

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Teori Dasar Perancangan

Menurut Harsokoesoemo (2004), perancangan adalah kegiatan awal dari suatu rangkaian kegiatan dalam proses pembuatan produk. Dalam tahap perancangan tersebut dibuat keputusan-keputusan penting yang mempengaruhi tahap kegiatan-kegiatan lain yang menyusulnya. Diantara keputusan penting tersebut termasuk keputusan yang membawa akibat apakah industri dalam negeri dapat berpartisipasi atau tidak dalam suatu pembangunan proyek. Hal tersebut menandakan betapa pentingnya keahlian merancang harus dikuasai oleh orang-orang Indonesia.

Dalam melaksanakan tugas merancang, perancang menggunakan dan memanfaatkan ilmu dasar teknik, hasil-hasil penelitian, informasi dan teknologi, yang semuanya dalam versi pengembangan dan kemajuan yang mutakhir. Kegiatan perancangan dimulai dengan pemikiran manusia tentang kebutuhan akan suatu produk, dilanjutkan dengan pembuatan konsep produk tersebut, dan berikutnya masuk dalam tahap perancangan, pengembangan, dan penyempurnaan produk. Setelah produk disempurnakan, maka akan masuk tahap pembuatan dan berakhir pada tahap pendistribusian produk (Harsokoesoemo, 2004).

Perancangan dan pembuatan produk merupakan dua kegiatan manunggal. Artinya rancangan hasil kerja tidak akan berguna jika rancangan tersebut tidak dibuat, sebaliknya pembuat tidak dapat merealisasikan benda teknik tanpa terlebih dahulu dibuat gambar rancangannya. Gambar hasil rancangan produk adalah hasil akhir dari tahap perancangan dan merupakan dasar pembuatan produk oleh pembuat produk. Gambar teknik adalah alat penghubung atau alat komunikasi antara perancang dengan pembuat produk, serta antara semua orang yang terlibat dalam kegiatan perancangan dan pembuatan. Sehingga gambar teknik merupakan bahasa *universal* yang biasa digunakan dalam kegiatan dan komunikasi antara orang-orang teknik (Harsokoesoemo, 2004).

### **2.1.1. Fase Dalam Perancangan Produk**

Menurut Harsokoesoemo (2004), perancangan merupakan rangkaian kegiatan yang berurutan, karena mencakup seluruh kegiatan yang terdapat dalam proses perancangan. Kegiatan-kegiatan dalam proses perancangan tersebut dinamakan fase. Fase-fase dalam proses perancangan berbeda satu dengan yang lainnya. Setiap fase dari proses perancangan tersebut masih terdiri dari beberapa kegiatan yang dinamakan langkah-langkah dalam fase. Proses perancangan tersebut berlangsung melalui kegiatan-kegiatan dalam fase yang berurutan, yaitu :

- a. Diidentifikasinya kebutuhan
- b. Analisis masalah, perencanaan proyek, dan penyusunan spesifikasi teknis produk.
- c. Perancangan konsep produk.
- d. Perancangan produk.
- e. Evaluasi produk hasil perancangan.
- f. Penyusunan dokumen berupa gambar produk hasil rancangan dan spesifikasi pembuatan produk.

### **2.2. Definisi *Carbody* Lokomotif**

Lokomotif adalah kendaraan rel yang mempunyai penggerak mula di dalam atau di luar lokomotif itu sendiri dan berfungsi untuk menarik kendaraan rel lain baik berupa kereta penumpang, gerbong barang atau kendaraan rel lain. Menurut Undang-Undang tentang Perkeretaapian Nomor 23 Tahun 2007, lokomotif adalah sarana perkeretaapian yang memiliki penggerak sendiri yang bergerak dan digunakan untuk menarik dan atau mendorong kereta, gerbong, dan atau peralatan khusus. Lokomotif terletak paling depan dari rangkaian kereta api. Ditinjau dari segi mesin penggerak mula sebagai pembangkit daya, terdapat beberapa jenis lokomotif yaitu (Hartono, 1999) :

- a. Lokomotif Uap

Adalah lokomotif yang mempunyai penggerak mula mesin uap. Di Indonesia lokomotif uap pernah menjadi tulang punggung penarik kereta api sampai tahun

1970. Saat ini hanya tinggal satu buah di Ambarawa untuk menarik kereta api wisata melalui rel bergigi, lokomotif yang lain masih ada beberapa di museum.

b. Lokomotif Listrik

Adalah lokomotif yang menggunakan tenaga listrik sebagai penggerak dan tenaga listrik ini dibangkitkan di luar lokomotif kemudian disalurkan melalui jaringan kawat aliran atas. Di Indonesia pernah menggunakan lokomotif listrik di lintas Jakarta – Bogor sejak tahun 1925 sampai sekitar tahun 1960.

c. Lokomotif Diesel

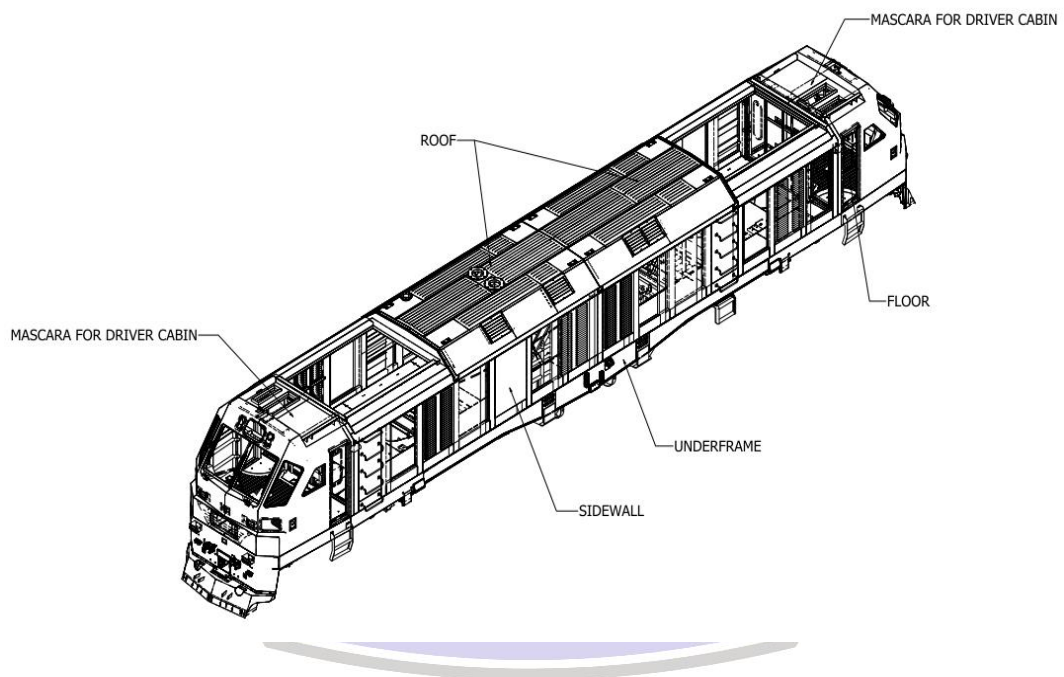
Adalah lokomotif yang menggunakan motor diesel sebagai penggerak mula. Di Indonesia lokomotif diesel digunakan sejak tahun 1955 yang secara bertahap bertambah untuk menggunakan lokomotif diesel. Saat ini di Indonesia digunakan lokomotif diesel hidrolik dan diesel elektrik.

Lokomotif dibangun oleh rangka bawah (*underframe*) yang berfungsi sebagai pendukung dan di atasnya dibangun suatu kabin yang terdiri dari kabin mesin (*engine cab's*) dan kabin pengemudi (*driver's cab*). Lokomotif terdiri atas konstruksi dan komponen yang meliputi rangka dasar, badan lokomotif, kabin masinis, *bogie*, peralatan penerus daya, peralatan penggerak (sumber tenaga), peralatan pengereman, peralatan perangkai, peralatan pengendali, peralatan keselamatan, dan peralatan penghalau rintangan.

Badan lokomotif (*carbody*) merupakan satu kesatuan konstruksi yang ringan berupa konstruksi baja yang dilas, memiliki kekuatan dan kekakuan tinggi terhadap pembebanan dinamis tanpa terjadi perubahan bentuk (deformasi) tetap. Konstruksi badan lokomotif (*carbody*) dapat berupa konstruksi menyatu (*monocoque* atau *semi monocoque*) atau tidak menyatu dengan rangka dasar (*platform*). Artinya rangka dasar dan kabin merupakan satu kesatuan atau merupakan konstruksi yang dapat dipasang dan dilepas. *Carbody* lokomotif dirancang sebagai konstruksi tahan benturan, tahan terhadap korosi dan perubahan cuaca, mampu meredam kebisingan, kokoh dan ringan, serta memudahkan pemeriksaan dan perawatan.

### 2.3. Komponen *Carbody* Lokomotif

Badan lokomotif dirancang sebagai satu kesatuan konstruksi *semi monocoque* yang menyatu dengan rangka dasar (*underframe*). Bagian utama badan lokomotif (*carbody*) terdiri dari rangka dasar (*underframe*), lantai (*floor*), rangka dinding samping (*side wall*), rangka atap (*roof*), dan maskara untuk kabin masinis (*maskara for driver cabin*). Rangka dasar (*underframe*) dan badan kereta (*carbody*) bagian luar dirakit dengan lengkung positif (*chamber*) agar badan kereta tidak melengkung ke bawah ketika diberi beban muatan. Badan kereta (*carbody*) dirancang agar bisa diangkat dengan dongkrak dan derek (*crane*) tanpa terjadi perubahan bentuk (*deformasi*) tetap pada konstruksi.



Gambar 2.1 Komponen Struktur *Carbody* Lokomotif

Sumber : PT INKA (Persero)

### 2.3.1. Rangka Dasar (*Underframe*)

Rangka dasar (*underframe*) merupakan struktur yang dirancang sebagai konstruksi baja yang dilas. Konstruksi ini terbuat dari baja karbon atau material lain yang mempunyai kekuatan dan kekakuan yang tinggi terhadap pembebanan dinamis tanpa terjadi deformasi tetap yang dilengkapi dengan konstruksi tahan benturan (*collision post*). *Underframe* merupakan bagian paling penting dari sebuah konstruksi kereta, yang ditempati oleh badan kereta (*carbody*) beserta beban yang diangkut sehingga *underframe* tersebut harus cukup kuat menahan beban yang terjadi. Rangka dasar (*underframe*) bertumpu pada perangkat roda langsung pada gandar atau dengan perantara *bogie*. Konstruksi rangka dasar (*underframe*) ini terdiri dari beberapa bagian sebagai berikut :

a. *Side sill*

Merupakan balok (*beam*) yang terletak pada bagian sisi samping *underframe*.

b. *Center sill*

Merupakan balok (*beam*) utama yang berfungsi untuk menerima langsung gaya horizontal.

c. *Cross beam*

Merupakan balok (*beam*) yang terletak di tengah *underframe* dan melintang berfungsi sebagai penambah kekakuan *underframe*.

d. *End beam*

Merupakan balok (*beam*) yang terdapat pada ujung *underframe*.

e. *Bolster*

Merupakan rangka penyangga badan kereta (*carbody*) dan tempat bertumpunya *bogie*.

f. *Collision post*

Merupakan konstruksi baja yang terdapat di ujung *underframe* berfungsi sebagai konstruksi tahan benturan untuk keamanan kendaraan saat terjadi tumbukan.

g. Tangki bahan bakar

Merupakan konstruksi pelat baja dengan bentuk penampang segi empat yang terintegrasi dengan *underframe* bagian tengah.

### **2.3.2. Lantai (*Floor*)**

Konstruksi lantai (*floor*) untuk ruang kabin dirancang sebagai lantai yang tahan terhadap panas, air, dan mampu meredam suara getaran. Lantai ini terbuat dari bahan pelat baja bergelombang dan ditutup dengan bahan *Unitex* yang dilapisi vinil. Lantai ruangan pada bagian yang lainnya terbuat dari pelat baja kembang (*checkered plate*).

### **2.3.3. Dinding Samping (*Side Wall*)**

Struktur dinding samping (*side wall*) terdiri dari rangka baja vertikal memanjang (*side wall frame*) dan panel dinding samping (*sheeting*) yang dirancang untuk menahan beban dari atap (*roof*) dan komponen yang terdapat di atap. Selain itu, dinding samping (*side wall*) harus cukup kuat dan rigid untuk mempertahankan bentuk *carbody* tanpa terjadi deformasi selama mendongkrak dan mengangkat. Dinding samping (*side wall*) juga dilengkapi konstruksi untuk pintu masuk kabin masinis, jendela, lampu, dan pintu untuk perawatan serta ventilasi udara guna mengalirkan udara panas di dalam ruang mesin.

### **2.3.4. Rangka Atap (*Roof*)**

Atap (*roof*) kereta merupakan konstruksi baja yang dilas dengan susunan longitudinal dan vertikal. Atap (*roof*) terdiri dari rangka baja melintang (*carline*) dan memanjang (*purline*) serta panel atap. Konstruksi atap (*roof*) lokomotif dirancang sebagai bagian yang dapat dibuka untuk memudahkan perawatan.

### **2.3.5. Kabin Masinis (*Driver's Cabin*)**

Kabin masinis (*driver's cabin*) terletak di ujung depan dan belakang lokomotif. Konstruksi ujung kabin dirancang dengan bentuk estetis serta cukup kuat dan rigid sebagai bagian dari konstruksi badan lokomotif (*carbody*). Kabin masinis atau kabin pengemudi terdiri dari *roof*, *side wall*, dan *end wall* serta dilengkapi dengan dua kursi dan berbagai peralatan untuk mengontrol pengoperasian lokomotif. Kabin masinis dipisahkan dari ruang mesin. Struktur kabin masinis dilengkapi dengan pintu masuk pengemudi, pintu penghubung partisi ruang mesin, kaca depan, dan jendela samping. Setiap kabin masinis memiliki unit pendingin ruangan (*air conditioner unit*) yang dipasang di atap kabin.

Kabin pengemudi pada lokomotif ada tiga jenis apabila ditinjau dari posisinya, yaitu (Hartono, 1999) :

- a. Kabin pengemudi yang dipasang pada kedua ujung lokomotif (*double cabin*).  
Pada setiap kabin pengemudi dipasang satu buah meja pengendali (*control desk*).
- b. Kabin pengemudi yang dipasang pada salah satu ujung yang dapat mengawasi dua arah. Pada kabin pengemudi dipasang dua buah meja pengendali yang dioperasikan sesuai dengan arah jalannya lokomotif. Namun ada juga lokomotif satu kabin yang hanya terdapat satu meja pengendali.
- c. Kabin pengemudi yang dipasang relatif di tengah lokomotif, sehingga dapat mengawasi kedua arah lokomotif.

## 2.4. Performansi Lokomotif

### 2.4.1. Gaya Tarik Lokomotif

Setiap lokomotif memiliki karakteristik diagram gaya tarik yang dikeluarkan oleh pabrik pembuat lokomotif. Diagram tersebut menunjukkan besarnya gaya tarik yang dapat dibangkitkan pada alat perangkai lokomotif (dalam kgf atau kN) sebagai fungsi kecepatan. Dalam perhitungan desain lokomotif atau perencanaan operasional kereta api digunakan gaya tarik yang dihitung secara matematis, demikian juga grafik tahanan atau perlawanan kereta api (*train resistance*). Hubungan antara daya gaya tarik dan kecepatan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini (Hartono, 1999) :

$$N = \frac{Z \times V}{270} \quad (HP) \quad \text{atau} \quad N = \frac{Z \times V}{376} \quad (KW) \quad (2.1)$$

Di mana :  $N$  = daya (HP) atau (KW)

$Z$  = gaya tarik (Kg)

$V$  = kecepatan (Km/jam)

Menurut Hartono (1999) daya didefinisikan sebagai daya dari ketel atau motor diesel, daya silinder atau poros mesin ( $N_i$ ), daya pada keliling roda penggerak ( $N_r$ ), dan daya pada *automatic coupler* ( $N_e$ ). Sedangkan gaya tarik didefinisikan sebagai gaya tarik ketel atau motor diesel, gaya tarik indikator ( $Z_i$ ), gaya tarik pada keliling roda penggerak ( $Z_r$ ), gaya tarik pada *automatic coupler* ( $Z_e$ ).

### 2.4.2. Perlawanan Kereta Api

Apabila sebuah lokomotif sebagai alat penarik harus menarik sebuah rangkaian kereta api, maka untuk dapat bergerak maju di atas rel lokomotif harus dapat mengatasi semua perlawanan yang timbul. Jenis perlawanan kereta api yang harus diatasi adalah sebagai berikut (Subyanto,1977) :

- a. Perlawanan jalan dari lokomotif di atas jalan datar dan lurus termasuk perlawanan angin ( $W_L$ ).
- b. Perlawanan jalan dari rangkaian kereta / gerbong di atas jalan datar dan lurus termasuk perlawanan angin ( $W_r$ ).
- c. Perlawanan tanjakan pada waktu menanjak ( $W_t$ ).
- d. Perlawanan lengkungan pada waktu membelok ( $W_1$ ).
- e. Perlawanan percepatan dan perlawanan saat berangkat waktu mulai gerak ( $W_p$ ).

Jadi total perlawanan seluruhnya adalah (Subyanto,1977) :

$$W_T = W_L + W_r + W_t + W_p \quad (\text{kg}) \quad (2.2)$$

Besarnya masing-masing perlawanan yang terjadi pada suatu rangkaian kereta api dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

- a. Perlawanan Lokomotif ( $W_L$ )

Secara umum tahanan lokomotif diesel di Indonesia dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut (Hartono, 1999) :

$$W_L = \text{rolling resistance} + \text{perlawanan angin}$$
$$W_L = a \cdot G_L + b \cdot F \left( \frac{V}{10} \right)^2 \quad (\text{kg}) \quad (2.3)$$

Di mana :

$G_L$  = berat total lokomotif (ton)

$F$  = luas penampang lokomotif ( $\text{m}^2$ )

$V$  = kecepatan [km/jam]

$a$  = konstanta yang tergantung pada mekanisme dan susunan gandar

$b$  = konstanta yang tergantung pada bentuk badan lokomotif

Tahanan lokomotif dengan bogie dua buah dan masing-masing bogie mempunyai dua pasang roda penggerak, dirumuskan dengan (Subyanto,1977) :

$$W_L = 2,65 \cdot G_L + 0,54 \cdot F \left( \frac{V}{10} \right)^2 \quad (\text{kg}) \quad (2.4)$$



b. Perlawanan Kereta ( $W_r$ )

Menurut formula dari *Strahl*, maka rumusan tahanan *rolling* spesifik ( $w_w$ ) untuk kereta penumpang bergandar empat (Subyanto,1977) :

$$w_w \approx 2,5 + \frac{V^2}{4000} \quad (\text{kg/ton}) \quad (2.5)$$

Perlawanan total dari seluruh rangkaian kereta, yaitu :

$$W_w = G_r \times w_w \quad (\text{kg}) \quad (2.6)$$

Di mana :

$V$  = kecepatan (km/jam)

$w_w$  = tahanan *rolling* (kg)

$G_r$  = berat total seluruh rangkaian (ton)

c. Perlawanan Tanjakan ( $W_t$ )

Perlawanan tanjakan kereta api yang terdiri dari lokomotif yang menarik beban rangkaian  $G_r$  adalah (Hartono, 1999) :

$$W_t = (G_L + G_r) \times S \quad (\text{kg}) \quad (2.7)$$

Di mana :

$G_L$  = berat lokomotif (ton)

$G_r$  = berat rangkaian (ton)

$S$  = besarnya tanjakan atau lereng ( $^0/00$ ) atau (kg/ton)

d. Perlawanan Lengkungan ( $W_l$ )

Perlawanan lengkungan spesifik untuk lebar sepur 1067 mm adalah (Subyanto, 1977) :

$$w_l = \frac{400}{R-20} \quad (\text{kg/ton}) \quad (2.8)$$

Tahanan lengkung :

$$W_l = (G_L + G_r) \times w_l \quad (\text{kg}) \quad (2.9)$$

Di mana :

$W_l$  = perlawanan lengkung total

$w_l$  = perlawanan lengkungan spesifik

$R$  = radius kelengkungan

e. Perlawanan Percepatan ( $W_p$ )

Perlawanan percepatan spesifik dirumuskan dengan (Hartono, 1999) :

$$w_p = \frac{1000}{9,81} \times b(1 + c) \quad (\text{kg/ton}) \quad (2.10)$$

Sehingga tahanan total akibat percepatan adalah :

$$W_p = (G_L + G_r) \times w_p \quad (\text{kg}) \quad (2.11)$$

Di mana :

$b$  = percepatan ( $\text{m/s}^2$ )

$c$  = 0,06 (untuk rangkaian lokomotif dan kereta penumpang)

### 2.4.3. Gaya Tarik Adhesi

Pada saat lokomotif mulai bergerak untuk menarik rangkaian kereta api, momen putar pada roda penggerak akan menghasilkan gaya tarik lokomotif yang dibatasi oleh koefisien gesek antara roda dan rel yang disebut koefisien adhesi dan gaya tarik yang dihasilkan disebut gaya tarik adhesi. Hubungan antara gaya tarik adhesi dengan koefisien adhesi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini (Subyanto, 1977) :

$$Z_a = f \times G_a \quad (2.12)$$

Di mana :

$Z_a$  = gaya tarik adhesi

$f$  = koefisien gesek antara roda dan rel  
pada kondisi basah  $f = 0,00 - 0,15$   
pada kondisi kering  $f = 0,30$

$G_a$  = berat adhesi (kg), yaitu berat lokomotif yang didukung oleh roda penggerak

Nilai  $f$  merupakan fungsi dari kecepatan, yaitu akan menurun bila kecepatan bertambah. Faktor adhesi diperlihatkan dalam persen berat lokomotif pada roda penggerak yang merupakan gaya tarik efektif yang tersedia. Berat adhesi diinginkan sebesar-besarnya sesuai dengan batas maksimum beban gandar yang diinginkan. Roda idle akan menurunkan gaya tarik adhesi. Untuk menghindari selip pada lintas dengan tanjakan berat, diambil harga  $f = 0,18$ .

#### 2.4.4. Diagram Beban Tarik

Menurut Hartono (1999) diagram beban tarik atau *Hauling Load Diagram* atau *Trailing Load Diagram* adalah diagram atau grafik antara beban tarik  $G_r$  (ton) terhadap kecepatan  $V$  (km/jam) atau tanjakan untuk suatu lokomotif. Beban tarik suatu lokomotif dihitung pada kecepatan keseimbangan,  $W_B = 0$ .

Pada jalan rel lurus dan rata maka dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}W_L + W_r &= Z \\W_r &= Z - W_L \\W_L \times W_r &= Z - W_L \\G_r &= \frac{Z - W_L}{W_r} \quad (\text{ton})\end{aligned}\tag{2.13}$$

Pada jalan rel dengan lereng  $S$  maka dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}W_t + W_L + W_r &= Z \\S(G_L + G_r) + W_L + W_r \times G_r &= Z \\G_r &= \frac{Z - W_L - S \times G_L}{W_r + S} \quad (\text{ton})\end{aligned}\tag{2.14}$$

Dari persamaan tersebut dapat digambarkan diagram beban tarik terhadap kecepatan untuk berbagai tanjakan. Pada buku petunjuk lokomotif biasanya sudah dilampirkan diagram beban tarik untuk kereta penumpang dan gerbong barang dari pabrik pembuat lokomotif.

#### 2.5. Analisis Beban

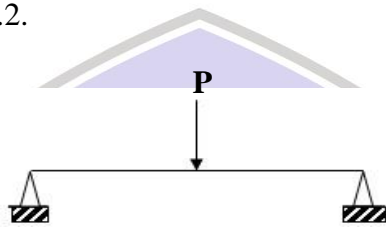
Beban merupakan salah satu sifat fisik yang dimiliki material. Beban ini akan menghasilkan gaya atau berat dari material tersebut. Beban dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis yaitu beban dari lingkungan, beban operasional dan beban *sustain* (beban dari material itu sendiri). Beban dari lingkungan adalah beban yang dialami oleh suatu material karena pengaruh kondisi lingkungan sekitar, seperti beban yang ditimbulkan oleh kondisi jalan tikungan, tanjakan, turunan, dan lainnya. Beban operasional adalah beban yang disebabkan oleh pergerakan dari material tersebut, seperti beban yang muncul karena putaran

yang akan menghasilkan torsi. Sedangkan beban *sustain* adalah beban yang timbul akibat berat yang ditimbulkan oleh material itu sendiri.

Beban yang bekerja pada sebuah benda atau batang berdasarkan daerah pembebanannya dibedakan menjadi dua macam ,yaitu (Prasetyo, 2010):

a. Beban terpusat

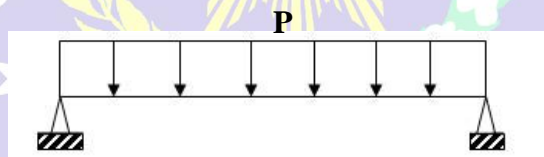
Beban terpusat adalah beban yang bekerja secara terpusat pada luas area yang relatif kecil dari suatu material, sehingga untuk mempermudah perhitungan luas area ini dianggap sebagai satu titik. Beban terpusat pada batang sederhana dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Beban terpusat pada batang sederhana

b. Beban terbagi merata

Beban terbagi merata adalah beban yang bekerja secara merata pada seluruh luas area material. Beban terbagi merata pada batang sederhana dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Beban merata pada batang sederhana

Berdasarkan sistem kerjanya pembebanan juga dapat dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu sebagai berikut :

a. Pembebanan dinamis

Pembebanan ini merupakan jenis pembebanan yang dipengaruhi oleh waktu. Besarnya nilai beban dinamis ini tidak tetap.

b. Pembebanan statis

Pembebanan ini merupakan jenis pembebanan yang tidak dipengaruhi oleh waktu. Besarnya beban yang diberikan adalah konstan.

Dalam perancangan *carbody* lokomotif ini analisis pembebanan dilakukan pada model struktur *carbody* lokomotif secara keseluruhan. Beban utama yang dialami oleh struktur *carbody* lokomotif meliputi beban-beban statis dan beban tambahan (dinamis). Beban statis ditentukan ketika kereta tidak sedang berjalan melalui pengujian statis terhadap model *carbody* yang mengacu pada standar BS EN (*British Standard*) yang terdiri dari :

- a. Beban kompresi longitudinal
- b. Beban vertikal
- c. Beban kombinasi antara kompresi dan vertikal.

Sedangkan untuk beban dinamis ditentukan ketika kereta sedang berjalan dengan memperhitungkan gaya atau perlawanan yang dibutuhkan kereta. Perhitungan perlawanan kereta dibagi dalam beberapa kondisi lintasan antara lain :

- a. Beban kondisi lintasan mendatar
- b. Beban kondisi lintasan belok
- c. Beban kondisi lintasan menanjak.
- d. Beban dengan percepatan
- e. Beban kombinasi dari seluruh perlawanan kereta api.

## **2.6. Konsep Tegangan dan Regangan**

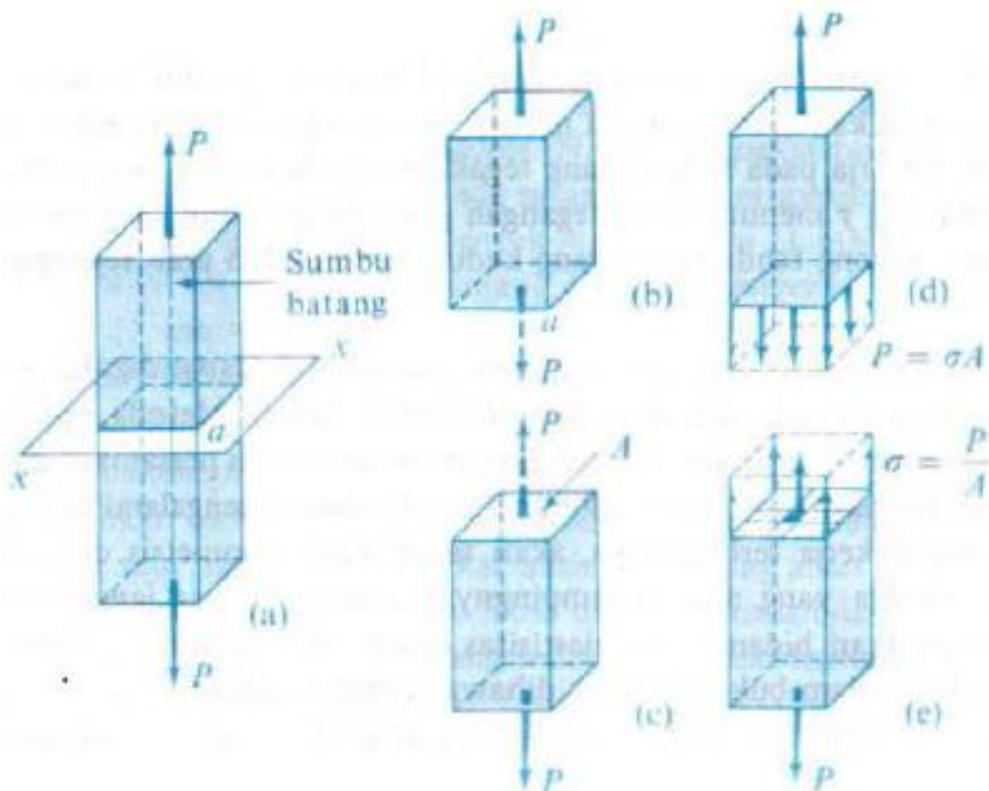
### **2.6.1. Tegangan**

Popov (1984) menyatakan salah satu persoalan pokok dalam mekanika bahan adalah menganalisis tahanan gaya-gaya yang terjadi di dalam suatu benda untuk mengimbangi gaya-gaya dari luar yang terpakai. Hal ini sangat mendasar dalam perancangan suatu benda atau komponen karena pemilihan material, dimensi, dan parameter lainnya tidak dapat dilakukan apabila intensitas gaya di dalam suatu benda tidak diketahui. Gaya-gaya yang bekerja terhadap benda akan memenuhi persamaan keseimbangan statis karena benda tersebut dalam keadaan stabil yang akan diam pada keseimbangannya. Intensitas gaya dalam pada suatu benda didefinisikan sebagai tegangan (*stress*).

Menentukan tegangan yang dapat diberikan pada struktur adalah bagian paling utama dalam proses pemilihan material untuk manufaktur suatu konstruksi atau komponen. Jensen dan Chenoweth (1989) menyatakan bahwa tegangan ijin merupakan bagian dari batas kekuatan yang bisa aman digunakan pada perancangan. Para insinyur merancang struktur atau komponen umumnya bekerja berdasarkan suatu tegangan ijin yang telah ditetapkan sebelumnya. Tegangan secara umum dibedakan menjadi dua jenis, yaitu (Popov, 1984) :

a. Tegangan Normal (*Normal Stress*)

Tegangan normal adalah intensitas gaya yang bekerja secara normal (tegak lurus) pada permukaan benda yang mengalami tegangan. Tegangan ini timbul akibat dari gaya aksial, beban bending, dan reaksi tumpuan. Tegangan normal pada beban aksial didistribusikan secara merata pada luas penampang  $A$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Urutan langkah analisis tegangan sebuah benda

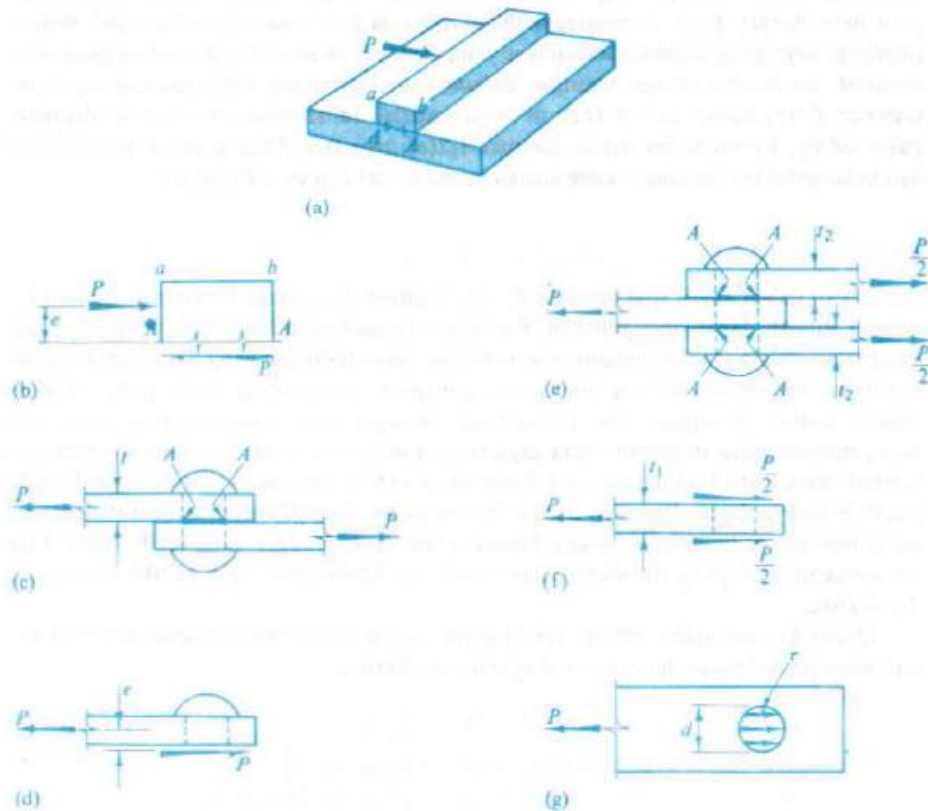
Sumber : Popov, 1984

Tegangan normal terdiri atas dua jenis yaitu :

1. Tegangan tarik (*tensile stress*) yaitu gaya tarik aksial yang menghasilkan tarikan (*tension*) pada permukaan sebuah benda yang mengakibatkan benda cenderung menjadi meregang atau bertambah panjang.
2. Tegangan tekan (*compressive stress*) yaitu gaya tekan aksial yang memberikan dorongan (*compressive*) pada permukaan sebuah benda mengakibatkan benda cenderung menjadi bertambah pendek atau menekan benda tersebut.

b. Tegangan Geser (*Shearng Stress*)

Tegangan geser adalah intensitas gaya yang bekerja sejajar dengan bidang dari luas permukaan yang mengalami tegangan. Tegangan ini timbul akibat dari gaya geser dan beban torsi atau puntir. Tegangan geser pada beban aksial didistribusikan secara merata pada luas penampang A, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kondisi pembebanan yang mengakibatkan tegangan geser

Sumber : Popov, 1984

Secara matematis definisi tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja pada beban aksial dapat dituliskan sebagai berikut (Popov, 1984) :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.15)$$

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.16)$$

Di mana :

$$\sigma = \text{tegangan normal} \left( \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)$$

$$\tau = \text{tegangan geser} \left( \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)$$

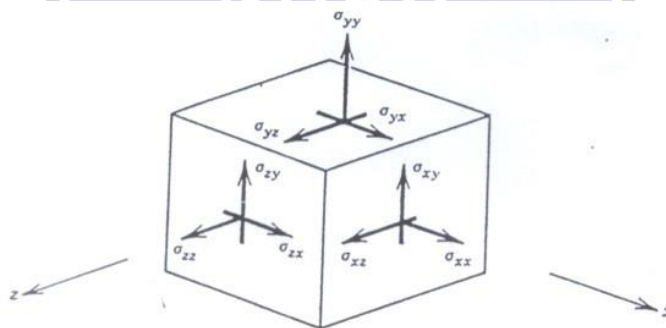
$$A = \text{luas} \text{ (m}^2\text{)}$$

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

Gaya dalam (*internal forces*) akan menghasilkan komponen tegangan untuk menghilangkan gaya-gaya dari luar (*external forces*). Komponen tegangan (*stress*) bernilai positif apabila searah dengan koordinat positifnya dan berlaku sebaliknya. Terdapat enam komponen tegangan yang bekerja pada penampang yang diletakkan di dalam vektor kolom  $\{\sigma\}$ , antara lain (Sigerlind, 1994):

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{xy} \ \sigma_{xz} \ \sigma_{yz}\} \quad (2.17)$$

Enam komponen tegangan (*stress*) didefinisikan untuk mempelajari defleksi suatu benda. Defleksi sebuah benda dapat dihasilkan dari aplikasi pembebanan atau perubahan *thermal*, maka komponen regangan dapat dibedakan menjadi regangan elastis dan *thermal*. Keenam komponen tegangan tersebut dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Komponen Tegangan

Sumber : Sigerlind, 1994



### 2.6.2. Regangan

Regangan digunakan untuk mempelajari defleksi yang terjadi pada suatu benda. Menurut Shigley dan Mitchell (1984) regangan adalah jumlah pertambahan panjang atau pemuaian. Satuan regangan adalah pertambahan panjang per satuan panjang dari batang tersebut. Untuk memperoleh satuan regangan, maka dilakukan dengan membagi perpanjangan ( $\delta$ ) dengan panjang ( $L$ ) yang telah diukur, dengan demikian rumusnya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.18)$$

Di mana :

$\varepsilon$  = regangan

$\delta$  = perubahan bentuk aksial total (mm)

$L$  = panjang batang (mm)

## 2.7. Teori Kegagalan Struktur

Analisis kegagalan adalah suatu kegiatan dalam rekayasa teknik yang dilakukan untuk mengetahui penyebab terjadinya kerusakan atau kegagalan. Menentukan batasan tegangan yang menyebabkan kegagalan dari suatu material merupakan hal yang penting dalam suatu rekayasa teknik. Tahapan terpenting dalam penggunaan teori kegagalan adalah menetapkan tegangan utama (*principal stress*). Ada tiga jenis teori kegagalan secara statis yang sering dipergunakan, yaitu:

### 2.7.1. Teori Tegangan Normal Maksimum

Teori kegagalan ini mengatakan bahwa kegagalan suatu bahan terjadi apabila tegangan normal maksimum pada suatu titik telah mencapai suatu harga kritis tanpa mengkaji tegangan yang lain. Kriteria kegagalan ini dapat berlaku hanya dengan menetapkan tegangan utama terbesarnya saja. Harga tegangan kritis  $\sigma_{ult}$  biasanya ditentukan dalam pengujian tarik, dimana kegagalan suatu spesimen ditentukan oleh pemuaian panjang yang besarnya berlebihan maupun keretakan (Popov, 1984).

Apabila kriteria kegagalan adalah titik luluh (*yield*), maka teori ini memperkirakan terjadinya kegagalan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\sigma &\geq S_{ut}/n_s \\ \sigma &\geq S_{uc}/n_s\end{aligned}\tag{2.19}$$

Di mana:

$$\begin{aligned}\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 &= \text{tegangan normal utama} \\ S_{ut} &= \text{kekuatan } \textit{ultimate} \text{ material terhadap gaya tarik} \\ S_{uc} &= \text{kekuatan } \textit{ultimate} \text{ material terhadap gaya tekan}\end{aligned}$$

### 2.7.2. Teori Tegangan Geser Maksimum

Teori kegagalan ini memperkirakan bahwa kegagalan bahan dimulai ketika tegangan geser yang terjadi melebihi tegangan ijin maksimum dari sebuah elemen. Teori tegangan geser maksimum banyak digunakan pada bahan yang bersifat ulet. Teori ini juga dapat disebut sebagai teori Tresca atau teori Guest (Shigley, 2006).

Menurut Bhandari (1994) kriteria kegagalan ini memperkirakan terjadinya kegagalan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}|\sigma_1 - \sigma_2| &\geq |S_y/n_s| \\ |\sigma_2 - \sigma_3| &\geq |S_y/n_s| \\ |\sigma_3 - \sigma_1| &\geq |S_y/n_s|\end{aligned}\tag{2.20}$$

Teori tegangan geser maksimum juga dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\tau_{maks} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \geq \frac{S_y}{2} \text{ atau } \sigma_1 - \sigma_2 \geq S_y\tag{2.21}$$

Di mana  $S_y$  adalah kekuatan luluh material pada saat uji tarik dan tegangan utama disusun dalam bentuk  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Sehingga kegagalan akan terjadi apabila memenuhi salah satu persamaan di atas.

### 2.7.3. Teori Energi Distorsi (Tegangan *Von Mises*)

Teori ini menyatakan bahwa energi distorsi terjadi jika energi regangan distorsi per satuan volume sama atau lebih besar dari energi regangan distorsi per satuan volume untuk menghasilkan tegangan dari elemen yang sama. Teori energi distorsi berkaitan dengan teori *Von Mises Stress* (Shigley, 2006). Teori energi

distorsi ini bisa membuktikan apakah hasil tegangan ekuivalen simulasi sesuai dengan hasil perhitungan teori energi distorsi.

Teori energi distorsi (Tegangan *Von Mises*) didefinisikan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2.22)$$

Kegagalan akan terjadi apabila :

$$\sigma' \geq S_y \quad (2.23)$$

Di mana  $S_y$  adalah kekuatan luluh material pada saat uji tarik.

Dari ketiga teori kegagalan tersebut penggunaannya menyesuaikan dengan material yang dipakai. Teori tegangan normal maksimum lebih efektif digunakan untuk material yang bersifat getas, sedangkan teori tegangan geser maksimum dan teori tegangan *von mises* lebih efektif digunakan untuk material yang bersifat ulet.

## 2.8. Faktor Keamanan

Faktor keamanan atau *safety factor* merupakan suatu hal yang sangat penting dalam analisis dan perencanaan struktur secara keseluruhan agar tidak terjadi kegagalan. Shigley dan Mitchell (1984) menyatakan definisi faktor keamanan adalah faktor yang digunakan untuk mengevaluasi keamanan suatu bagian mesin. Sedangkan menurut Jensen dan Chenoweth (1989), faktor keamanan adalah perbandingan tegangan rusak terhadap tegangan ijin. Tegangan ijin (*allowable stress*) merupakan bagian batas kekuatan yang biasa aman digunakan dalam perancangan.

Pada pengujian sebuah batang bundar yang diberikan tegangan tarik dengan diberi beban sampai batang tersebut menjadi patah. Tegangan maksimum yang diperlukan oleh material agar terjadi patah dinamakan tegangan ultimat (*ultimate stress*). Faktor keamanan dapat dimasukkan dalam perhitungan desain melalui *ultimate stress*, *yield stress*, *endurance limit*, *creep strength* atau kriteria kekuatan lainnya. Perbandingan dari tegangan ultimat terhadap tegangan ijin disebut faktor keamanan yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Ultimate stress atau Yield stress}}{\text{Allowable stress atau Safe stress}} \quad (2.24)$$

Dalam perancangan suatu struktur, untuk mencegah terjadinya kegagalan atau kerusakan struktur maka besar angka faktor keamanan harus selalu lebih besar dari 1. Semakin besar kemungkinan terjadinya kegagalan pada struktur, maka angka keamanan yang dipakai semakin besar. Nilai kisaran faktor keamanan berkisar antara 1,0 sampai 10. Faktor keamanan suatu struktur yang akan dirancang dapat ditentukan dengan menggunakan aturan sebagai berikut (Mott, 2009) :

a. Untuk bahan-bahan ulet

1.  $N = 1,25$  sampai  $2,0$  untuk perancangan struktur yang menerima beban statis dengan tingkat kepercayaan yang tinggi untuk semua data perancangan.
2.  $N = 2,0$  sampai  $2,5$  untuk perancangan elemen-elemen mesin yang menerima beban dinamis dengan tingkat kepercayaan rata-rata untuk semua data perancangan.
3.  $N = 2,5$  sampai  $4,0$  untuk perancangan struktur statis atau elemen-elemen mesin yang menerima beban dinamis dengan ketidakpastian mengenai beban, sifat-sifat beban, analisis tegangan, atau lingkungan.
4.  $N = 4,0$  atau lebih untuk perancangan struktur statis atau elemen-elemen mesin yang menerima beban dinamis dengan ketidakpastian mengenai beberapa kombinasi beban, sifat-sifat beban, analisis tegangan, atau lingkungan.

b. Untuk bahan-bahan getas

1.  $N = 3,0$  sampai  $4,0$  untuk perancangan struktur yang menerima beban statis dengan tingkat kepercayaan yang tinggi untuk semua data perancangan.
2.  $N = 4,0$  sampai  $8,0$  untuk perancangan struktur statis atau elemen-elemen mesin yang menerima pembebanan dinamis dengan ketidakpastian mengenai beberapa kombinasi beban, sifat-sifat beban, analisis tegangan, atau lingkungan.

Adapun tujuan menggunakan faktor keamanan dalam perancangan suatu struktur, yaitu:

- a. Untuk menentukan pembebanan maksimum yang akan terjadi pada mesin atau struktur.
- b. Penentuan dimensi dari struktur yang akan dirancang.

- c. Memprediksi kekuatan terhadap material yang digunakan.
- d. Penentuan distribusi *actual stress*.
- e. Antisipasi terhadap beban berlebih yang mungkin terjadi saat perlakuan tertentu.

## 2.9. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk memecahkan permasalahan teknik dan problem matematis dari suatu gejala fisis. Tipe masalah teknis dan matematis fisis yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok yaitu kelompok analisis struktur dan kelompok masalah-masalah non struktur. Tipe-tipe permasalahan struktur meliputi analisis tegangan (*stress*), *buckling*, dan getaran, sedang permasalahan non struktur meliputi perpindahan panas dan massa, mekanika fluida, dan distribusi dari potensial listrik dan potensial magnet (Susatio, 2004).

Weaver dan Johnston (1993) menyatakan bila suatu kontinum dibagi-bagi menjadi beberapa bagian yang lebih kecil, maka bagian kecil ini disebut elemen hingga. Konsep dasar penyelesaiannya adalah diskritisasi (pembagian) yaitu dengan membagi suatu kontinum menjadi elemen-elemen yang sangat kecil, di mana elemen-elemen tersebut saling terhubung pada titik penghubung elemen yang sering disebut sebagai *node*. Metode ini disebut elemen hingga karena ukuran elemen kecil ini berhingga dan umumnya memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana dibanding dengan kontinumnya.

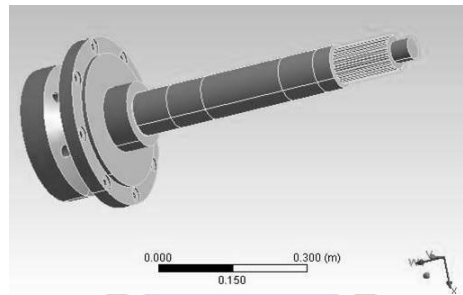
Menurut Erinofiardi (2012) pada metode elemen hingga pemodelan dilakukan dengan membagi model yang akan dianalisis menjadi beberapa elemen dan menggunakan elemen tersebut sebagai dasar perhitungan dan analisis. Elemen-elemen pada metode elemen hingga terdiri dari beberapa nodal dimana semakin banyak nodal yang digunakan akan diperoleh hasil yang lebih presisi atau teliti.

Secara umum dalam proses analisis dengan menggunakan metode elemen hingga terdiri dari langkah-langkah dasar yang meliputi (Choiron, 2014):

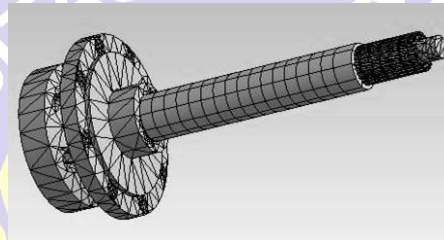
### a. Diskritisasi dan memilih tipe elemen

Pada tahapan ini dilakukan proses diskritisasi yaitu pembagian suatu struktur benda menjadi elemen-elemen hingga. Sebelum mendiskritisasi struktur, tipe

elemen yang digunakan untuk pemodelan kondisi geometri yang sebenarnya harus dapat ditentukan terlebih dahulu. Dalam proses diskritisasi, ukuran elemen diperbolehkan berbeda menyesuaikan kondisi geometri dari struktur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



(a) Struktur Poros



(b) Diskritisasi struktur poros

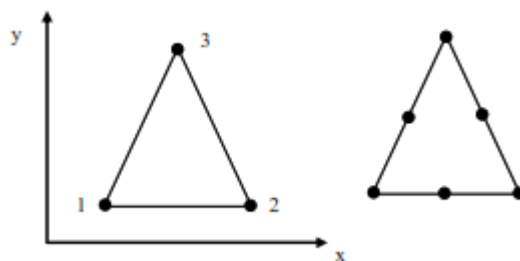
Gambar 2.7 Diskritisasi pada struktur

Sumber : Choiron, 2014

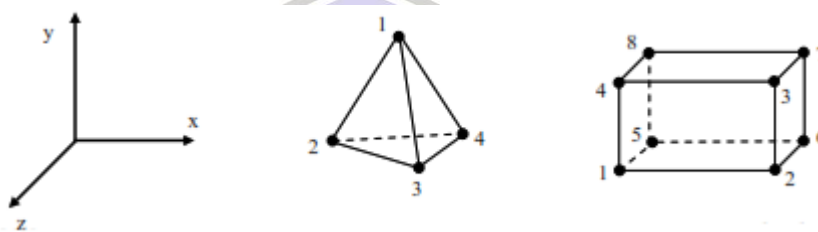
Dalam memilih tipe dan ukuran elemen harus ditentukan dengan tepat dan sesuai agar diperoleh hasil analisis yang lebih teliti. Terdapat beberapa contoh tipe elemen dalam analisis struktur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Untuk menyajikan bentuk *beam* atau batang menggunakan tipe elemen seperti pada Gambar 2.8 (a). Dalam melakukan analisis tegangan atau regangan dapat menggunakan tipe lemen dua dimensi dengan nodal yang terdapat pada tiap-tiap sudutnya atau terdapat nodal tambahan diantara sudut-sudutnya yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 (b). Sedangkan Gambar 2.8 (c) memperlihatkan tipe elemen dengan bentuk *tetrahedral* dan *hexahedral*.



(a) Elemen sederhana dengan 2 nodal



(b) Elemen segitiga dengan 3 nodal dan 6 nodal



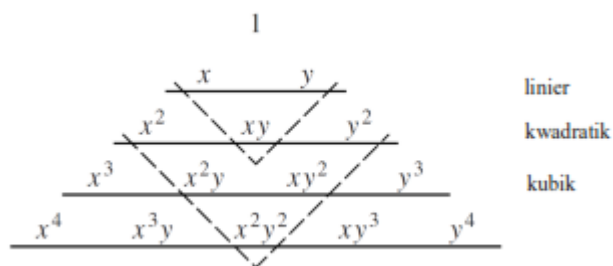
(c) Elemen sederhana 3 dimensi berbentuk *tetrahedral* dan *hexahedral*

Gambar 2.8 Tipe elemen

Sumber : Choiron, 2014

b. Mengasumsikan fungsi perpindahan pada setiap elemen

Dalam memilih fungsi perpindahan dari setiap nodal bergantung pada jumlah nodal yang dipakai oleh elemen. Fungsi perpindahan setiap elemen tersebut secara umum diasumsikan dalam fungsi polinomial. Fungsi polinomial dapat diperoleh dengan mengaplikasikan segitiga Pascal yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Segitiga Pascal untuk Polinomial

Sumber : Choiron, 2014

c. Menentukan hubungan regangan-perpindahan dan tegangan-regangan sesuai dengan asumsi tertentu (pada kasus diasumsikan bahan isotropik).

d. Menurunkan persamaan dan matriks kekakuan elemen.

Matriks kekakuan dan persamaan elemen dapat diturunkan dengan mengaplikasikan kondisi keseimbangan gaya.

e. Menggabungkan persamaan elemen untuk memperoleh persamaan global dan menentukan kondisi batas.

Persamaan yang diturunkan pada langkah 4 digabungkan menjadi persamaan global yang melingkupi semua nodal yang terdapat pada suatu struktur.

Persamaan kekakuan global dapat dinyatakan :

$$[F] = \{K\}[d] \quad (2.25)$$

Di mana :

$[F]$  = gaya global pada nodal

$\{K\}$  = matriks kekakuan global

$[d]$  = perpindahan nodal yang tidak diketahui

Suatu struktur harus memiliki kondisi batas berupa tumpuan untuk dapat menyelesaikan persamaan kekakuan global tersebut, sehingga persamaan akhir yang telah dimodifikasi dinyatakan :

$$[F] = \begin{Bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (2.26)$$

f. Menyelesaikan persamaan pada langkah 5 untuk mendapatkan nilai perpindahan nodal yang tidak diketahui

g. Menghitung tegangan dan regangan pada setiap nodal akibat perpindahan

h. Interpretasi hasil-hasilnya.

Analisis hasil pada model dapat dilakukan untuk penentuan daerah terjadinya tegangan atau regangan maksimum pada model. Pada umumnya hasil yang dianalisis berupa keluaran dari hasil pemrograman komputer karena analisis tidak bisa diselesaikan secara manual dan tergantung dari jenis keluaran yang diinginkan.