

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Perancangan Produk

Dalam membuat suatu produk kita perlu melakukan proses perancangan produk secara sistematis agar produk yang dihasilkan bisa sesuai dengan spesifikasi awal yang kita inginkan. Proses produksi harus dilakukan sesuai dengan tahapan dan dilakukan secara berurutan.

2.1.1 Pendahuluan Perancangan

Kesejahteraan dan kualitas hidup manusia yang telah dapat mencapai tingkat yang sangat tinggi pada saat ini, yang dapat dilihat antara lain pada kesejahteraan materi dan kesehatan fisik masyarakat, sebagian besar adalah diciptakan, dibuat, dan dimanfaatkannya berbagai produk dan jasa yang tak terhitung macam dan jumlahnya dan yang kini telah menjadi bagian yang tak terpisahkan lagi dari kehidupan manusia sehari-hari, oleh para insinyur dan ahli-ahli teknik lainnya.

Perancangan dan pembuatan produk merupakan bagian yang sangat besar dari semua kegiatan teknik yang ada. Kegiatan perancangan dimulai dengan didapatkannya persepsi tentang kebutuhan manusia, kemudian disusul oleh penciptaan konsep produk, disusul kemudian dengan perancangan, pengembangan, dan penyempurnaan produk, kemudian diakhiri dengan pembuatan dan pendistribusian produk.

Perancangan adalah kegiatan awal dari suatu rangkaian kegiatan dalam proses pembuatan produk. Dalam tahap perancangan dibuat keputusan-keputusan penting yang mempengaruhi kegiatan-kegiatan lain yang menyusul. Di antara keputusan penting tersebut termasuk keputusan yang membawa akibat apakah industri dalam negeri dapat berpartisipasi atau tidak dalam pembangunan proyek. Dalam melaksanakan tugas merancang, perancang memakai dan memanfaatkan ilmu pengetahuan, ilmu dasar teknik, pengetahuan empiris, hasil-hasil penelitian, informasi dan teknologi, yang semuanya dalam versi perkembangan dan kemajuan mutakhir [5].

2.1.2 Perancangan dan Gambar Teknik

Sebelum sebuah produk dibuat, maka produk tersebut haruslah dirancang terlebih dahulu. Dalam bentuknya yang paling sederhana, hasil desain tersebut dapat berupa sebuah sketsa atau gambar sederhana dari produk atau benda teknik yang akan dibuat. Dalam hal si pembuat produk adalah si perancangnya sendiri, maka sketsa atau gambar yang dibuat cukup sederhana asal dapat dimengerti dirinya sendiri. Pada zaman modern ini sebagian besar produk merupakan benda teknik yang rumit yang mempunyai banyak elemen dan pada umumnya sudah tidak dapat lagi dibuat oleh hanya satu orang saja. Gambar yang dibuat pun sudah tidak sederhana lagi tetapi cukup rumit dan harus dibuat dengan aturan atau cara menggambar yang jelas agar dapat dimengerti oleh semua orang yang terlibat dalam kegiatan pembuatan produk. Gambar hasil desain produk adalah hasil akhir proses perancangan dan sebuah produk barulah dapat dibuat setelah dibuat gambar-gambar desainnya. Gambar adalah alat penghubung atau alat komunikasi antara perancang dan pembuat produk, dan antara semua orang yang terlibat dalam kegiatan perancangan dan pembuatan. Bahkan gambar teknik adalah bahasa universal yang dipakai dalam kegiatan dan komunikasi antara orang-orang teknik.

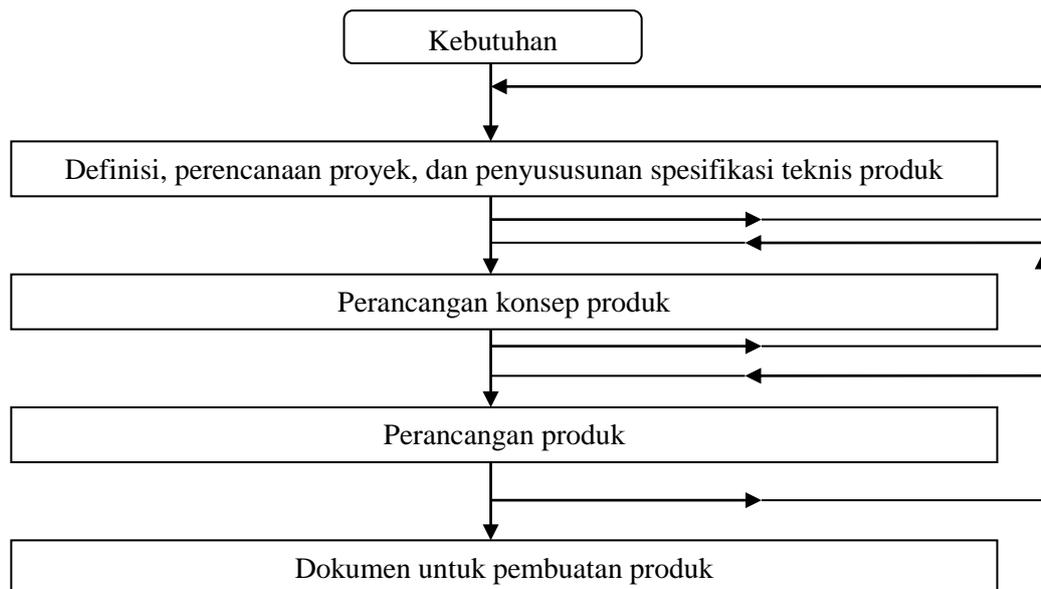
Perancangan dan pembuatan produk adalah dua kegiatan tunggal, artinya desain hasil kerja perancang tidak ada gunanya jika desain tersebut tidak dibuat, sebaliknya pembuat tidak dapat merealisasikan benda teknik tanpa terlebih dahulu dibuat gambar desainnya. Hasil kreasi berupa benda teknik dalam bentuk gambar merupakan tanggung jawab perancang, sedangkan realisasi fisik benda teknik tersebut adalah tanggung jawab pembuat. Sehingga gambar teknik merupakan bahasa penghubung antara keduanya dan merupakan elemen yang penting dalam suatu proses perancangan [5].

2.1.3 Fase Dalam Perancangan

Proses perancangan dimulai dengan ditemukannya kebutuhan manusia akan suatu produk yang dapat dimanfaatkannya untuk meringankan beban hidupnya. Kebutuhan akan suatu produk tersebut pada umumnya tidak ditemukan oleh

perancang, meskipun perancang dapat melakukannya. Kebutuhan tersebut dapat pula berupa pesanan yang diterima dari instansi atau perusahaan lain untuk dibuatkan produk, atau dapat pula ditemukan ketika sedang melakukan survei pasar yang menghasilkan kesimpulan perlunya dibuat suatu produk yang dapat dijual ke pasar. Kebutuhan akan suatu produk tersebut kemudian diberikan pada tim perancang untuk membuat desain produknya. Inilah awal proses perancangan.

Proses perancangan itu sendiri kemudian berlangsung melalui kegiatan kegiatan dalam fase yang berurutan, yaitu: 1) fase definisi proyek, perencanaan proyek, analisa masalah, dan penyusunan spesifikasi teknis produk, 2) fase perancangan konsep produk, 3) fase perancangan produk, 4) fase penyusunan dokumen atau pembuatan produk. Fase tersebut dapat dilihat pada diagram alir berikut.



Gambar 2. 1 Diagram alir proses perancangan [5]

Fase pertama merupakan kebutuhan produk. Kebutuhan akan produk ditemukan oleh bagian pemasaran atau siapa saja yang mengusulkan pada perusahaan. Produk baru yang akan diusulkan untuk dibuat tersebut haruslah dikaji lebih lanjut tentang kebenaran akan kebutuhannya, tentang kelayakan pembuatan dan pemasarannya dan lain-lain.

Ide produk yang telah dipilih kemudian dilakukan survei diantara pengguna dan pelanggan untuk mengetahui keinginan-keinginan pengguna terhadap produk tersebut. Berdasarkan keinginan pengguna tersebut kemudian disusun spesifikasi teknis produk yang selanjutnya akan dijadikan dasar fase perancangan berikutnya yaitu perancangan konsep produk. Tujuan fase perancangan konsep produk adalah menghasilkan alternatif konsep produk sebanyak mungkin. Konsep produk yang dihasilkan fase ini masih berupa skema atau dalam bentuk sketsa atau *skeleton*. Pada prinsipnya, semua alternatif konsep produk tersebut memenuhi spesifikasi teknis produk. Pada akhir fase perancangan konsep produk, dilakukan evaluasi pada hasil desain konsep produk untuk memilih salah satu atau beberapa konsep produk terbaik untuk dikembangkan pada fase selanjutnya.

Fase perancangan produk merupakan fase setelah perancangan konsep produk dan terdiri dari beberapa langkah, tetapi pada intinya pada fase ini solusi-solusi alternatif dalam bentuk sketsa dikembangkan lebih lanjut menjadi produk atau benda teknik atau yang bentuk, material, dan dimensi elemennya telah ditentukan. Fase perancangan produk diakhiri dengan perancangan detail elemen-elemen produk yang kemudian dituangkan dalam gambar detail untuk proses pembuatan.

Gambar hasil perancangan produk terdiri dari : 1) gambar semua elemen lengkap dengan bentuk geometrinya, dimensi, kekerasan/kehalusan permukaan, dan material, 2) gambar (susunan) komponen (*assembly*). 3) gambar susunan produk. 4) spesifikasi yang memuat keterangan-keterangan yang tidak dapat dimuat pada gambar dan 6) *bill of material*. Gambar perancangan produk dapat dituangkan dalam bentuk gambar tradisional di atas kertas (2-dimensi) atau dalam informasi digital yang disimpan dalam memori komputer. Informasi dalam bentuk digital tersebut dapat di *print-out* untuk menghasilkan gambar tradisional atau dapat dibaca oleh sebuah *software* ke komputer, yang mengendalikan alat produksi yang akan membuat produk [5].

2.2 Definisi Gerbong Barang

Kendaraan untuk angkutan barang disebut gerbong. Persyaratan teknis gerbong tidak terlalu menuntut kecepatan dan kenyamanan. Konstruksi yang diperlukan adalah

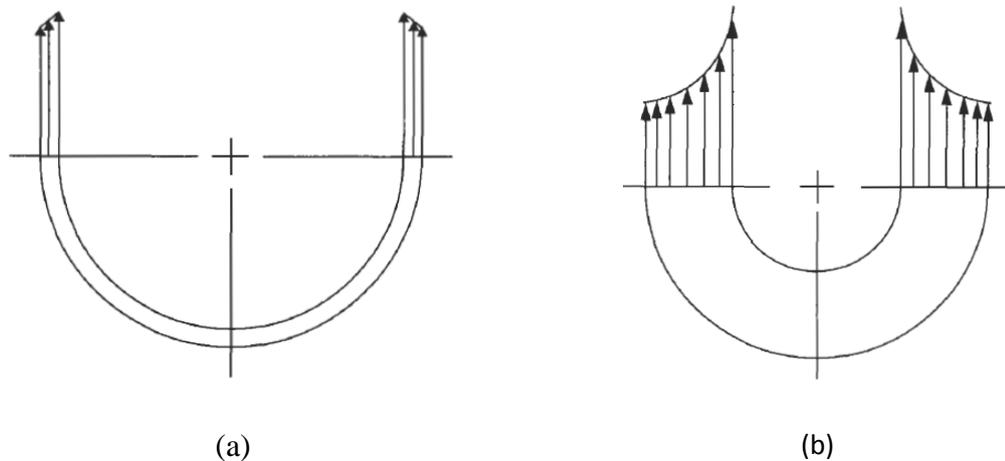
untuk menjaga agar barang yang diangkut utuh dan tidak rusak sampai tujuan. Upaya untuk mendapatkan berat muat yang optimal menjadi ukuran keberhasilan rancang bangun gerbong.

Yang menjadi perhatian dalam membuat gerbong adalah muatan optimal dan bongkar muat dapat dilakukan dengan cepat. Untuk mendapatkan muatan yang optimal konstruksi gerbong harus dibuat seringan mungkin namun tetap harus menggunakan bahan yang tepat agar biaya investasi tidak menjadi terlalu besar [2].

2.3 Definisi dan Komponen Bejana Tekan

Bejana tekan (*pressure vessel*) merupakan wadah tertutup yang digunakan untuk berbagai macam keperluan dalam dunia industri maupun dalam kehidupan sehari-hari. Bejana tekan dirancang untuk mampu menampung cairan atau gas yang memiliki temperatur atau tekanan yang berbeda dari keadaan lingkungannya.

Berdasarkan ukuran tebal dindingnya, bejana tekan terbagi menjadi dua yaitu bejana tekan berdinding tipis dan bejana tekan berdinding tebal. Bejana tekan termasuk berdinding tipis ketika perbandingan tebal dibanding jari-jarinya dibawah 1:10, sedangkan jika diatas perbandingan tersebut maka bejana tekan termasuk berdinding tebal. Perbedaan bejana tekan berdinding tipis dan tebal terletak pada tegangan yang terjadi ada dinding bejana, pada bejana tekan berdinding tipis tegangan diperhitungkan hanya pada arah circumferensial dan longitudinal, sedangkan bejana berdinding tebal, tegangan kearah radial juga diperhitungkan. Namun, bejana tekan berdinding tipis bukan berarti tidak mempunyai tegangan kearah radial, tetapi perbedaan tegangan radial antara dinding sebelah dalam dan luar tidak terlalu kentara, sehingga diasumsikan sama, sedangkan bejana tekan berdinding tebal distribusi tegangan kearah radial sangat jelas, sebab dinding yang begitu tebal, maka dari itu perlu untuk diperhitungkan tegangan kearah radialnya. Gambar 2.2 menunjukkan distribusi tegangan arah radial pada dua jenis bejana [9].



Gambar 2. 2 (a) Bejana tekan dinding tipis, (b) Bejana tekan dinding tebal [9]

Bejana tekan banyak digunakan dalam dunia industri sebagai boiler, media reaksi kimia, reaktor ataupun sebagai media penampung atau penyimpanan. Penggunaannya telah berkembang diseluruh dunia dan memegang peranan vital dalam sebuah industri. Sebab itu ukuran dari bejana tekan sangat bervariasi dan tidak terbatas, bentuknya pun bermacam-macam, antara lain berbentuk bola atau silinder, setiap bentuk bejana tekan memiliki kelebihan dan kekurangan sendiri dan pemilihannya tergantung kepada berbagai pertimbangan yang telah ditentukan oleh konsumen ataupun perancang sendiri.

2.3.1 Selimut Bejana (*Shell*)

Shell merupakan selimut bejana tekan biasanya berupa silinder atau gabungan silinder dengan kerucut. Pada umumnya bejana tekan menggunakan *shell* yang berupa silinder, sebab lebih mudah dibuat dan lebih murah biaya produksinya. Pada *shell* yang berbentuk silinder maka pada *shell* terjadi tegangan longitudinal dan circumferensial, oleh karena ketebalan dindingnya yang relatif tipis dibanding diameter, sehingga distribusi tegangan kearah radial dianggap seragam dan tidak perlu dimasukkan dalam perhitungan.

Dalam mendesain bejana tekan, biasanya ditentukan terlebih dahulu dimensi awal dinding silindernya berupa diameter dan panjang yang ditentukan berdasarkan volume operasi bejana tekan, dan kemudian tebal *shell* yang bergantung pada tekanan internal/eksternal ditambah beban-beban yang signifikan lainnya. Tebal

dinding bejana tekan dipengaruhi pula oleh kekuatan material, sehingga tekanan maksimal yang dapat diterima oleh bejana tekan dibatasi oleh kekuatan material yang tersedia. Tebal bejana tekan dapat ditentukan melalui analisis tegangan pada dinding dan tegangan yang diijinkan oleh material yang digunakan [9].

2.3.2 Tutup Bejana (*Head*)

Head atau bagian ujung-ujung bejana tekan, sebagai penutup sebuah *shell* dari bejana tekan. *Head* memiliki bentuk yang bervariasi, seperti hemispher, elipsoidal, kerucut, datar dan lain sebagainya. *Head* yang sering digunakan untuk tekanan rendah adalah elipsoidal. Untuk tangki bergerak pada kendaraan sering digunakan elipsoidal dengan perbandingan mayor axis dan minor axis adalah 3:1. Hal ini sesuai dengan standar keamanan DOT U.S. (*Departement of Transportation*) : Part 179. *Spesifications for Tank Car*.

2.3.3 Nosel

Nosel berfungsi sebagai saluran keluar masuk dan untuk menguras isi bejana tekan, nosel berupa pipa yang dipasang dengan sambungan las, baut dan sebagainya pada bukaan yang pada dinding bejana tekan. Pipa yang digunakan sebagai nosel dirancang juga sesuai dengan tekanan kerja bejana tekan, agar mampu melayani operasi bejana tekan tersebut. Diameter nosel disesuaikan dengan diameter bukaan dan fungsinya, sehingga tepat penggunaannya. Beban nosel juga harus diperhitungkan, sebab bejana tekan juga mendapat beban akibat berat dari nosel-nosel yang terpasang dinding bejana tekan.

2.3.4 Dudukan Bejana (*Saddle*)

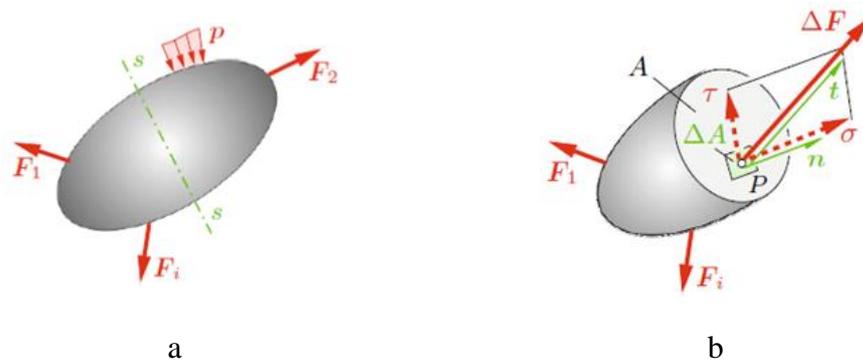
Pemilihan tipe penyangga pada bejana tekan bergantung kepada beberapa sebab, antara lain ukuran bejana, ketebalan dinding, area plant yang tersedia, elevasi dari bejana dibanding dengan elevasi tanah, konstruksi materialnya, dan temperatur operasi.

Bejana tekan silinder horizontal biasanya disangga dengan menggunakan dua *saddle*, analisisnya menyederhanakan bejana tekan sebagai *beam*. Analisis tegangan

yang dihasilkan pada bagian *shell* karena *saddle* telah dilakukan oleh Zick yang membangun persamaan tegangannya. Apabila dibutuhkan dapat ditambahkan cincin pada *shell*nya untuk menambah kekakuan terhadap *buckling* akibat berat bejana itu sendiri [9].

2.4 Konsep Tegangan

Salah satu masalah utama dalam mekanika bahan adalah menyelidiki tahanan dalam dari suatu benda, yaitu gaya-gaya yang ada di dalam suatu benda yang mengimbangi gaya-gaya luar. Gaya-gaya dalam merupakan vektor dalam dan bertahan dalam keseimbangan terhadap gaya-gaya luar. Dalam mekanika bahan perlu menentukan intensitas dari gaya-gaya ini dalam berbagai potongan dengan tujuan untuk mengetahui kemampuan bahan tersebut. Biasanya intensitas gaya diuraikan menjadi tegak lurus dan sejajar dengan irisan yang dibuat. Penguraian intensitas gaya pada luas kecil yang tak berhingga diperlihatkan dalam Gambar 2.3. Intensitas gaya yang tegak lurus atau normal terhadap irisan disebut tegangan normal (*normal stress*) pada sebuah titik. Komponen yang lain dari intensitas gaya yang bekerja sejajar dengan bidang dari luas elementer adalah tegangan geser (*shearing stress*) [3, 13].



Gambar 2. 3 Metode irisan sebuah benda [3]

Secara matematis komponen dari tegangan normal dan tegangan geser didefinisikan sebagai:

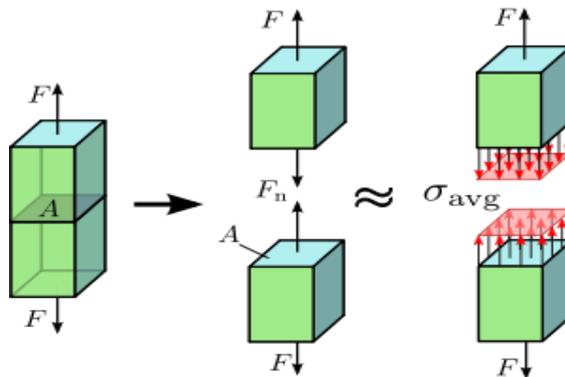
$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2-1)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta A} \quad (2-2)$$

Dengan: σ = tegangan normal $\left(\frac{N}{m^2}\right)$
 τ = tegangan geser $\left(\frac{N}{m^2}\right)$
 ΔA = luas (m^2)
 F = gaya tegak lurus terhadap potongan $\left(\text{kg} \cdot \frac{m}{s^2} \text{ atau } N\right)$
 ΔV = gaya sejajar terhadap potongan $\left(\text{kg} \cdot \frac{m}{s^2} \text{ atau } N\right)$ [3]

2.4.1 Tegangan Normal

Tegangan yang tegak lurus terhadap permukaan benda yang ditimbulkan oleh gaya aksial, tegangan bending dan reaksi tumpuan. Dalam beban aksial, tegangan normal didistribusikan secara merata pada luas penampang A , seperti yang diperlihatkan dalam gambar 2.4 [13].



Gambar 2. 4 Tegangan normal pada beban aksial [18]

Secara matematis tegangan normal pada beban aksial didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-3)$$

Dengan : σ adalah tegangan normal $\left(\frac{N}{m^2}\right)$

A adalah luas (m^2)

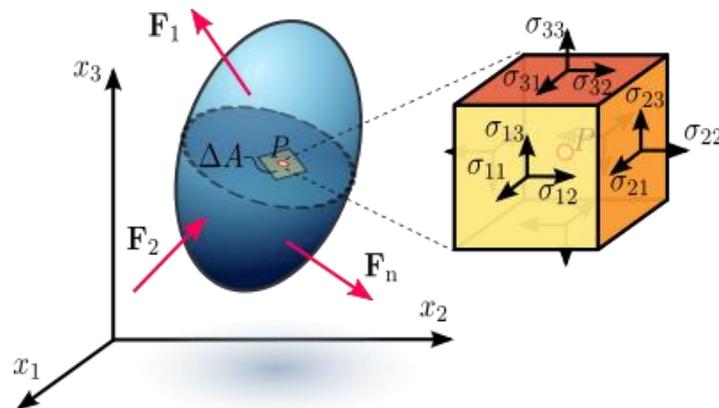
F adalah gaya tegak lurus terhadap potongan $\left(\text{kg} \cdot \frac{m}{s^2} \text{ atau } N\right)$

Tegangan normal terdiri atas dua macam :

1. Tegangan tarik yaitu tegangan normal yang menghasilkan tarikan (*tension*) pada permukaan sebuah benda.
2. Tegangan tekan yaitu tegangan yang memberikan dorongan (*compressive*) pada permukaan sebuah benda [4].

2.4.2 Tegangan Geser

Tegangan geser adalah tegangan yang timbul akibat gaya geser dan gaya puntir atau torsi. Bila gaya aksial atau momen lentur yang bekerja dengan gaya geser atau momen puntir, maka elemen akan mengalami tegangan normal dan geser, hal ini diperlihatkan dalam gambar 2.5 [13].



Gambar 2. 5 Tegangan pada pembebanan elemen [18]

Keterangan gambar 2.5 yaitu :

Dengan sumbu $X_1 = x$; $X_2 = y$; $X_3 = z$ maka cauchy tegangan tensor

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

Dimana $\tau_{xy} = \tau_{yx}$; $\tau_{xz} = \tau_{zx}$; $\tau_{yz} = \tau_{zy}$

σ_x = Tegangan normal yang bekerja pada bidang x dan arah sumbu x.

σ_y = Tegangan normal yang bekerja pada bidang y dan arah sumbu y.

σ_z = Tegangan normal yang bekerja pada bidang z dan arah sumbu z.

τ_{xy} = Tegangan geser yang bekerja pada bidang normal terhadap sumbu x dalam arah sumbu y.

τ_{xz} = Tegangan geser yang bekerja pada bidang normal terhadap sumbu x dalam arah sumbu z.

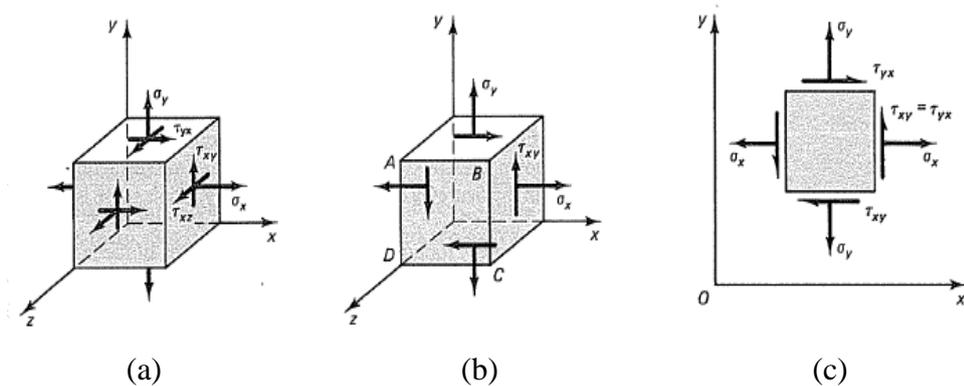
τ_{yx} = Tegangan geser yang bekerja pada bidang normal terhadap sumbu y dalam arah sumbu x.

τ_{yz} = Tegangan geser yang bekerja pada pada bidang normal terhadap sumbu y dalam arah sumbu z.

τ_{zx} = Tegangan geser yang bekerja pada pada bidang normal terhadap sumbu z dalam arah sumbu x.

τ_{zy} = Tegangan geser yang bekerja pada pada bidang normal terhadap sumbu z dalam arah sumbu y [8].

Persamaan transformasi tegangan bidang diperlihatkan dalam gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Tegangan yang bekerja pada sebuah bidang elemen [3]

Perhatian seringkali berpusat pada penentuan tegangan yang paling besar. Pada bidang-bidang dimana terjadi tegangan normal maksimum atau minimum terjadi, maka tidak akan didapatkan tegangan geser. Bidang ini dinamakan bidang utama tegangan (*principal stress*). Secara matematis diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$(\sigma_1, \sigma_2)_{\substack{\text{maks} \\ \text{min}}} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2-5)$$

Tegangan geser maksimum/minimum secara matematis didefinisikan sebagai berikut :

$$(\tau)_{\substack{\text{maks} \\ \text{min}}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2-6)$$

Tidak sebagaimana halnya pada tegangan utama (*principal stress*) di mana pada bidang utama tidak akan terjadi tegangan geser, maka tegangan geser terjadi pada bidang yang biasanya tidak bebas dari tegangan normal. Tegangan normal yang bekerja pada tegangan geser maksimum adalah

$$\sigma' = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \quad (2-7)$$

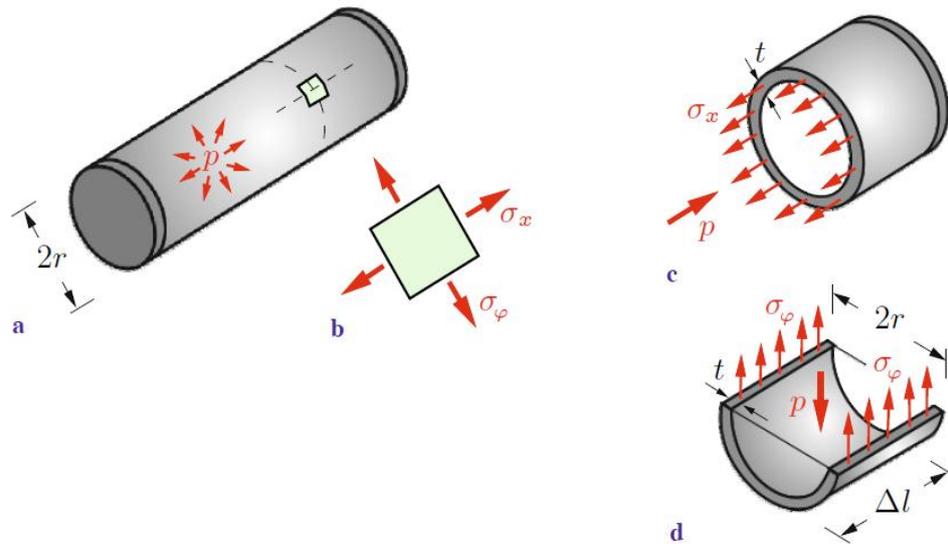
Oleh karena itu tegangan normal bekerja secara bersama dengan tegangan geser maksimum, kecuali jika $\sigma_x + \sigma_y = 0$ dan tegangan utama pada Persamaan 2-8, $\tau_{xy} = 0$ maka akan menjadi

$$(\tau)_{\text{maks}} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \quad (2-8)$$

Kaedah tanda untuk tegangan tarik normal adalah positif, tegangan tekan adalah negatif. Tegangan geser positif didefinisikan sebagai bekerja keatas pada permukaan sebelah kanan dari elemen tersebut [3].

2.4.3 Tegangan Membran

Pada sebuah bejana tekan berdinding tipis dengan jari-jari r dan tebal t ($t \ll r$) dan bejana terkena tekanan internal sebesar p yang mengakibatkan tegangan pada dinding yang perlu untuk diketahui besarnya. Diketahui bahwa $t \ll r$ maka tegangan kearah radial dapat diabaikan, dan tegangan pada dinding bejana seragam, maka terdapat dua tegangan yang saling tegak lurus.



Gambar 2. 7 Diagram benda bebas bejana tekan [3]

Pertama bejana dipotong sejajar dengan sumbu longitudinalnya. Karena terkena tekanan internal, maka pada area πr^2 dengan tekanan konstan sebesar p . jika tegangan longitudinal σ_x konstan sepanjang dinding, maka persamaan keseimbangannya menjadi

$$\begin{aligned}\sigma_x 2\pi r t - p\pi r^2 &= 0 \\ \sigma_x &= \frac{pr}{2t}\end{aligned}\quad (2-9)$$

Seperti pada Gambar 2.7, sekarang dipotong setengah lingkaran dengan panjang Δl . Bagian horizontal dari dinding terkena tegangan sirkumferensial σ_ϕ yang juga konstan terhadap ketebalan dinding, tegangan ini beraksi terhadap gaya $p2r\Delta l$ yang berasal dari tekanan internal, persamaan kesetimbangan pada arah vertikal menjadi

$$\begin{aligned}2\sigma_\phi t\Delta l - p2r\Delta l &= 0 \\ \sigma_\phi &= \frac{pr}{t}\end{aligned}\quad (2-10)$$

Terlihat bahwa tegangan sirkumferensial dua kali dari tegangan longitudinal, itulah mengapa bejana tekan terkena tekanan internal gagal karena retak pada arah

longitudinal, maka sebab itu perhitungan desain bejana tekan menggunakan tegangan sirkumferensial sebagai dasarnya [3].

Untuk tegangan membran pada dinding bejana dengan perhitungan tekanan hidrosatik digunakan perhitungan kesetimbangan tegangan dan gaya pada arah longitudinal dan sirkumferensial.

2.5 Faktor Keamanan

Istilah *safe stress*, *allowable stress* atau *permissible stress* dan *design stress* memiliki pengertian yang sama. Tegangan yang digunakan dalam mendesain sebuah mesin harus memiliki faktor keamanan agar kegagalan tidak terjadi. Tegangan tersebut biasa disebut juga *allowable stress*.

Dibawah batas luluh, deformasi yang dihasilkan proporsional terhadap beban yang dikenakan. Tegangan luluh terjadi ketika beban yang dikenakan menyebabkan adanya deformasi plastis. Sedangkan *ultimate stress* merupakan tegangan maksimum yang mampu dicapai oleh material sebelum mengalami patah.

Faktor keamanan merupakan angka yang harus dipenuhi dalam mendesain tegangan struktur. Untuk memenuhi tujuan ini, faktor keamanan dapat dimasukkan kedalam desain melalui *ultimate stress*, *yield stress*, *endurance limit*, *creep strength* atau kriteria kekuatan lainnya. Pernyataan dari beberapa desainer, bahwa kegagalan terjadi ketika sebuah mesin tidak mampu menjalankan fungsinya dan sebagian besar elemen mesin tidak berjalan sebagaimana mestinya setelah menerima deformasi tetap sehingga diperlukan faktor keamanan dari bagian-bagian elemen mesin dengan kriteria batas luluh.

Di sisi lain, sejak faktor keamanan digunakan oleh desainer selama bertahun-tahun, *ultimate stress* mulai digunakan untuk menentukan faktor keamanan. Tabel 2. 1 memperlihatkan aturan nilai faktor keamanan untuk pemula. Perlu digarisbawahi, bahwa desain tegangan yang sama tidak perlu digunakan ketika faktor keamanan didasarkan pada *ultimate stress* sama ketika desain tegangan didasarkan pada batas luluh [11].

Tujuan menggunakan faktor keamanan adalah untuk menentukan hal sebagai berikut:

- i. Pembebanan maksimum yang akan terjadi pada mesin atau struktur.
- ii. Memperkirakan kekuatan terhadap material yang digunakan.
- iii. Distribusi *actual stress*.
- iv. Penentuan dimensi dari struktur yang akan kita rancang.
- v. Antisipasi terhadap beban berlebih yang mungkin terjadi saat perlakuan tertentu.

Tabel 2. 1 Faktor keamanan menurut tipe pembebanan dan material [11]

<i>Type of Load</i>	<i>Steel, Ductile Metals</i>		<i>Cast irons, brittle metals</i>	<i>Timber</i>
	<i>Based on ultimate stress (σ_u)</i>	<i>Based on elastic limit (σ_y)</i>	<i>Based on ultimate stress (σ_u)</i>	
<i>Dead</i>	3 - 4	1.5 - 2	5 - 6	7
<i>Repeated, one directional, gradual (mild shock)</i>	6	3	7 - 8	10
<i>Repeated, Reserved, gradual (mild shock)</i>	8	4	10 - 12	15
<i>Shock</i>	10 - 15	5 - 7	15 - 20	20

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Ultimate stress atau Yield stress}}{\text{Allowable stress atau Safe stress}}$$

2.6 Analisa Kegagalan

Dalam suatu rekayasa teknik, merupakan hal yang penting menentukan batasan tegangan yang menyebabkan kegagalan dari material tersebut. Dalam menggunakan teori kegagalan yang penting adalah menentukan tegangan utama (*principal stress*). Ada tiga teori kriteria kegagalan statis yang biasa dipakai antara lain:

2.6.1 Teori Tegangan Normal Maksimum

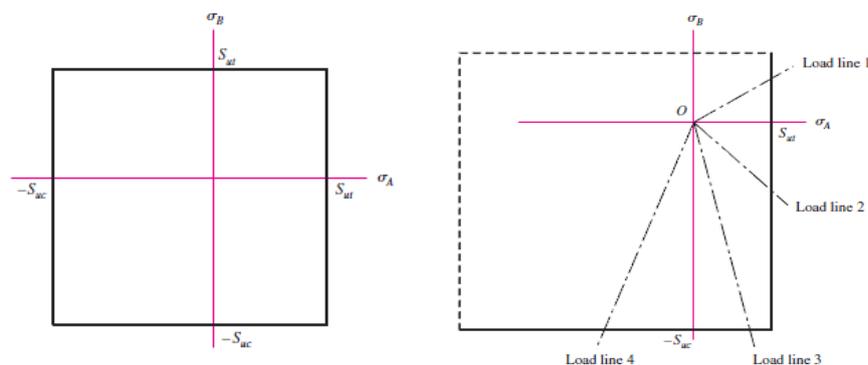
Teori ini menyatakan bahwa kegagalan terjadi bila salah satu dari tegangan utama (*principal stress*) sama dengan kekuatan dari material. Sebagai contoh untuk tegangan utama setiap keadaan disusun dalam bentuk : $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

Jika kriteria kegagalan adalah titik luluh (*yield*), teori ini memperkirakan kegagalan akan terjadi bila :

$$\sigma_1 = S_{yt} \text{ atau } \sigma_3 = -S_{yc} \quad (2-11)$$

Dimana S_{yt} dan S_{yc} adalah kekuatan luluh terhadap gaya tarik dan gaya tekan. Kalau yang dipakai adalah kekuatan akhir, seperti pada bahan yang rapuh, maka kegagalan terjadi jika :

$$\sigma_1 = S_{ut} \text{ atau } \sigma_3 = -S_{uc} \quad (2-12)$$



Gambar 2. 8 Teori tegangan normal maksimum (MNS) dan garis beban

Dari Gambar 2.8, garis beban dapat didefinisikan secara matematis:

$$\begin{aligned}
 \text{Garis beban 1} & \quad ; \sigma_A = \frac{S_{ut}}{n} \text{ dan } \sigma_A \geq \sigma_B \geq 0 \\
 \text{Garis beban 2} & \quad ; \sigma_A \geq 0 \geq \sigma_B \text{ dan } \left| \frac{\sigma_B}{\sigma_A} \right| \leq \frac{S_{uc}}{S_{ut}} \\
 \text{Garis beban 3} & \quad ; \sigma_B = -\frac{S_{uc}}{n} \quad \text{dan } \sigma_A \geq 0 \geq \sigma_B \\
 \text{Garis beban 4} & \quad ; 0 \geq \sigma_A \geq \sigma_B \text{ dan } \left| \frac{\sigma_B}{\sigma_A} \right| > \frac{S_{uc}}{S_{ut}}
 \end{aligned} \tag{2-13}$$

Dengan n adalah faktor keamanan. [1]

2.6.2 Teori Tegangan Geser Maksimum

Teori ini mengatakan bahwa kegagalan akan terjadi bila tegangan geser maksimum pada setiap elemen mesin sama dengan kekuatan geser dari material. Jika tegangan utama disusun dalam bentuk $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ teori tegangan geser maksimal memperkirakan bahwa kegagalan akan terjadi bila :

$$\tau_{maks} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2} \text{ atau } \sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y \tag{2-15}$$

Teori ini menyatakan bahwa kekuatan luluh pada kekuatan geser diberikan oleh persamaan :

$$S_{sy} = 0.5S_y \tag{2-16}$$

2.6.3 Teori Tegangan Von Misses

Teori ini memperkirakan suatu kegagalan mengalah dalam tegangan geser yang memadai lebih besar dari yang diperkirakan oleh teori tegangan geser maksimal. Untuk analisis perancangan akan lebih mudah jika kita menggunakan tegangan *Von Misses* yaitu : (Persamaan yang berkaitan dengan suatu tegangan dalam tiga sumbu) adalah:

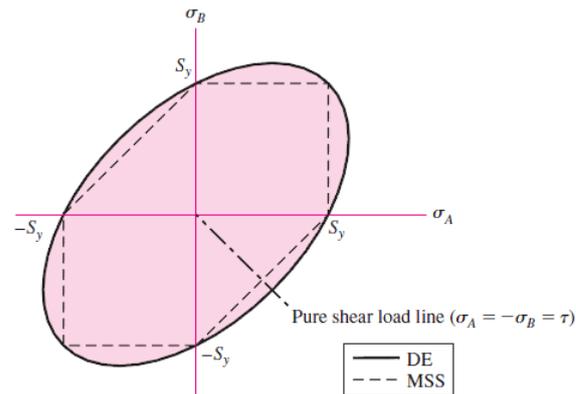
$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2}}$$

(2-17)

Hal ini akan terjadi kegagalan jika:

$$\sigma' \geq S_y$$

(2-18)



Gambar 2. 9 Perbandingan teori tegangan geser maksimum dengan distorsi energi

Dari percobaan – percobaan yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa teori energi distorsi (*Von Mises*) memperkirakan kegagalan dengan ketelitian tertinggi pada semua kuadran [1]

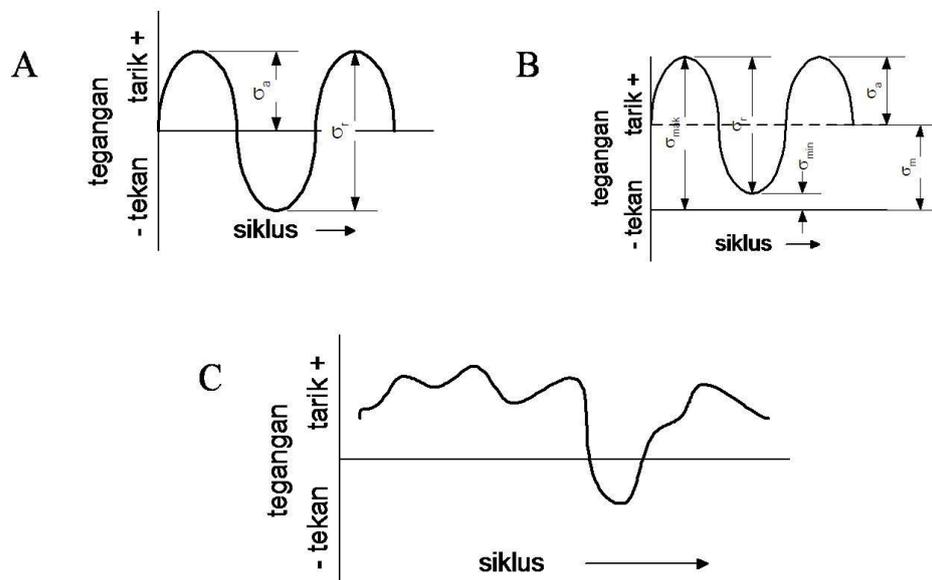
2.6.4 Analisa Kelalahan (*Fatigue*)

Kelelahan (*fatigue*) adalah salah satu fenomena kegagalan material, dimana terjadi kegagalan di bawah beban berulang. Terdapat tiga fase dalam perputahan *fatigue*, yaitu permulaan retak, penyebaran retak, dan patah. *Fatigue* terjadi ketika sebuah bahan telah mengalami siklus tegangan dan regangan yang menghasilkan kerusakan yang permanen dan dapat terjadi di bawah atau di atas tegangan luluh. Telah diketahui secara umum dalam bidang rekayasa, *fatigue* merupakan penyebab utama (sekitar 90%) kegagalan pada struktur.

Kerusakan yang terjadi secara tiba-tiba pada tingkat tegangan di bawah tegangan luluh merupakan alasan penting untuk memasukkan faktor ketahanan *fatigue* dalam perencanaan struktur. Dengan mengetahui kekuatan *fatigue* maka dapat diprediksi umur *fatigue* struktur, dimana hal ini menjadi bahan pertimbangan

dalam pengoperasian dan perawatan dengan tujuan untuk menghindari *un-scheduled shutdown*. Di dalam memprediksi umur *fatigue*, terdapat tiga pendekatan, yaitu pendekatan tegangan (*stress approach*) atau dengan istilah lain pendekatan grafik S-N atau metode umur-tegangan (*stress life method*), pendekatan regangan (*strain approach*) atau istilah lain metode umur-regangan (*strain-life method*), dan pendekatan mekanika patahan (*fracture mechanics*).

Karakteristik kelelahan logam dapat dibedakan menjadi 2 yaitu karakteristik makro dan karakteristik mikro. Karakteristik makro merupakan ciri-ciri kelelahan yang dapat diamati secara visual (dengan mata telanjang atau dengan kaca pembesar). Sedangkan karakteristik mikro hanya dapat diamati dengan menggunakan mikroskop. Suatu bagian dapat dikenakan berbagai macam kondisi pembebanan, termasuk tegangan berfluktuasi, regangan berfluktuasi, temperatur berfluktuasi (*thermal fatigue*), atau dalam kondisi lingkungan korosif atau temperatur tinggi. Kebanyakan kegagalan pemakaian terjadi sebagai akibat tegangan-tegangan tarik. Tiga jenis siklus tegangan yang umum terjadi diperlihatkan pada gambar berikut :



Gambar 2. 10 Jenis siklus regangan [7]

➤ Pembalikan Sempurna (Gambar 2.10.A)

Fluktuasi tegangan berkisar suatu rata-rata (*mean*) nol dengan amplitudo konstan atau beban tegangan bolak-balik (*reversed stress*).

➤ Pengulangan (Gambar 2.10.B)

Fluktuasi tegangan berkisar suatu rata-rata (*mean*) tidak sama dengan nol tetapi dengan amplitudo konstan atau beban tegangan berulang (*repeated stress*).

➤ Rumit (Gambar 2.10.C)

Kedua pertukaran dan rata-rata beban berubah, bisa secara acak maupun berpola tertentu atau beban tegangan tidak beraturan (*random stress*).

Pada penjelasan di atas telah disebutkan tiga macam pendekatan yang digunakan dalam perencanaan dan analisis untuk memprediksi kapan, bilamana, sebuah struktur yang mendapatkan pembebanan berulang akan mengalami kegagalan *fatigue* dalam batas waktu tertentu, yaitu metode umur-tegangan (*stress life method*), metode umur-regangan (*strain-life method*), dan metode mekanika perpatahan (*fracture mechanics*). Masing-masing konsep memiliki keunggulan tergantung pada aplikasinya, walaupun berbeda-beda konsep namun semuanya bertujuan untuk memprediksi umur *fatigue*.

Berdasarkan umur *fatigue* (N), *fatigue* dapat diklasifikasikan menjadi *fatigue* siklus rendah (*low cycles fatigue*) untuk umur *fatigue* $10^0 \leq N \leq 10^3$ dan *fatigue* siklus tinggi (*high cycles fatigue*) untuk umur *fatigue* $N \geq 10^3$. Dua cara pendekatan yang pertama memiliki parameter yang sama, yaitu mengolah parameter beban menjadi fungsi tegangan atau regangan terhadap siklus. Cara pendekatan yang terakhir menggunakan parameter perambatan retak (*crack propagation*) dengan memantau retak mula yang memiliki laju pertumbuhan panjang retak yang proporsional dengan intensitas tegangan yang diterapkan untuk mencapai perpatahan.

Fatigue dapat dibagi menjadi dua kategori, siklus tinggi dan siklus rendah. Pada tegangan-tegangan sangat tinggi (*fatigue* siklus rendah), retakan terbentuk lebih dini, sedangkan pada tegangan-tegangan yang sangat rendah (*fatigue* siklus tinggi), sebagian besar dari umur *fatigue* digunakan untuk memulai suatu retak. Daerah siklus rendah adalah merupakan hasil dari tegangan-tegangan yang cukup tinggi

dimana berkembang menjadi tegangan plastik yang signifikan. Tiga faktor utama penyebab terjadinya kelelahan adalah :

1. Tegangan maksimum bernilai tinggi
2. Variasi tegangan
3. Siklus tegangan yang besar

Selain itu terdapat banyak faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi umur lelah, yaitu:

1. Pembebanan
 - a. Jenis beban : uniaksial, lentur, puntir
 - b. Pola beban : periodik, random
 - c. Besar beban (besar tegangan)
 - d. Frekuensi siklus beban
2. Kondisi Material
 - a. Ukuran butir
 - b. Kekuatan
 - c. Penguatan dengan larutan padat
 - d. Penguatan dengan fasa ke-2
 - e. Penguatan regangan
 - f. Struktur mikro
 - g. Kondisi permukaan (surface finish)
 - h. Ukuran komponen
3. Proses Pengerjaan
 - a. Proses pengecoran
 - b. Proses pembentukan
 - c. Proses pengelasan
 - d. Proses permesinan
 - e. Proses perlakuan panas
4. Temperatur Operasi
5. Kondisi Lingkungan

Dalam merancang suatu komponen, untuk menentukan tegangan aman yang diizinkan, para perancang sering menggunakan cara estimasi umur *fatigue* dengan menggunakan pendekatan tegangan. Metode ini merupakan cara konvensional yang paling simple, mudah dilakukan untuk aplikasi perancangan, sangat baik diterapkan pada kondisi pembebanan elastis, mampu menunjukkan batas rentang pakai yang aman (*safe life*) bahkan tak terhingga (*infinite life*), serta sangat tepat untuk perencanaan komponen pada kondisi *fatigue* siklus tinggi. Namun perlu diperhatikan bahwa metode ini tidak cocok untuk kondisi *fatigue* siklus rendah, karena metode ini tidak dapat menghitung pengaruh tegangan-regangan sebenarnya pada saat terjadi deformasi peluluhan local, terbatas hanya pada material logam, terutama baja, karena pada material tertentu tidak dapat menunjukkan respon data yang tepat bila menggunakan pendekatan ini.

Syarat utama untuk menggunakan metode pendekatan tegangan mengacu pada asumsi perhitungan mekanika benda padat bahwa komposisi material idealnya homogen, kontinyu, dan bebas cacat, atau bebas retak. Tujuan utama menggunakan pendekatan ini pada perencanaan kompoen adalah untuk mendapatkan umur pakai aman bahkan tak terhingga.

Faktor yang mempengaruhi umur *fatigue* :

1. Konsentrasi Tegangan
 - a. Peningkatan tegangan akan menurunkan umur *fatigue*
 - b. Pemicunya dapat secara mekanis (missal : *filet* atau alur pasak) maupun metalurgi (missal : porositas atau inklusi)
 - c. Kegagalan *fatigue* selalu dimulai pada peningkatan tegangan, biasanya pada atau dekat dengan permukaan
 - d. Beberapa faktor lain yang harus dipertimbangkan, seperti sifat-sifat permukaan dan tegangan sisa permukaan
2. Ukuran Struktur
 - a. Meningkatnya ukuran benda uji, umur *fatigue* kadang-kadang menurun
 - b. Kegagalan *fatigue* biasanya dimulai pada permukaan
 - c. Penambahan luas permukaan dari benda uji besar, meningkatkan kemungkinan

di mana terdapat suatu aliran yang akan memulai kegagalan dan menurunkan waktu untuk mulainya retak.

Peningkatan ukuran benda uji juga akan menurunkan gradien tegangan, sehingga lebih banyak bahan akan meningkatkan kemungkinan benda uji menegang lebih tinggi.

Analisis kelelahan (*fatigue*) adalah analisis untuk mengetahui kekuatan struktur terhadap beban yang berulang (siklik). Analisis kelelahan (*fatigue*) ini digunakan untuk memperoleh *service life* dari struktur. *Fatigue failure* adalah kegagalan yang timbul akibat beban yang berulang-ulang. Kegagalan ini biasanya diawali dengan retak (*crack*) serta adanya konsentrasi tegangan, sehingga akan mempercepat terjadinya *fatigue failure*, sehingga menyebabkan perpatahan (*fracture*).

Analisa umur lelah (*fatigue life*) dipengaruhi oleh factor-faktor sebagai berikut:

1. *Endurance Limit*.
2. *Surface Factor*.
3. *Gradient Factor*.
4. *Specimen Endurance Limit*. [7]

2.7 Perancangan Gerbong Barang

Perancangan gerbong barang dilakukan dengan beberapa tahapan seperti penentuan kebutuhan, pembuatan spesifikasi teknis, pembuatan alternatif desain, penentuan gaya yang bekerja, analisa, sampai dengan dokumentasi teknik. Dalam pelaksanaannya, perancangan gerbong tangki, harus dilakukan secara berurutan sesuai dengan tahapan yang benar.

2.7.1 Dasar Perancangan Gerbong Barang

Gaya yang diberikan kepada struktur yang terdapat pada gerbong biasa disebut beban, dan pada setiap desain mekanis, kebutuhan dalam perancangan gerbong adalah menentukan nilai beban aktual yang diberikan pada gerbong tersebut pada saat kondisi operasi. Beban utama yang diterima pada gerbong tersebut dapat dibagi menjadi 2 kondisi yaitu *off the road* dan *on the road*.

A. *Off the road*

Beban yang diterima oleh gerbong yang dilakukan didalam *workshop* dengan standar - standar tertentu yang terdiri dari:

- a. Beban struktur
- b. Beban muatan
- c. Beban tekan
- d. Beban kombinasi

B. *On the road*

Beban yang diterima oleh gerbong saat dilakukan *test run* setelah seluruh komponen di-*assembly*. Beban yang diterima antara lain:

- a. Beban tarik kondisi datar
- b. Beban tarik kondisi tikungan
- c. Beban tarik kondisi tanjakan
- d. Beban tarik dengan percepatan
- e. Beban tarik dengan kombinasi

Kombinasi beban tersebut harus diperkirakan kemungkinan yang paling tepat saat menentukan gerbong agar dapat diperoleh desain yang baik secara ekonomi dan faktor keselamatan.

Secara umum kegagalan dalam gerbong dapat ditelusuri menjadi beberapa bagian yaitu,

1. Material gerbong, seleksi yang tidak tepat saat menentukan material yang digunakan.
2. Desain gerbong, penentuan kondisi desain yang tidak tepat sehingga penentuan dan perhitungan yang dilakukan tidak memadai.
3. Kelebihan beban, yang disebabkan beban tak terduga selama proses pengujian maupun di lapangan.
4. Pembuatan atau pembangunan gerbong, prosedur yang digunakan tidak tepat, perhatian yang lebih harus diberikan pada hal tertentu.

2.7.2 Beban yang diterima pada Gerbong

Secara umum beban yang terjadi pada gerbong dibagi dalam beberapa bagian, yaitu *off the road* dan *on the road*. Beban tersebut akan memberikan pengaruh terhadap gerbong karena akan memberikan gaya, tekanan, ataupun momen terhadap gerbong itu sendiri, oleh karena itu pemilihan dan perhitungan beban pada gerbong sangat penting dalam perancangan gerbong karena akan mempengaruhi ketebalan struktur gerbong yang berarti akan mempengaruhi biaya konstruksi dari gerbong itu sendiri.

2.8 Komponen Utama Gerbong

Komponen struktur gerbong merupakan bagian pada gerbong yang memiliki fungsi masing-masing pada saat beroperasi, komponen utama dalam gerbong antara lain adalah *underframe*, *saddle*, dan tangki.

Dalam penentuan komponen tersebut, terdapat hal-hal yang harus diperhatikan dan diperhitungkan, pada dasarnya komponen tersebut disesuaikan berdasarkan kebutuhan seperti besar beban muatan, volume muatan, dan wujud muatan.

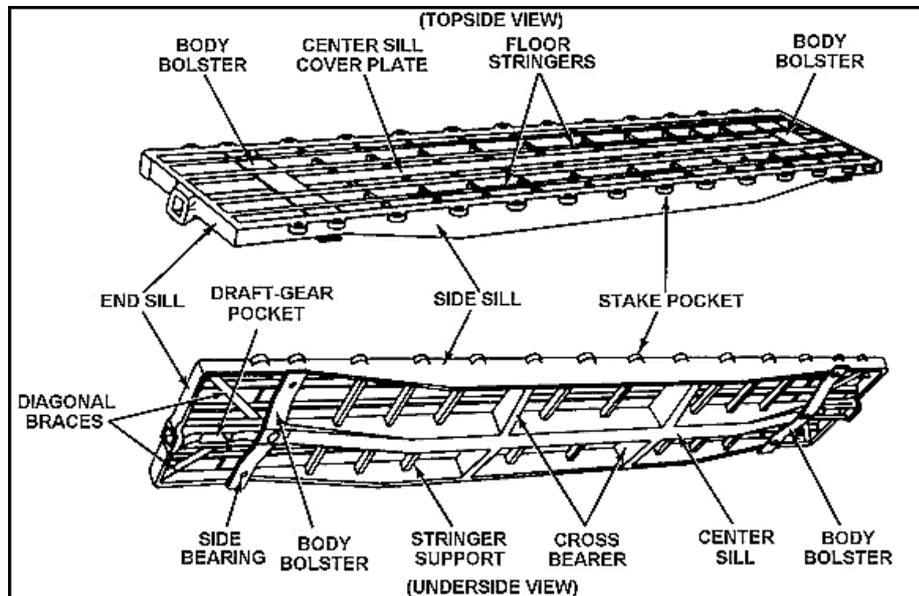
2.8.1 Rangka Dasar (*Undreframe*)

Underframe merupakan struktur yang terdiri dari rangkaian *beam* yang disusun sedemikian rupa agar menyesuaikan bentuk wadah (*body*) untuk menerima gaya berat dari muatan yang diterima terlebih dahulu oleh penguat (*rib*) dan meneruskannya ke *bogie*.

Komponen yang terdapat pada *underframe* antara lain

1. *Center sill*, merupakan beam utama yang berfungsi menerima langsung gaya horizontal
2. *Side sill*, merupakan beam yang terdapat pada sisi *underframe*
3. *End sill*, merupakan beam yang terdapat pada ujung *underframe*
4. *Cross beam*, merupakan beam yang berfungsi sebagai penambah kekakuan *underframe*, terletak ditengah-tengah *underframe* dan melintang terhadap *center sill* dan *side sill*

5. *Bolster*, merupakan tempat bertumpunya boggie.



Gambar 2. 11 Penampang rangka dasar [17]

2.8.2 Dudukan Tangki (*Saddle*)

Saddle berfungsi sebagai tempat bertumpunya tangki yang akan menjaga tangki agar tetap berada pada tempatnya. Besar gaya berat yang diterima oleh wadah (*body*) didistribusikan menuju underframe melalui dudukan (*saddle*). *Saddle* dirancang sedemikian rupa dengan pembagian yang tepat agar besar gaya yang diteruskan dari tangki menuju underframe merata dengan sempurna.

2.8.3 Wadah Tangki (*Tank*)

Wadah merupakan bagian yang berkontak langsung dengan muatan, dimana gaya dari muatan ditampung oleh wadah dan diteruskan ke penguat dan rangka dasar. Ketebalan plat wadah sangat mempengaruhi tegangan, defleksi maupun umur gerbong.

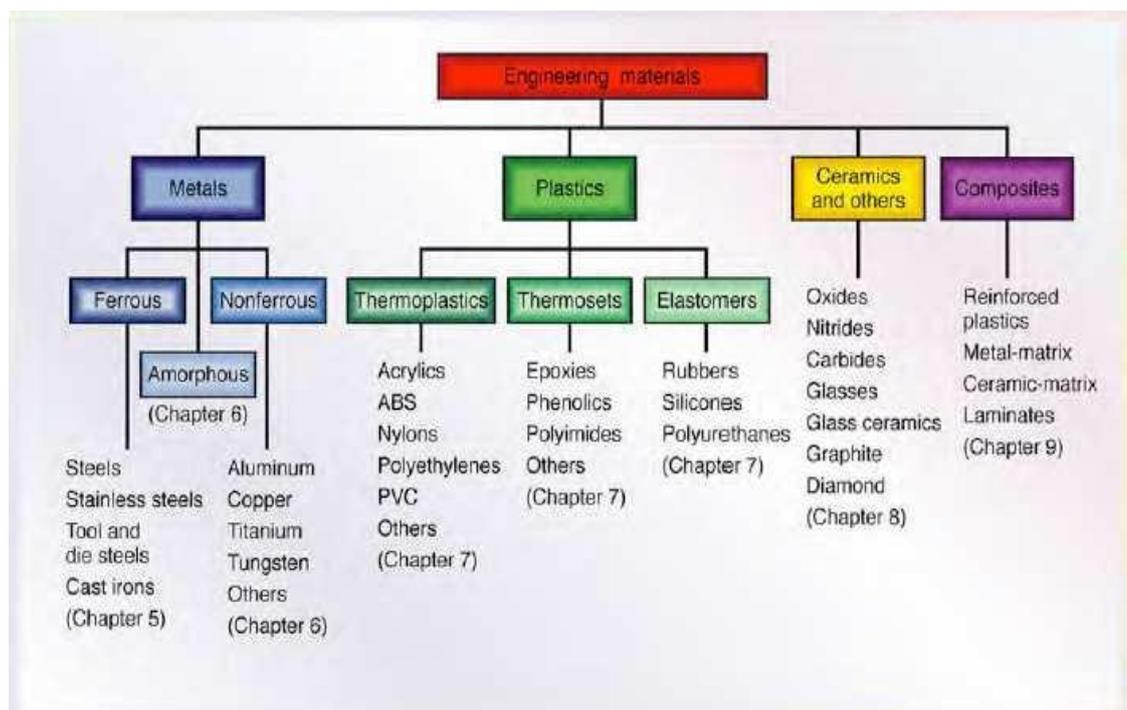
2.9 Pemilihan Material

Selain bentuk desain dan dimensi, penentuan material untuk proses pembuatan gerbong barang juga sangatlah penting. Perlu berbagai macam dasar untuk menentukan

material apakah yang akan digunakan untuk membuat konstruksi gerbong. Setiap material memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Komposisi kimia, *density*, modulus elastisitas, *tensile strength*, *yield strength*, dan *hardness* dari setiap material juga sangat berbeda-beda.

Semua itu harus ditentukan secara tepat untuk bisa mendapatkan hasil yang bagus. Secara garis besar material dibagi dalam beberapa kelompok besar. Fungsi yang spesifik dari material bisa ditentukan apabila induk materialnya sudah diketahui. Setiap material mempunyai struktur, *mechanical properties*, *physical properties*, dan *modification properties* yang berbeda-beda.

Semua klasifikasi ini dapat diketahui berdasarkan pengelompokan *engineering material*. *Breakdown* material bisa dilihat dalam *flowchart* seperti gambar di bawah ini :



Gambar 2. 12 Klasifikasi material

Berbagai macam jenis *properties* dari setiap material juga bisa dijadikan dasar dalam pemilihan materialnya. Karena dari data tersebut bisa diketahui nilai tegangan, *yield strength*, *ultimate tensile strength*, *poison ratio*, dan lain sebagainya. Material yang akan dipilih datanya tidak boleh melebihi data yang ada pada tabel material

properties sehingga keamanan dari konstruksi gerbong bisa lebih terjaga. *Physical properties* material juga akan menunjang dalam memilih material yang akan digunakan.

Pada intinya, sebelum melakukan pemilihan material harus ada dasar ataupun data-data yang bisa mendukung alasan pemilihan material tersebut. Namun ada hal penting juga yang tidak boleh dilewatkan yaitu masalah *cost*. Material yang *mechanical properties*nya bagus belum tentu harganya murah sehingga hal ini bisa menjadi bahan pertimbangan juga. Material yang ada harus disesuaikan dengan aplikasinya sehingga semuanya akan menjadi seimbang, baik itu masalah *mechanical properties*, *physical properties*, serta *cost* dari material itu sendiri karena untuk pembuatan unit *cross beam* yang banyak juga akan membutuhkan material yang banyak pula [7].

Tabel 2. 2 *Mechanical properties*. [7]

Mechanical Properties of Various Materials at Room Temperature					
Metals (Wrought)	<i>E</i> (GPa)	<i>Y</i> (MPa)	UTS (MPa)	Elongation in 50 mm (%)	Poisson's ratio (ν)
Aluminum and its alloys	69 –79	35 –550	90 –600	45 –4	0.31 –0.34
Copper and its alloys	105 –150	76 –1100	140 –1310	65 –3	0.33 –0.35
Lead and its alloys	14	14	20 –55	50 –9	0.43
Magnesium and its alloys	41 –45	130 –305	240 –380	21 –5	0.29 –0.35
Molybdenum and its alloys	330 –360	80 –2070	90 –2340	40 –30	0.32
Nickel and its alloys	180 –214	105 –1200	345 –1450	60 –5	0.31
Steels	190 –200	205 –1725	415 –1750	65 –2	0.28 –0.33
Titanium and its alloys	80 –130	344 –1380	415 –1450	25 –7	0.31 –0.34
Tungsten and its alloys	350 –400	550 –690	620 –760	0	0.27
Zinc and its alloys	50	25 –180	240 –550	65 –5	0.27
Nonmetallic Materials					
Ceramics	70 –1000	—	140 –2600	0	0.2
Diamond	820 –1050	—	—	—	—
Glass and porcelain	70 –80	—	140	0	0.24
Silicon carbide (SiC)	200 –500	—	310 –400	—	0.19
Silicon nitride	280 –310	—	160 –580	—	0.26
Rubbers	0.01 –0.1	—	—	—	0.5
Thermoplastics	1.4 –3.4	—	7 –80	1000 –5	0.32 –0.40
Thermoplastics, reinforced	2 –50	—	20 –120	10 –1	—
Thermosets	3.5 –17	—	35 –170	0	0.34
Boron fibers	380	—	3500	0	—
Carbon fibers	275 –415	—	2000 –3000	0	—
Glass fibers	73 –85	—	3500 –4600	0	—
Kevlar fibers	62 –117	—	2800	0	—
Spectra Fibers	73 –100	—	2400 –2800	3	—

Note: In the upper table, the lowest values for *E*, *Y*, and UTS and the highest values for elongation are for pure metals. Multiply gigapascals (GPa) by 145,000 to obtain pounds per square in. (psi) and megapascals (MPa) by 145 to obtain psi.

Tabel 2. 3 *Physical properties* [7]

Physical Properties of Various Materials at Room Temperature					
Material	Density (kg/m ³)	Melting point (°C)	Specific heat (J/kg K)	Thermal conductivity (W/m K)	Coefficient of thermal expansion (μm/m°C)
Metallic					
Aluminum	2700	660	900	222	23.6
Aluminum alloys	2630–2820	476–654	880–920	121–239	23.0–23.6
Beryllium	1854	1278	1884	146	8.5
Columbium (niobium)	8580	2468	272	52	7.1
Copper	8970	1082	385	393	16.5
Copper alloys	7470–8940	885–1260	337–435	29–234	16.5–20
Gold	19300	1063	129	317	19.3
Iron	7860	1537	460	74	11.5
Steels	6920–9130	1371–1532	448–502	15–52	11.7–17.3
Lead	11350	327	130	35	29.4
Lead alloys	8850–11350	182–326	126–188	24–46	27.1–31.1
Magnesium	1745	650	1025	154	26.0
Magnesium alloys	1770–1780	610–621	1046	75–138	26.0
Molybdenum alloys	10210	2610	276	142	5.1
Nickel	8910	1453	440	92	13.3
Nickel alloys	7750–8850	1110–1454	381–544	12–63	12.7–18.4
Silicon	2330	1423	712	148	7.63
Silver	10500	961	235	429	19.3
Tantalum alloys	16600	2996	142	54	6.5
Titanium	4510	1668	519	17	8.35
Titanium alloys	4430–4700	1549–1649	502–544	8–12	8.1–9.5
Tungsten	19290	3410	138	166	4.5
Nonmetallic					
Ceramics	2300–5500	—	750–950	10–17	5.5–13.5
Glasses	2400–2700	580–1540	500–850	0.6–1.7	4.6–70
Graphite	1900–2200	—	840	5–10	7.86
Plastics	900–2000	110–330	1000–2000	0.1–0.4	72–200
Wood	400–700	—	2400–2800	0.1–0.4	2–60

Tabel 2. 4 *Cost material*

Approximate Cost per Unit Volume for Wrought Metals and Polymers Relative to Cost of Carbon Steel			
Gold	60,000	Aluminum alloys	2-3
Silver	600	High-strength low-alloy steels	1.4
Molybdenum alloys	20-250	Gray cast iron	1.2
Nickel	35	Carbon steel	1
Titanium alloys	20-40	Nylons, acetals, and silicon	1.1-2
Copper alloys	5-6	Rubber	0.2-1
Stainless steels	2-9	Other plastics and elastomers*	0.2-2
Magnesium alloys	2-4		

* As molding compounds

Note: Costs vary significantly with quantity purchased, supply and demand, size and shape, and various other factors.

Material yang digunakan dalam pembuatan gerbong barang adalah baja SM 490A dan baja SS 400 standar JIS G3106 (*Japanese Industrial Standards*). Material ini memiliki karakterisasi sebagai berikut:

A. SM 490A/SS 490

SM 490A biasa digunakan pada dunia *engineering* dan industri konstruksi, SM 490A mempunyai kekuatan luluh dan kekuatan tarik yang tinggi disertakan dengan berbagai perawatan dan pilihan uji membuat SM 490A paling sering digunakan dalam sebuah proyek konstruksi.

Berikut adalah analisa komposisi plat logam SM 490A berdasarkan [%] massa

❖ *Chemical Composition*

<i>Carbon (C)</i>	0.240 %
<i>Silicon (Si)</i>	0.550 %
<i>Manganese (Mn)</i>	1.600 %
<i>Phosphorus (P)</i>	0.045 %
<i>Sulphur (S)</i>	0.045 %

❖ *Mechanical Properties*

<i>Density</i>	7850 kg/m ³
<i>Young's Modulus</i>	210 GPa
<i>Ultimate Tensile Strength</i>	490 MPa
<i>Yield Strength</i>	325 MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,3

❖ *Hardness*

<i>Brinell Hardness</i>	160
-------------------------	-----

❖ *Equivalents*

<i>DIN Equivalents for JIS SS400</i>	ST52-3
<i>ASTM Equivalents for JIS SM490A</i>	ASTM A36 ASTM A572GR50

<i>EN Equivalents for JIS</i>	EN S275
<i>SM490A</i>	FE 510 B

❖ *Melting Point*

Melting point: 1430°C

B. SS 400

Plat baja JIS3101 SS400, plat baja SS400 adalah salah satu baja campuran karbon rendah. Plat baja SS400 dapat digunakan untuk konstruksi peti kemas (containers).

Material ini memiliki karakterisasi sebagai berikut :

❖ *Chemical Composition*

<i>Carbon (C)</i>	0.170-0.200 %
<i>Silicon (Si)</i>	Dalam jumlah kecil
<i>Manganese (Mn)</i>	1.400 %
<i>Phosphorus (P)</i>	0.045 %
<i>Sulphur (S)</i>	0.045 %

❖ *Mechanical Properties*

<i>Density</i>	7860 kg/m ³
<i>Young's Modulus</i>	207 GPa
<i>Ultimate Tensile Strength</i>	400 MPa
<i>Yield Strength</i>	245 MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,3

❖ *Hardness*

<i>Brinell Hardness</i>	160
-------------------------	-----

❖ *Equivalents*

<i>DIN Equivalents for JIS SS400</i>	17100 St 44-2
--------------------------------------	---------------

<i>ASTM Equivalents for JIS SS400</i>	ASTM A36 ASTM A283 Grade D
<i>EN Equivalents for JIS SS400</i>	EN S275 EN BS43A

❖ *Melting Point*

Melting point : 1430°C

Alasan memilih material diatas yaitu:

1. Banyak terdapat di pasaran sehingga mudah didapat
2. Memiliki *yield strength* dan *ultimate strength* yang cukup tinggi
3. Harganya relatif murah

2.10 Metode Elemen Hingga

2.10.1 Pengenalan Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan salah satu cara dalam menyelesaikan masalah yang terdapat di alam dengan solusi numerik. Biasanya kejadian di alam dapat dijelaskan dalam persamaan baik itu dalam bentuk differensial atau integral. Karena alasan tersebut metode elemen hingga menjadi salah satu cara dalam menyelesaikan bentuk differensial parsial dan integral. Umumnya metode elemen hingga memungkinkan pengguna untuk mendapatkan evolusi dalam ruang atau waktu dari satu atau lebih variabel yang mewakili dari suatu sistem fisik.

Bila mengacu pada analisa struktur, metode elemen hingga merupakan metode yang baik dalam menghitung *displacement*, tegangan, dan regangan pada suatu struktur dalam pembebanan tertentu. [10]

Metode elemen hingga membagi (diskrit) struktur menjadi kecil tetapi terbatas, yang didefinisikan dengan baik, substruktur elastik (elemen). Dengan menggunakan fungsi polynomial dan dengan operasi matriks, perilaku elastis setiap elemen terus menerus dikembangkan dalam hal material elemen dan sifat geometris. Beban dapat diterapkan dalam elemen (gravitasi, dinamis, termal, dll), pada permukaan elemen, atau di nodal elemen. Nodal elemen adalah yang mengatur dasar elemen, karena

nodal di elemen menghubungkan elemen unsur lain, dimana sifat elastis dari elemen yang akhirnya perlihatkan, jika kondisi batas yang ditetapkan, dan akhirnya diterapkan. Sebuah node memiliki derajat kebebasan. Derajat kebebasan adalah gerak translasi dan rotasi independen yang ada di nodal. Sebagian besar, nodal dapat memiliki tiga gerak translasi dan tiga gerak rotasi dari derajat kebebasan. Setelah setiap elemen dalam struktur didefinisikan secara lokal dalam bentuk matriks, kemudian elemen disatukan secara global melalui node mereka ke dalam sistem matriks secara keseluruhan. Kemudian penerapan beban dan kondisi batas ditentukan melalui operasi matriks, nilai dari semua perpindahan derajat kebebasan tidak diketahui sehingga harus ditentukan. Setelah hal itu dilakukan, hal ini menjadi masalah sederhana untuk menggunakan perpindahan dalam menentukan regangan dan tegangan di dalam persamaan konstitutif melalui elastisitas.

Metode elemen hingga adalah metode numerik domain diskritisasi dari struktur secara berkelanjutan sehingga kesalahan pun mungkin terjadi. Kesalahannya yaitu :

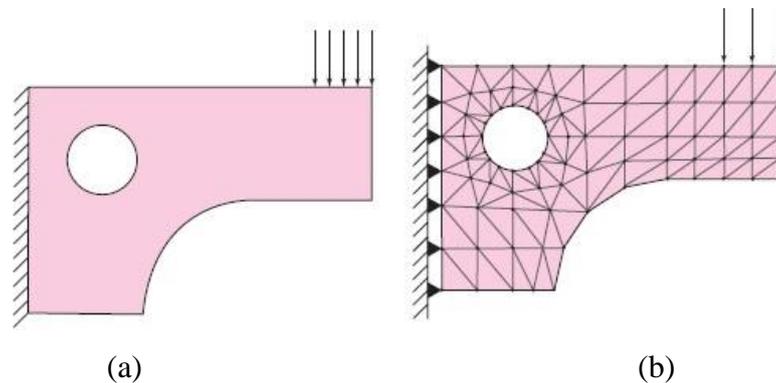
1. Kesalahan komputasi

Kesalahan ini adalah karena perhitungan komputer dan formulasi dari skema integrasi numerik yang digunakan. Untuk tujuan komersial kebanyakan kode batasan elemen adalah berkonsentrasi pada pengurangan dalam kesalahan ini dan akibatnya analisis umumnya berkaitan dengan diskritisasi faktor.

2. Kesalahan diskritisasi

Geometri dan distribusi perpindahan struktur yang sebenarnya terus menerus bervariasi. Menggunakan jumlah elemen terbatas untuk model struktur dapat menerangkan kesalahan dalam pencocokan geometri dan distribusi perpindahan karena keterbatasan matematika yang melekat pada elemen.

Berikut ini adalah contoh kesalahan dalam diskritisasi dengan ketebalan yang konstan pada struktur plat tipis ditunjukkan pada Gambar 2.13 (a) dan (b) :



Gambar 2. 13 (a) Pemberian beban pada suatu plat, (b) Model elemen hingga

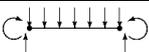
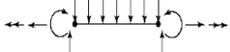
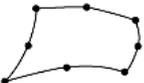
Elemen struktur dimodelkan dengan elemen hingga dengan menerapkan tiga nodal, tegangan bidang, elemen segitiga sederhana. Tipe elemen tersebut memiliki lubang dengan dua masalah dasar. Elemen yang memiliki sisi lurus tetap lurus setelah deformasi. Regangan seluruh bidang (*plane stress*) elemen segitiga adalah konstan. Masalah pertama, geometri dimodelkan dengan kurva lengkung tepi. Catatan bahwa model permukaan dengan besar kelengkungan terlihat kurang dimodelkan, sedangkan permukaan lubang tampaknya cukup dimodelkan. Masalah kedua, yang jauh lebih parah, adalah bahwa regangan di berbagai daerah struktur sebenarnya berubah dengan cepat, dan konstanta elemen regangan hanya akan memberikan perkiraan dari regangan rata-rata di tengah elemen. Jadi secara singkatnya, hasil diprediksi model ini akan sangat kurang. Hasilnya dapat ditingkatkan secara signifikan dengan meningkatkan jumlah elemen (kerapatan mesh) atau menggunakan elemen yang lebih baik, seperti segiempat delapan nodal, yang lebih cocok untuk aplikasi ini, sehingga akan memberikan peningkatan hasil. Karena interpolasi fungsi orde tinggi yaitu delapan nodal elemen segiempat dapat dimodelkan lengkung tepi dan menyediakan fungsi tingkat tinggi untuk distribusi regangan. [1].

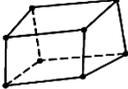
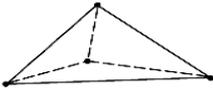
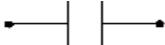
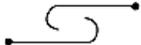
2.10.2 Geometri Elemen

Banyak bentuk geometris elemen yang digunakan dalam analisis elemen hingga untuk aplikasi tertentu. Berbagai elemen yang digunakan dalam *software FEM* komersial umumnya membentuk kesepakatan kode sebagai referensi seperti

perpustakaan kode elemen. Elemen dapat ditempatkan dalam kategori berikut: elemen garis, elemen permukaan, elemen solid, dan elemen tujuan khusus. Tabel 2.5 menyajikan beberapa tipe elemen hingga dalam analisa struktur :

Tabel 2. 5 Tipe elemen dalam metode elemen hingga

Tipe Elemen	Nama	Bentuk	Jumlah Nodal	Aplikasi
Garis	<i>Truss</i>		2	Batang ditekan atau ditarik.
	<i>Beam</i>		2	Tekuk
	<i>Frame</i>		2	Aksial, puntiran, tekuk, dengan atau tanpa beban kekauan.
Permukaan	<i>4-node quadrilateral</i>		4	Tegangan/regangan bidang, <i>axisymetry</i> , <i>shear panel</i> , tekuk pada plat tipis datar.
	<i>8-node quadrilateral</i>		8	Tegangan/regangan bidang, tekuk pada plat tipis atau <i>shell</i> .
	<i>3-node triangular</i>		3	Tegangan/regangan bidang, <i>axisymetry</i> , <i>shear panel</i> , tekuk pada plat tipis datar, bila mungkin, pemakaian elemen <i>quad</i> lebih diutamakan, digunakan untuk transisi.
	<i>6-node triangular</i>		6	Tegangan/regangan bidang, <i>axisymetriy</i> , tekuk pada plat tipis atau <i>shell</i> , bila mungkin, pemakaian elemen <i>quad</i> lebih

				diutamakan, digunakan untuk transisi.
Solid	<i>8-node hexagonal (brick)</i>		8	Solid, plat tebal.
	<i>3-node tetrahedron (tet)</i>		3	Solid, plat tebal, untuk transisi.
Tujuan Khusus	<i>Gap</i>		2	Bebas perpindahan untuk pendefinisian beda tekanan.
	<i>Hook</i>		2	Bebas perpindahan untuk pendefinisian beda perluasan (<i>extension</i>).

[1]