisik dari bahan dasarnya. Secara umum, karakteristik *aluminum foam*, seperti kekakuan, densitas, dan ketangguhan, juga terdapat pada material-material lain. Namun keunggulan dari *metal foam* secara khusus adalah kombinasi dari karakteristik material tersebut yang tidak dapat dimiliki oleh material lain. *Aluminum foam* memiliki sifat:

- a) Kekuatan (10 MPa) dan kekakuan (1 GPa) struktur yang cukup tinggi.
- b) Densitas yang rendah, yaitu sekitar 1/5 dari aluminium padatan.
- c) Kemampuan penyerapan energi mekanik, panas, dan getaran yang besar.



Gambar 7 Foam berpori sel terbuka

2.6. Metode Elemen Hingga

2.6.1. 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 kontinum.

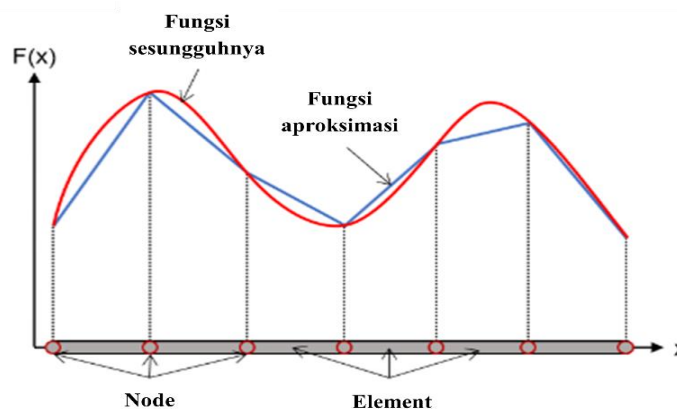
Susatio (2004) menyatakan bahwa metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis. Tipe masalah teknis dan matematika yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisis struktur 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 kehampir 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.

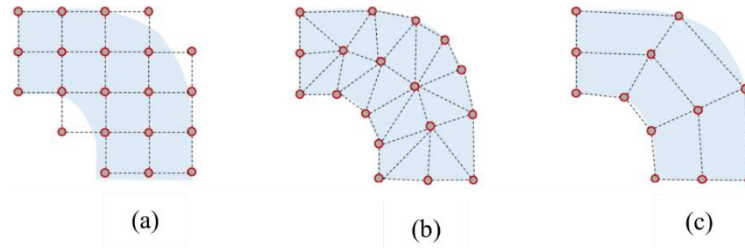


Gambar 8 Aproksimasi solusi keseluruhan diperoleh dari penggabungan solusi-solusi elemen (Jahuddin, 2019)

2.6.2. 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 9 (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 $\{u\}$.

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

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

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

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

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

2.7. 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.

2.7.1. 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

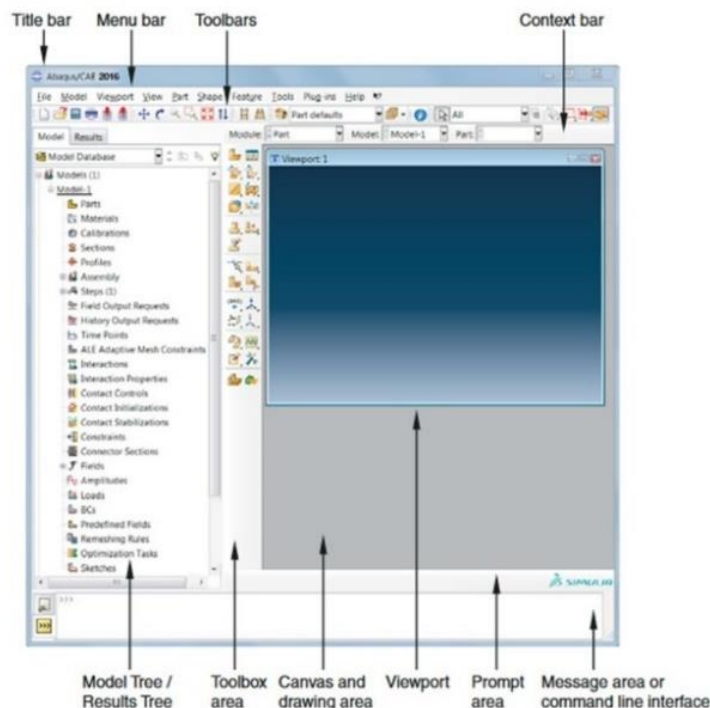
Merupakan jendela pada area gambar di mana Abaqus menampilkan model yang telah dibuat.

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 10 Tampilan main windows pada Abaqus (user'sguide,CAE 2016)

2.7.2. 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.

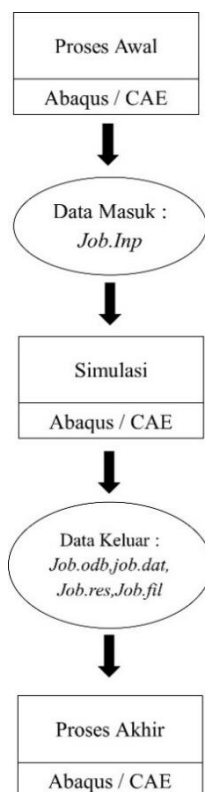
2. Simulasi (*Processing*)

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 11 Tahapan menjalankan program Abaqus (*Fauzan 2022*)

2.8. Analysis of Variance

Analisis varian atau yang biasa disebut dengan ANOVA (Analysis of Variance) adalah salah satu teknik analisis statistik yang pertama kali dikembangkan oleh Sir Ronald A. Fisher (Setiawan, 2019). ANOVA adalah prosedur yang digunakan untuk uji

perbandingan rata-rata antara beberapa kelompok data. ANOVA merupakan perluasan dari uji t sehingga bisa digunakan untuk menguji perbedaan tiga buah rata-rata populasi atau lebih sekaligus. Teknik analisis ini bertujuan mengetahui perbedaan skor suatu variabel y (variabel terikat/dependent variable) yang disebabkan oleh perbedaan skor pada setiap variabel x (variabel bebas/independent variable).

Ada beberapa prasyarat yang harus dipenuhi bila melakukan analisis varian antara lain pengambilan sampel diambil secara random dari populasi, dan data yang diambil adalah data skala interval atau rasio, data harus memenuhi syarat berdistribusi normal, dan data dalam variabel yang akan dilakukan analisis harus berkarakteristik homogen. Maka uji normalitas dan uji homogenitas data harus terpenuhi sebelum dilakukan analisis uji t. Apabila hasil perhitungan uji t berbeda mean F hitung yang diperoleh berharga negatif, maka angka absolutnya yang digunakan, sedangkan tanda negatifnya diabaikan (Ardana, 1982). Secara detail kriteria data yang dapat diuji dengan menggunakan analisis varian yaitu:

1. Data dari variabel faktor (variabel independen) harus integer (data kategori) dan variabel dependen harus data kuantitatif (skala interval dan rasio).
2. Data harus saling bebas berasal dari sampel acak dan berdistribusi normal.
3. Varian dari sampel-sampel tersebut berkarakteristik homogen.
4. Data sampel tidak berhubungan satu dengan data yang lain.
5. Untuk kasus tertentu analisis varian dapat digunakan dalam penelitian yang bersifat eksperimen.

Analisis varian digunakan untuk menguji hipotesis nol tentang perbedaan dua buah rata-rata atau lebih yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_K \quad (14)$$

H_1 : tidak semua populasi memiliki rata-rata hitung (mean) sama

Dalam uji analisis varian, bukti sampel diambil dari setiap populasi yang sedang dikaji dan digunakan untuk statistik sampel. Distribusi sampling yang digunakan untuk mengambil keputusan statistiknya adalah menolak atau menerima hipotesis nol (H_0) adalah distribusi F (F Distribution). Analisis varian lebih akurat digunakan untuk sejumlah sampel yang sama pada setiap kelompoknya.