

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini, akan dijabarkan mengenai dasar teori yang menjadi acuan penelitian yang dilaksanakan. Bab ini mencakup berbagai kajian mengenai *bracket* kaca tahan peluru, standar uji tembak yang digunakan, kriteria pemilihan material, pembebanan *bracket* kaca tahan peluru, kekuatan *bracket* kaca tahan peluru, pengukuran tegangan *bracket* kaca tahan peluru, prinsip dasar *finite element analysis* (FEA), serta tahapan simulasi *finite element analysis* (FEA).

2.1 Bracket Kaca Tahan Peluru

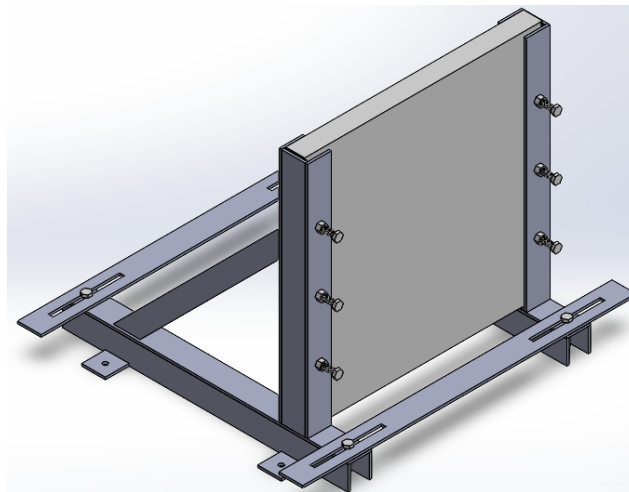
Bracket kaca tahan peluru merupakan komponen yang penting dalam industri pertahanan, terutama dalam aplikasi kaca tahan peluru. *Bracket* yang dirancang harus mempertimbangkan kekuatan dan ketahanan terhadap gaya yang dihasilkan.

2.1.1 Definisi dan Fungsi Bracket

Secara umum, definisi *bracket* merupakan sebuah komponen mekanis yang digunakan untuk menyangga, menstabilkan, menyambungkan komponen lain pada sebuah struktur (Anguek and Bounab, 2022). Dalam berbagai aplikasi di bidang industri, konstruksi, rumah tangga, otomotif, *bracket* memiliki fungsi penting, terutama pada konteks untuk industri pertahanan. *Bracket* dapat dirancang dengan berbagai bentuk dan material sesuai dengan kebutuhan fungsionalnya masing-masing.

2.1.2 *Bracket* Kaca Tahan Peluru Untuk Uji Tembak

Bracket kaca tahan peluru dalam uji tembak memiliki peranan penting untuk memastikan kesetabilan dan ketepatan selama pengujian. Fungsi utama *bracket* adalah untuk menahan atau menyangga kaca tahan peluru pada posisi yang tepat selama proses uji tembak (Anguek and Bounab, 2022). Hal ini untuk memastikan pengujian berjalan dengan tepat, akurat, dan aman. *Bracket* dirancang seperti pada Gambar 2.1 dengan mengutamakan aspek kekuatan dan ketahanan.



Gambar 2.1 Contoh *Bracket* Kaca Tahan Peluru Untuk Uji Tembak

2.2 Standar Uji Tembak yang Digunakan

Standar *National Institute of Justice* (NIJ) 0108.01 merupakan standar yang paling umum digunakan dalam pengujian bahan tahan peluru, termasuk kaca tahan peluru. Standar ini digunakan untuk menilai kemampuan kaca untuk menahan tembakan dengan berbagai jenis amunisi dan kondisi. Tujuan utama dari standar ini adalah untuk memastikan bahan pelindung balistik dapat memberikan perlindungan

yang efektif terhadap ancaman yang dapat terjadi dalam situasi dan kondisi yang berbahaya, baik di sektor militer, keamanan publik, maupun sektor lainnya yang membutuhkan perlindungan terhadap ancaman (National Institute of Justice, 1985).

Tabel 2. 1 Standar NIJ (*National Institute of Justice*) 0108.01

<i>Armor Type</i>	<i>Test Ammunition</i>	<i>Nominal Bullet Mass</i>	<i>Suggested Barrel Length</i>	<i>Required Bullet Velocity</i>	<i>Required Hits Per Armor Specimen</i>
1	22 LRHV	2.6 g	15 to 16.5 cm	320 ± 12 m/s	5
	Lead	40 gr	6 to 6.5 in	1050 ± 40 ft/s	
	38 Special	10.2 g	15 to 16.5 cm	259 ± 15 m/s	5
	RN Lead	158 gr	6 to 6.5 in	850 ± 50 ft/s	
II-A	357 Magnum	10.2 g	10 to 12 cm	381 ± 15 m/s	5
	JSP	158 gr	4 to 4.75 in	1250 ± 50 ft/s	
	9 mm	8.0	10 to 12 cm	332 ± 12 m/s	5
	FMJ	124 gr	4 to 4.75 in	1090 ± 40 ft/s	
II	357 Magnum	10.2 g	15 to 16.5 cm	425 ± 15 m/s	5
	JSP	158 gr	6 to 6.5 in	1395 ± 50 ft/s	
	9 mm	8.0	10 to 12 cm	358 ± 12 m/s	5
	FMJ	124 gr	4 to 4.75 in	1175 ± 40 ft/s	
III-A	44 Magnum	15.55 g	14 to 16 cm	426 ± 15 m/s	5
	Lead SWC	240 gr	5.5 to 6.25 in	1400 ± 50 ft/s	
	Gas Checked				
	9 mm	8.0 g	24 to 26 cm	426 ± 15 m/s	5
III	FMJ	124 gr	9.5 to 10.25 in	1400 ± 50 ft/s	
	7.26 mm	9.7 g	56 cm	838 ± 15 m/s	5
	308 Winchester	150 gr	22 in	2750 ± 50 ft/s	
	FMJ				
IV	30-06	10.8 g	56 cm	868 ± 15 m/s	1
	AP	166 gr	22 in	2850 ± 50 ft/s	

Abbreviations: AP – Armor Piercing

FMJ – Full Metal Jacket

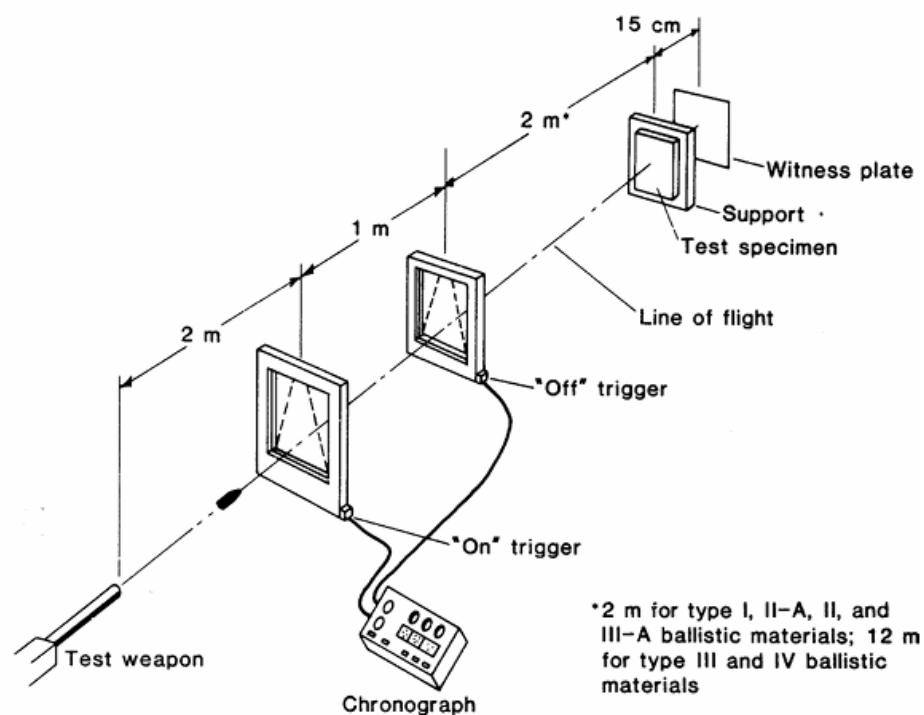
JSP – Jacketed Soft Point

LRHV – Long Riffle High Velocity

SWC – Semi Wadcutter

Sumber: (National Institute of Justice, 1985).

Standar ini dikembangkan oleh *National Institute of Justice* (NIJ), sebuah lembaga penelitian resmi yang berfokus pada penelitian dan pengembangan teknologi untuk mendukung penegakan hukum dan keadilan di Amerika Serikat. Standar ini pertama kali diterbitkan pada tahun 1985 dan hingga kini tetap menjadi acuan utama dalam beberapa jenis pengujian.



Gambar 2.2 Setup Pengujian Tembak

Sumber : Standar NIJ 0108.01.

Dalam implementasinya, NIJ 0108.01 mencakup serangkaian prosedur dan persyaratan teknis yang sangat ketat, mulai dari spesifikasi jenis dan kaliber amunisi yang digunakan dalam uji coba, kecepatan tembakan, jarak tembakan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, hingga sudut penembakan. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa material pelindung tidak hanya mampu menghentikan proyektil,

tetapi juga tidak menyebabkan cedera serius akibat deformasi atau pecahan balik. Seperti pada Tabel 2. 1, standar ini mengelompokkan tingkat perlindungan ke dalam beberapa level, yang masing-masing merepresentasikan kemampuan kaca untuk menahan tembakan dari kaliber tertentu dengan energi kinetik yang berbeda-beda.

2.3 Kriteria Perancangan Desain

Dalam proses perancangan dan manufaktur, terdapat sejumlah kriteria yang harus dipertimbangkan untuk memperoleh hasil yang optimal, baik dari segi fungsi, kekuatan, efisiensi biaya, hingga keberlanjutan. Kriteria ini menjadi dasar dalam pengambilan keputusan terkait desain produk, pemilihan material, proses produksi, dan aspek penggunaannya. Pemilihan kriteria ini didasarkan pada referensi dari (Atmanto *et al.*, 2014) serta hasil diskusi dengan perusahaan. Secara umum, kriteria perancangan dibagi ke dalam dua kategori utama, yaitu kriteria *musts* dan kriteria *wants*, dengan penjelasan sebagai berikut :

2.3.1 Kriteria *Musts*

Dalam setiap proses perancangan produk, terdapat sejumlah kriteria yang bersifat wajib dan tidak dapat ditawar. Kriteria ini dikenal sebagai *musts*, yaitu syarat-syarat minimum yang harus dipenuhi agar produk dapat dikatakan layak secara fungsional, aman, dan dapat diproduksi secara efisien. Kegagalan dalam memenuhi salah satu saja dari kriteria ini dapat menyebabkan produk tidak dapat digunakan, menambah biaya, atau bahkan gagal total dalam impleentasinya. Oleh karena itu penetapan dan pemenuhan kriteria *musts* menjadi landasan utama dalam proses desain yang secara profesional. Adapun rincian kriteria *musts* sebagai berikut:

1. Ketahanan terhadap beban

Produk harus mampu menahan beban kerja yang direncanakan, baik beban statis maupun dinamis, tanpa mengalami deformasi atau kegagalan material. Analisis tegangan dan faktor keamanan harus memperlihatkan hasil yang berada dalam batas aman dari karakteristik material yang digunakan.

2. Ketersediaan material dan komponen

Material dan komponen yang digunakan harus tersedia di pasaran. Hal ini penting untuk menjamin kelancaran proses produksi serta kemudahan perawatan atau pergantian komponen di masa depan.

3. Kemampuan dibongkar pasang

Produk harus dirancang agar dapat dibongkar dan pasang kembali dengan mudah untuk mempermudah perawatan dan perbaikan. Sistem sambungan dan perakitan harus mempertimbangkan efisiensi waktu dan kemudahan teknis.

4. Kemudahan manufaktur dan perawatan

Produk yang dirancang agar proses produksinya dapat dilakukan dengan alat dan metode yang tersedia, terutama jika produksi dilakukan oleh industri kecil-menengah. Selain itu, desain harus memudahkan perawatan secara berkala untuk memperpanjang usia pakai produk.

5. Ketahanan lingkungan

Produk harus mampu beroperasi dalam berbagai kondisi lingkungan, seperti kelembaban tinggi, paparan sinar matahari, suhu ekstrem, atau lingkungan korosif. Guna untuk memperpanjang usia pakai produk.

6. Portabel

Produk diupayakan memiliki desain yang memungkinkan mobilitas atau perpindahan dengan mudah, terutama jika penggunaannya berpindah-pindah lokasi. Portabilitas ini juga berkaitan dengan bobot kemudahan dalam proses instalasi atau transportasi.

2.3.2 Kriteria *Wants*

Kriteria *wants* merupakan elemen-elemen tambahan dalam proses perancangan produk yang bersifat tidak wajib, tetapi akan sangat meningkatkan nilai, efisiensi, dan keamanan dari produk apabila berhasil dicapai. Berbeda dengan kriteria *musts* yang bersifat minimum dan wajib dipenuhi, kriteria *wants* hanya akan diupayakan selama kondisi teknis dan sumber daya memungkinkan. Adapun rincian kriteria *wants* sebagai berikut :

1. Biaya manufaktur dan perawatan murah

Meskipun efisiensi biaya sudah menjadi pertimbangan umum, produk yang dapat diproduksi dan dirawat dengan biaya lebih rendah akan lebih kompetitif, terutama dalam konteks industri kecil dan pasar lokal.

2. Perakitan dan pengoperasian mudah

Desain produk diupayakan agar dapat dirakit dengan sedikit komponen dan alat bantu. Selain itu, pengoperasian produk harus mudah dipahami dan dilakukan, bahkan oleh pengguna awam.

3. Perawatan dan perbaikan mudah

Komponen produk dirancang agar dapat diganti atau diperbaiki dengan mudah tanpa perlu membongkar seluruh bagian produk. Hal ini mendukung efisiensi waktu dan biaya selama masa operasional produk.

4. Memiliki bobot ringan

Produk dengan bobot ringan memudahkan mobilitas dan pemasangan, serta menurunkan biaya logistik. Upaya ini dapat dilakukan dengan pemilihan material ringan dan desain struktur yang efisien secara geometris.

2.4 Pembebanan *Bracket Kaca Tahan Peluru*

Beban yang diletakkan pada suatu area disebut pembebanan. Pembebanan secara kategori area beban terbagi menjadi dua, yaitu pembebanan merata dan terpusat. Pembebanan merata merupakan pembebanan yang terjadi pada seluruh atau bagian penampang, sedangkan pembebanan terpusat merupakan pembebanan yang terjadi pada satu atau beberapa titik pada bagian penampang (Material and Energi, 2023). Dalam hal ini, pembebanan dibagi menjadi dua, yaitu sebagai berikut :

2.4.1 Pembebanan Dinamis

Pembebanan dinamis merupakan suatu beban yang bekerja secara tiba-tiba dan memiliki perubahan intensitas yang bervariasi secara tepat terhadap waktu. Beban ini biasanya terjadi tidak tetap (*unsteady state*), memiliki besaran dan arah yang berubah dengan cepat, dan deformasi yang disebabkan oleh beban dinamis ini akan berubah dengan cepat (Hai *et al.*, 2024). Pembebanan dinamis yang terjadi pada *bracket* berasal dari gaya yang dihasilkan dari tembakan peluru yang mengenai kaca tahan peluru.

2.4.2 Pembebanan Statis

Pembebanan statis merupakan suatu beban yang bekerja secara tetap atau akan berubah sangat perlahan seiring dengan waktu. Beban ini tidak mengakibatkan percepatan struktur yang signifikan dan terjadi secara tetap (*steady state*), serta deformasi yang disebabkan oleh beban statis ini akan berubah sangat perlahan (Ghazali, Haryanto and Kurdi, 2023). Artinya terjadi dalam waktu yang cukup lama. Pembebanan statis yang terjadi pada *bracket* ini berasal dari massa kaca tahan peluru.

2.5 Kekuatan *Bracket* Kaca Tahan Peluru

Kekuatan *bracket* kaca tahan peluru merupakan kemampuan *bracket* atau penopang yang digunakan untuk menahan kaca tahan peluru agar aman dan tidak terjadi kerusakan akibat tekanan atau benturan, seperti tembakan. Pengukuran pada *bracket* kaca tahan peluru menggunakan simulasi numerik pada perangkat lunak numerik dengan sistem FEA (*Finite Element Analysis*) memberikan gambaran ketahanan material yang digunakan untuk membuat *bracket* kaca tahan peluru.

2.5.1 *Stress* (Tegangan)

Stress atau tegangan merupakan gaya per satuan luas yang bekerja pada suatu benda atau material dan sangat penting dalam analisis struktur. Dalam dunia teknik, tegangan biasanya dihitung berdasarkan gaya yang bekerja pada suatu benda atau luas penampang yang menahan gaya tersebut. Tergantung dari jenis beban yang diterapkan, gaya tersebut dapat berupa tarik, tekan, atau geser (Khurmi and Gupta, 2005).

Satuan yang digunakan dalam tegangan dapat bervariasi, tergantung pada sistem satuan yang digunakan. Dalam sistem metrik, tegangan dinyatakan dalam newton per milimeter persegi (N/mm²) atau sering disebut megapascal (MPa). 1 Mpa bernilai 1 N/mm². Sedangkan dalam sistem imperial, tegangan dinyatakan dalam pound per inci persegi (psi). Setelah benda menerima beban sebesar P kg, panjangnya akan bertambah sebesar Δl mm. Dengan begittu, tegangan yang bekerja pada material dapat dihitung menggunakan rumus *engineering stress*:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

σ = Tegangan Normal (Paskal, N/m²)

F = Beban atau Gaya yang bekerja (N, lbf, kgf)

A = Luas Penampang (cm², inch², mm²)

Benda atau material yang diberikan pembebanan mempunyai tegangan ijin yang besarnya ditentukan oleh tegangan *yield point* material dan faktor keamanan (*safety factor*) yang digunakan. Faktor keselamatan digunakan untuk mempertahankan kekuatan material agar tidak terjadi kegagalan saat terkena beban yang lebih tinggi daripada yang diharapkan, sehingga tegangan ijin akan lebih kecil dari tegangan *yield point* material dan dihitung dengan membagi tegangan *yield point* material dengan faktor keselamatan yang diterapkan. Tegangan akan mempunyai satuan yang berbeda-beda, tergantung dari satuan beban atau gaya yang bekerja dan satuan luas penampang yang digunakan.

A. Tegangan *Von Mises* (*Von Mises Stress*)

Tegangan *von mises* merupakan suatu ukuran yang menggabungkan tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja pada suatu titik dalam material. Tegangan ini akan menunjukkan seberapa besar tegangan yang akan menyebabkan material mengalami deformasi plastis atau kegagalan. Keuletan material akan terjadi kegagalan akibat tegangan *von mises* melebihi kekuatan luluh material. Tegangan ini sangat penting dalam analisis kekuatan material (Mesin, 2020).

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - (\sigma_1 \sigma_2)} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

σ_y = Tegangan Von Mises

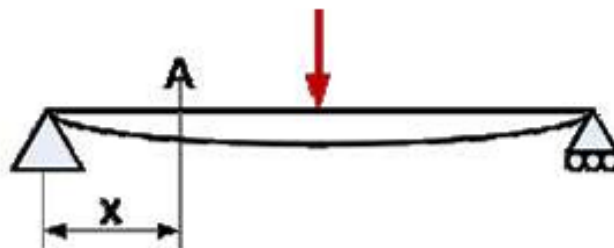
σ_1 = Tegangan Normal

σ_2 = Tegangan Geser

Tegangan didefinisikan dengan perbandingan antara gaya yang diberikan dengan luas area bidang tekan atau bidang geser. Tegangan dibedakan menjadi 2 yaitu tegangan normal dan tegangan geser yang dijelaskan melalui rumus persamaan 2.1. Tegangan normal (*normal stress*) adalah tegangan yang bekerja tegak lurus terhadap bidang penampang suatu material akibat adanya gaya aksial, baik berupa tarik maupun tekan. Tegangan ini menggambarkan besar gaya per satuan luas yang berusaha memanjang atau memendekkan material pada arah gaya tersebut. Sedangkan tegangan geser (*shear stress*) adalah tegangan yang bekerja sejajar atau tangensial terhadap bidang penampang material akibat gaya transversal. Tegangan ini menunjukkan besarnya gaya per satuan luas yang menyebabkan material mengalami deformasi geser atau perubahan bentuk tanpa perubahan panjang yang signifikan.

B. Tegangan Bengkok (*Bending Stress*)

Tegangan bengkok (*bending stress*) merupakan tegangan normal yang timbul pada suatu elemen struktur akibat adanya momen lentur yang bekerja pada penampang (Khurmi and Gupta, 2005). Tegangan ini terjadi ketika struktur mengalami pembebanan yang menyebabkan pembengkokan, sehingga serat bagian luar mengalami tegangan tarik maupun tekan. Besarnya tegangan dipengaruhi oleh momen lentur, jarak serat terhadap sumbu netral, serta momen inersia penampang, yang secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan tegangan lentur. Analisis tegangan bengkok diperlukan untuk mengevaluasi kemampuan struktur dalam menahan beban lentur dan memastikan tegangan yang terjadi berada di bawah batas izin material.



Gambar 2.3 Tegangan Bengkok
Sumber: (Khurmi and Gupta, 2005)

$$\sigma = \frac{Mx \cdot C}{I} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

σ = Tegangan Bending (Paskal, N/m²)

Mx = Momen pada titik A yang berjarak x dari ujung elemen

C = Jarak titik elemen terhadap sumbu netral

I = Momen Inersia

C. Tegangan Prinsipal (*Principal Stress*)

Tegangan prinsipal (*principal stress*) merupakan tegangan normal maksimum dan minimum yang bekerja pada suatu titik di dalam material, di mana pada bidang tersebut tidak terdapat tegangan geser (Khurmi and Gupta, 2005). Tegangan ini diperoleh dari kombinasi tegangan normal dan geser yang terjadi akibat pembebanan. Analisis tegangan prinsipal penting dilakukan untuk menentukan kondisi kritis pada struktur, khususnya dalam evaluasi potensi kegagalan material, terutama pada material getas. Dalam analisis numerik menggunakan metode elemen hingga, tegangan prinsipal digunakan sebagai salah satu parameter untuk mengidentifikasi distribusi tegangan maksimum yang terjadi pada komponen struktur.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan:

$\sigma_{1,2}$ = Tegangan Prinsipal (Pa)

$\sigma_{x,y}$ = Tegangan Normal (Pa)

$\tau_{x,y}$ = Tegangan Geser (Pa)

2.5.2 *Strain* (Regangan)

Strain atau regangan merupakan perubahan bentuk atau luasan yang terjadi pada objek akibat gaya atau pembebanan yang diberikan. Ini akan menunjukkan seberapa besar perubahan bentuk atau luasan yang terjadi pada suatu benda atau material yang diberikan pembebanan atau gaya. Regangan terjadi akibat adanya dua gaya yang saling berlawanan arah bekerja (Khurmi and Gupta, 2005).

Ini berdasarkan hukum Hooke yang menyatakan bahwa tegangan berbanding lurus dengan nilai regangan dan elastisitas material akan berhubungan dengan tegangan dan regangan. Saat material mencapai batasan fase sifat plastis, hubungan antara tegangan dan regangan tidak lagi linier. Ini terjadi pada titik mulur yang merupakan batas antara kondisi plastis dengan elastis. Untuk mengetahui seberapa besar perubahan bentuk atau luasan yang terjadi akibat pembebanan yang dapat diketahui dengan rumus:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan:

ε = Regangan

ΔL = Perubahan atau Penambahan Panjang

L = Panjang Akhir

L_0 = Panjang Awal

2.5.3 *Deformation* (Deformasi)

Perubahan bentuk atau posisi suatu benda atau material yang diakibatkan adanya gaya atau beban dari luar (eksternal) disebut deformasi. Material akan mengalami deformasi elastis pada awal pembebanan selama dibawah kekuatan luluh (*yield point*), material tersebut akan kembali ke bentuk semula. Namun ketika pembebanan yang diberikan melebihi batas kekuatan luluhnya, maka akan terjadi deformasi plastis yang mengakibatkan material tersebut tidak akan kembali ke bentuk semula (Zheng *et al.*, 2023). Modulus ini dihitung dari hasil pembagian antara nilai tegangan dan regangan.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ atau } \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan:

E = Modulus Elastisitas

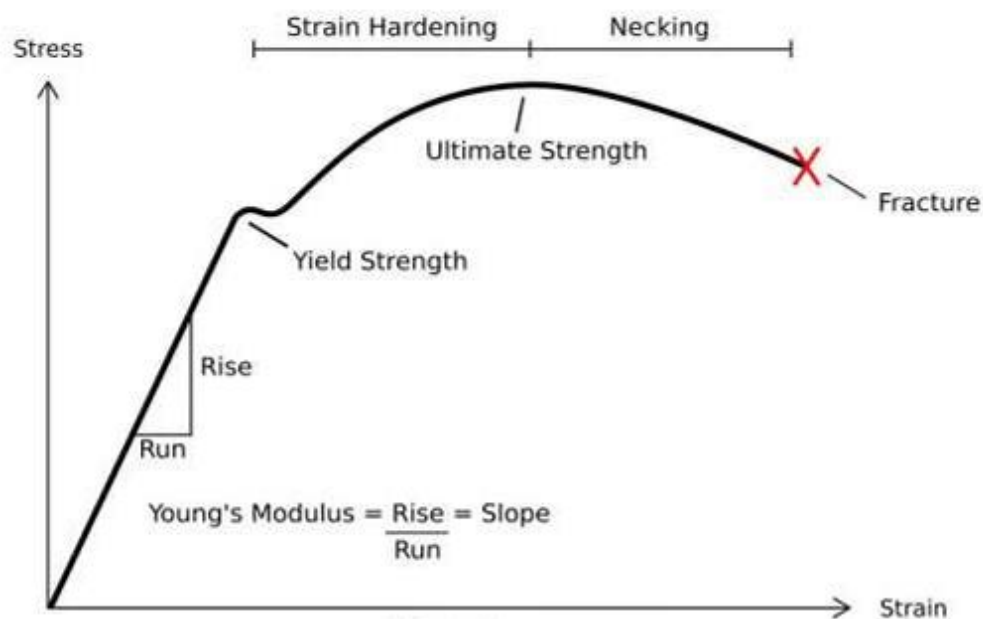
σ = Tegangan

ε = Regangan

2.5.4 *Yield Point* (Batas Luluh)

Yield point atau batas luluh merupakan nilai tegangan yang terjadi pada titik transisi antara daerah elastis dan plastis yang terdapat pada suatu material. Jika pembebanan yang diberikan pada material melebihi titik ini, maka akan meningkatkan nilai regangan sehingga terjadi perubahan bentuk permanen secara tiba-tiba dan tidak bisa kembali ke bentuk semula. Kondisi ini dinamakan plastis. Sebaliknya, jika pembebanan tidak menyentuh titik ini, maka material tersebut akan kembali ke bentuk semula yang disebut kondisi elastis (Setiyarto, 2022).

Yield point biasanya dimulai dari titik pertama terjadinya deformasi plastis atau pendekatan untuk mencari *yield strength* menggunakan aturan *offset*. Metode *offset* merupakan salah satu cara yang umum digunakan untuk mencari *yield point*. Metode ini dapat ditentukan dengan menarik garis lurus sejajar dengan bagian linear dari kurva tegangan-regangan dengan kemiringan yang sama, tetapi dimulai dari titik yang terletak dimana regangan lebih besar dari regangan awal seperti pada Gambar 2.4 (Farag and Elmogahzy, 2015).



Gambar 2.4 Grafik *Yield Point* (Batas Luluh)

Sumber : (Frag and Elmogahzy, 2015)

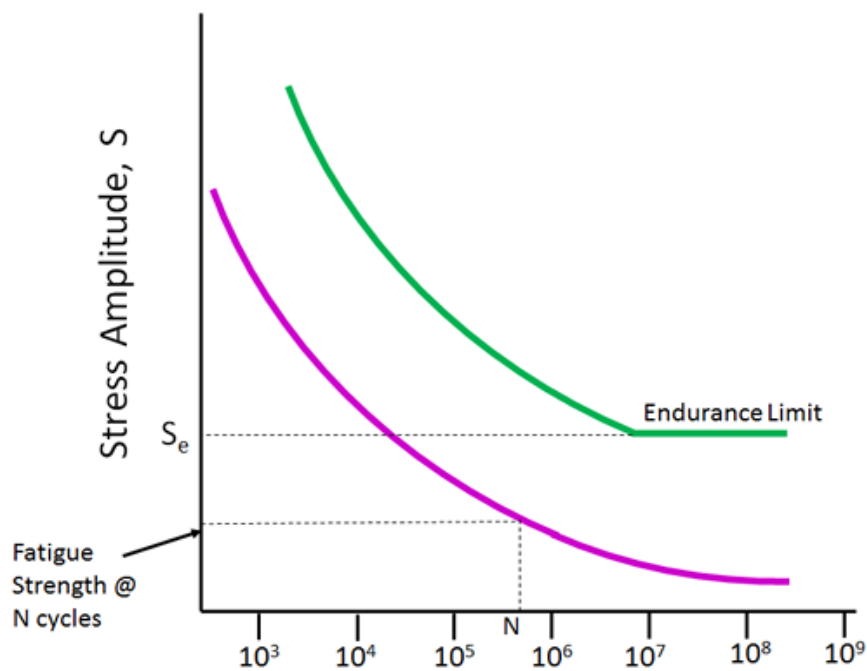
2.5.5 *Fatigue Life* (Umur Kelelahan Material)

Fatigue life merupakan umur ketahanan suatu material terhadap pembebanan berulang yang terjadi secara terus-menerus hingga material mengalami kegagalan atau retak. Kegagalan akibat kelelahan (*fatigue failure*) umumnya tidak terjadi secara tiba-tiba, melainkan diawali dengan terbentuknya retak mikro pada permukaan material yang kemudian berkembang seiring bertambahnya jumlah siklus pembebanan. Parameter *fatigue life* digunakan untuk memperkirakan berapa banyak siklus beban yang dapat ditahan material sebelum mencapai kondisi kegagalan. Dalam konteks perancangan struktur atau komponen mekanis, analisis *fatigue life* menjadi penting karena sebagian besar komponen bekerja di bawah kondisi pembebanan dinamis yang berulang, seperti getaran, gaya tembakan, atau tekanan periodik. (Khurmi and Gupta, 2005).

2.5.6 *Limite Endurance Diagram* (Diagram Endurance Limit)

Diagram Endurance Limit atau *Limit Endurance Diagram* merupakan suatu ilustrasi grafis yang menunjukkan hubungan antara besarnya tegangan siklik dengan jumlah siklus pembebanan yang mampu ditahan oleh material sebelum mengalami kerusakan akibat fenomena *fatigue* (kelelahan). Diagram ini berfungsi untuk menggambarkan batas kemampuan material ketika menerima beban yang terjadi secara berulang. Perubahan pada diagram endurance limit dapat dipengaruhi oleh sejumlah faktor, di antaranya:

- Tegangan Maksimum: Nilai tegangan tertinggi yang dialami material pada setiap siklus pembebanan.
- Geometri Material: Bentuk serta dimensi komponen yang dapat memengaruhi distribusi tegangan dan potensi inisiasi retak.
- Lingkungan: Kondisi eksternal seperti temperatur, kelembapan, serta keberadaan korosi yang dapat menurunkan ketahanan material terhadap *fatigue*.



Gambar 2.5 Diagram *endurance limit* dengan *stress life cycle*

Sumber: Endurance Limit - Steel

Berdasarkan kurva hubungan antara *endurance limit* dan *stress life cycle*, dapat diartikan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Apabila tegangan berada di bawah batas *endurance*, material mampu menahan pembebanan berulang tanpa mengalami kegagalan.
- Apabila tegangan melebihi batas *endurance*, material akan mengalami kerusakan lebih cepat akibat proses kelelahan yang dipicu oleh tingginya jumlah siklus pembebanan.

2.5.7 *Safety factor* (Faktor Keamanan)

Safety factor atau yang lebih dikenal dengan faktor keamanan merupakan sebuah angka atau nilai yang berfungsi dalam perancangan teknik untuk mengukur kemampuan suatu komponen atau struktur dalam menahan beban yang diterima tanpa mengalami kegagalan. Nilai ini merupakan hasil perbandingan antara nilai kekuatan sebenarnya dengan nilai kekuatan berdasarkan material.

Dobrovolsky dalam buku “*Machine Elements*”, penentuan faktor keamanan sangat bergantung pada jenis pembebanan yang bekerja pada suatu komponen atau struktur. Untuk kondisi beban statis yang sifatnya relatif konstan, faktor keamanan yang disarankan berada pada kisaran 1,25 hingga 2,0. Pada beban dinamis yang mengalami fluktuasi, siklus berulang, atau adanya pengaruh getaran, nilai faktor keamanan dinaikkan menjadi 2,0 hingga 3,0. Sedangkan untuk beban kejut atau tumbukan yang datang secara tiba-tiba dengan kemungkinan menimbulkan deformasi, faktor keamanan ditetapkan lebih tinggi, yaitu kisaran 3,0 hingga 5,0. (Furqani, Arief and Muchlisinalahuddin, 2022).

Faktor keamanan digunakan untuk menilai komponen atau struktur meskipun dimensi yang digunakan minimum. Kekuatan luluh material dibagi dengan tegangan *von mises* merupakan faktor keamanan minimum yang dihitung dalam perangkat lunak numerik. Nilai faktor keamanan harus lebih besar dari satu untuk dikatakan aman. Jika nilai faktor keamanan kurang dari satu, maka dapat dikatakan kegagalan permanen pada sebuah desain (Wibawa and Tuswan, 2021).

Untuk mengetahui nilai faktor keamanan menggunakan rumus berikut:

$$Sf = \frac{\sigma_y}{\sigma_{aktual}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan:

Sf = *Safety factor* (Faktor Kemanan)

σ_y = Tegangan Luluh Material

σ_{aktual} = Tegangan Kerja Aktual

2.5.8 Impuls dan Momentum

Impuls dan momentum merupakan dua konsep yang saling berkaitan dalam mekanika, terutama dalam analisis gaya yang bekerja selama waktu tertentu. Momentum merupakan hasil kali antara massa benda dengan kecepatannya, yang menggambarkan seberapa besar kecenderungan benda untuk mempertahankan gerakannya. Sedangkan impuls adalah hasil kali antara gaya yang bekerja dengan selang waktu kerjanya, yang menunjukkan perubahan momentum suatu benda akibat gaya tersebut (Khurmi and Gupta, 2005). Besarnya impuls dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$I = F \cdot \Delta t \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan:

I = Impuls (N.s)

F = Gaya yang bekerja (N)

Δt = Selang waktu gaya bekerja (s)

Dari persamaan tersebut, dapat diketahui bahwa impuls berbanding lurus dengan besar gaya yang bekerja dan lamanya gaya tersebut diberikan pada benda. Semakin besar gaya atau semakin lama gaya bekerja, maka semakin besar pula impuls. Sedangkan momentum dapat dihitung menggunakan rumus:

$$p = m \cdot v \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan:

m = Massa benda (kg)

v = Kecepatan (m/s)

Hubungan antara impuls dan momentum dijelaskan melalui hukum impuls-momentum, yang menyatakan bahwa impuls yang diberikan pada suatu benda sama dengan perubahan momentumnya. Secara matematis dituliskan sebagai:

$$F \cdot \Delta t = m \cdot (v_2 - v_1) \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan:

F = Gaya yang bekerja (N)

Δt = Selang waktu gaya bekerja (s)

m = Massa benda (kg)

v_1 = Kecepatan Awal (m/s)

v_2 = Kecepatan Akhir (m/s)

Persamaan tersebut menunjukkan gaya yang bekerja pada suatu benda selama selang waktu tertentu akan menyebabkan perubahan kecepatan, dengan demikian mengubah momentumnya. Ini menjadi dasar dalam analisis tumbukan, seperti peristiwa peluru yang mengenai kaca tahan peluru, di mana impuls yang diterima kaca berhubungan langsung dengan gaya rata-rata yang bekerja selama proses tumbukan.

2.5.9 Momen Gaya

Momen inersia merupakan besaran fisika yang menggambarkan kecenderungan suatu gaya untuk menyebabkan benda berputar terhadap titik atau sumbu tertentu. Secara umum, momen dihitung dari hasil kali antara gaya yang bekerja dengan jarak tegak lurus dari titik putar terhadap garis kerja gaya. Momen memiliki peran penting dalam analisis mekanika, terutama pada sistem yang melibatkan rotasi atau keseimbangan benda tegar. Terdapat beberapa jenis momen, antara lain momen gaya atau torsi yang menyebabkan benda berputar, momen inersia yang menyatakan tingkat kesulitan suatu benda untuk berotasi, serta momen kopel yang terjadi akibat dua gaya sejajar yang berlawanan arah dan menghasilkan efek putar tanpa perpindahan linier. Pemahaman tentang momen sangat penting dalam perancangan dan analisis struktur maupun komponen mekanik untuk memastikan kestabilan dan keamanan sistem yang bekerja di bawah pengaruh gaya-gaya eksternal (Khurmi and Gupta, 2005).

$$M = F \cdot L \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan:

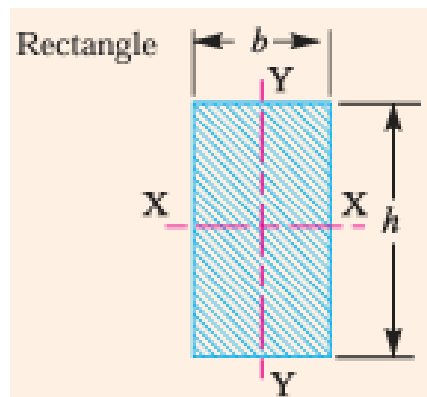
M = Momen (N.m)

F = Gaya yang bekerja (N)

L = Jarak tegak lurus dengan garis gaya (m)

2.5.10 Momen Inersia

Momen inersia adalah parameter geometrik penampang yang menyatakan distribusi luas penampang terhadap sumbu netral dan berperan penting dalam menentukan ketahanan serta kekakuan struktur terhadap pembebanan lentur (Khurmi and Gupta, 2005). Nilai momen inersia yang lebih besar menunjukkan kemampuan penampang yang lebih baik dalam menahan momen lentur, sehingga tegangan dan defleksi yang terjadi menjadi lebih kecil.



Gambar 2.6 *Inertia of Moment Rectangle*

Sumber: (Khurmi and Gupta, 2005)

$$I = \frac{bh^3}{12} \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan:

I = Momen Inersia (m^4)

b = Lebar penampang (m)

h = Tinggi penampang (m)

2.5.11 Gaya Gravitasi

Gaya gravitasi merupakan gaya tarik-menarik yang terjadi antara dua benda bermassa. Besarnya gaya ini berbanding lurus dengan hasil kali massa kedua benda serta berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya. Konsep ini dijelaskan melalui Hukum Gravitasi Universal Newton, yang menyatakan bahwa setiap partikel materi di alam semesta saling menarik dengan gaya tertentu. Dalam konteks penelitian ini, pemahaman mengenai gaya gravitasi menjadi penting karena dapat digunakan untuk menganalisis interaksi fisik yang terjadi pada objek yang dikaji serta menjelaskan fenomena gerak yang dipengaruhi oleh medan gravitasi (Khurmi and Gupta, 2005).

$$W = m \cdot g \dots\dots\dots (2.13)$$

Keterangan:

W = Berat benda (N)

m = Massa benda (Kg)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2) dengan standar nilai $9,81 m/s^2$

2.6 Pengukuran Tegangan *Bracket* Kaca Tahan Peluru

Pengukuran tegangan dan analisis pada *bracket* kaca tahan peluru dilakukan analisis pembebanan statis berasal dari massa kaca tahan peluru dan pembebanan dinamis berasal dari gaya yang dihasilkan oleh tembakan, yang kemudian terdistribusikan pada *bracket* menggunakan metode *Finite Element*. Metode ini merupakan pendekatan yang sangat dibutuhkan dalam bidang teknik, terutama dalam pengujian tembak dan analisis pada struktur *bracket* kaca tahan peluru yang berfungsi

sebagai komponen pendukung kaca tahan peluru dalam berbagai aplikasi. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak numerik dengan sistem FEA. Perangkat lunak numerik sangat memungkinkan untuk digunakan dalam analisis dan simulasi tegangan yang terjadi terhadap material dan desain yang dipilih dalam merespon tekanan dan gaya yang dihasilkan oleh peluru yang mengenai permukaan kaca. Metode ini memungkinkan perancang untuk memodelkan dan menganalisis sistem secara lebih detail dan menyeluruh yang bertujuan untuk mengidentifikasi titik-titik kritis yang berpotensi terjadi kegagalan (Lim, Shim and Ng, 2015).

2.7 Prinsip Dasar *Finite Element Analysis* (FEA)

Metode numerik FEA digunakan untuk menghitung reaksi struktur terhadap beban atau kondisi tertentu. Metode ini membagi suatu struktur besar menjadi elemen-elemen kecil yang disebut elemen hingga. Kemudian setiap elemen di analisis secara terpisah untuk melihat bagaimana elemen tersebut bereaksi terhadap beban atau perubahan yang terjadi, seperti tegangan, regangan, dan deformasi pada material. Setelah menganalisis bagian-bagian terkecil, kemudian digabungkan struktur elemen tersebut secara keseluruhan untuk mendapatkan gambaran mengenai perilaku struktur secara menyeluruh. Setiap elemen memiliki karakteristik fisik tertentu tergantung dari jenis materialnya. Ini akan berpengaruh terhadap sifat material dan geometri, dan terhubung melalui titik-titik persilangan yang disebut node (Dabit *et al.*, 2020).

2.8 Tahapan Simulasi *Finite Element Analysis* (FEA)

Tahapan simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) merupakan serangkaian proses sistematis yang dilakukan untuk menganalisis respons suatu komponen terhadap beban atau kondisi tertentu. Pada penelitian ini, dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak numerik. Proses simulasi secara umum terdiri atas tiga tahap utama, yaitu *pre-processing*, *processing (solution)*, dan *post-processing* (Cheson, 2015).

2.8.1 *Pre-Processing*

Tahap *pre-processing* merupakan tahap pertama dalam proses persiapan sebelum dilakukan perhitungan numerik. Pada tahap ini, terdapat beberapa langkah penting, yaitu :

1. Definisi Material (*Engineering Data*)

Setelah model geometri tersedia, tahapan selanjutnya adalah mendefinisikan sifat material dari komponen yang akan dianalisis. Data material dimasukan ke dalam modul *Engineering Data*. Beberapa properti material yang umumnya diperlukan dalam simulasi struktur seperti *modulus elastisitas*, *rasio poisson*, *density*, *yiled strength*, dan beberapa properti lainnya yang dibutuhkan. Data material harus sesuai dengan material nyata yang akan digunakan dalam produk, baik berdasarkan standar internasional (seperti ASTM atau ISO) maupun hasil uji laboratorium. Kesalahan dalam memasukkan data material akan menghasilkan hasil simulasi yang tidak akurat.

2. Impor Geometri

Tahapan awal dalam simulasi FEA adalah mengimport geometri. Geometri ini dapat berupa hasil desain dari perangkat lunak CAD (Computer Aided Design) seperti Solidworks, Autodesk Inventor, atau jenis aplikasi desain lainnya. Perangkat lunak numerik Workbench mendukung berbagai format file seperti STEP (.step, .stp), IGES (.iges, .igs), atau parasolid (.x_t, .x_b). Tujuan dari tahap ini adalah untuk memasukkan model 3D ke dalam lingkungan perangkat lunak numerik agar dapat diproses lebih lanjut, termasuk pembuatan mesh, pemberian sifat material, penerapan beban, serta penentuan kondisi batas yang diperlukan untuk menghasilkan simulasi yang mendekati kondisi nyata.

3. Meshing

Dalam simulasi FEA menggunakan perangkat lunak numerik pemilihan bentuk *meshing* dan jumlah elemen yang digunakan untuk mendiskritisasi struktur memengaruhi terhadap hasil analisis tegangan pada *bracket* kaca tahan peluru. Kualitas *meshing* akan memengaruhi tingkat akurasi simulasi, sehingga kualitas *meshing* harus dipastikan dengan baik menggunakan indikator nilai *skewness*. Salah satu cara untuk mengetahui dan memastikan hasil analisis menggunakan *mesh* pada benda uji dilakukan dengan cara uji konvergensi. Jika perbedaan hasil analisis berada dalam rentang yang dapat diterima, maka dapat disimpulkan bahwa *mesh* telah mendiskritisasi struktur dengan baik atau telah berada dalam kondisi konvergen.

Tabel 2. 2 *Skewness mesh metrics spectrums*

Kategori	Rentang Nilai
<i>Excellent</i>	0 – 0.25
<i>Very Good</i>	0.25 – 0.50
<i>Good</i>	0.50 – 0.80
<i>Acceptable</i>	0.80 – 0.94
<i>Bad</i>	0.94 – 0.97
<i>Unacceptable</i>	0.98 – 1.00

Sumber: (Fatchurrohman and Chia, 2017)

Proses membagi struktur menjadi elemen-elemen yang lebih kecil disebut *meshing*. Hasil dari elemen ini dapat berbeda-beda tergantung kerumitan struktur yang diuji. Kualitas *mesh* dapat ditunjukkan pada Tabel 2. 2 melalui nilai *skewness*. Kualitas *skewness* rata-rata harus dijaga pada rentang nilai minimum 0,80-0,94, dimana pada ukuran tersebut dikategorikan pada nilai *acceptable* atau dapat diterima (Fatchurrohman and Chia, 2017).

4. Pembebanan dan *Boundary Condition*

Tahapan ini melibatkan penerapan kondisi pembebanan dan batas yang merepresentasikan kondisi kerja sebenarnya dari komponen. Beban dapat berupa gaya, tekanan, momen, dan temperatur (jika dilakukan analisis termal). Sedangkan dalam *boundary condition* digunakan untuk menahan atau membatasi gerakan bagian tertentu dari model, seperti *fixed support*, *symmetry*, dan beberapa parameter lainnya. Penerapan beban dan kondisi batas harus sesuai dengan kondisi nyata dari aplikasi.

2.8.2 Processing (Solution)

Setelah semua parameter dan kondisi telah ditentukan, tahap selanjutnya adalah *processing (solution)*. Pada tahap ini, perangkat lunak numerik menjalankan proses perhitungan numerik menggunakan metode elemen hingga untuk memperoleh distribusi tegangan, regangan, deformasi, maupun parameter lain sesuai jenis analisis. Waktu komputasi yang dibutuhkan bergantung pada kompleksitas model, jenis simulasi, serta spesifikasi perangkat yang digunakan.

2.8.3 Post-Processing

Tahap terakhir adalah *post-processing*, yaitu evaluasi dan interpretasi hasil simulasi. Data hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk visualisasi, seperti kontur warna untuk distribusi tegangan, regangan, dan deformasi. Selain itu, perangkat lunak numerik juga memberikan data numerik berupa nilai maksimum, minimum, maupun faktor keamanan. Hasil interpretasi ini sangat penting untuk mengevaluasi kinerja material dan desain, serta untuk mengidentifikasi potensi titik kritis yang berisiko mengalami kegagalan (Fatchurrohman and Chia, 2017).