

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Velmurugan dan Muralikannan (2009) meneliti karakteristik penyerapan energi pada *crash box* dengan melakukan pengujian quasi-statik dari beberapa macam bentuk penampang di antaranya lingkaran (*circle*), persegi (*square*), dan persegi panjang (*rectangular*) masing-masing *crash box* memiliki ketebalan yang sama, hasil penelitian tersebut menunjukkan penyerapan energi spesifik pada penampang lingkaran (*circle*) lebih tinggi dari penampang persegi (*square*) dan persegi panjang (*rectangular*) sedangkan penampang persegi (*square*) lebih baik dari persegi panjang (*rectangular*).

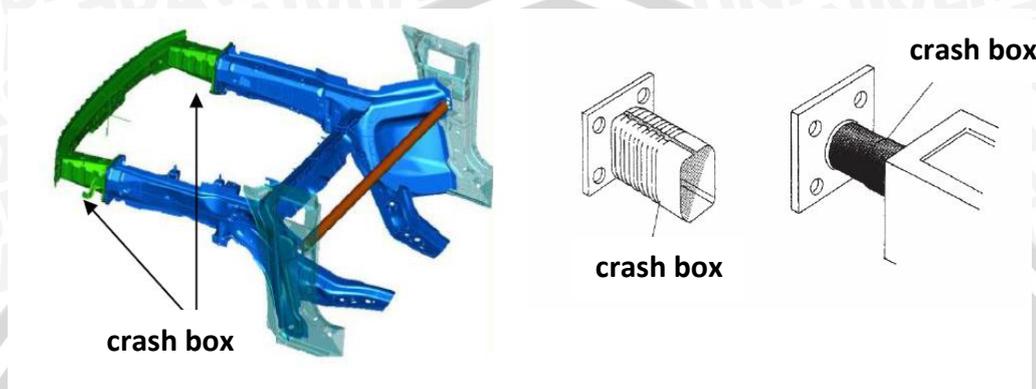
Berdasarkan penelitian di atas, dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh variasi sudut tirus dinding pada tiap model simulasi *crash box* terhadap penyerapan energi dan pola deformasi yang terjadi pada simulasi tabrakan arah frontal. Dipilih *crash box* yang berpenampang lingkaran untuk mendukung hasil penelitian sebelumnya.

#### 2.2 Crash Box

*Crash box* adalah salah satu jenis penyerap energi yang diletakkan diujung rangka depan kendaraan yang berfungsi menyerap energi akibat tabrakan pada bagian depan, pada saat terjadi tabrakan depan (*frontal crash*), *crash box* diharapkan dapat terdeformasi dengan menyerap energi tabrakan sebelum mengenai bagian yang dilindungi sehingga kerusakan pada rangka kabin utama dapat diminimalisasi dan penumpang dapat selamat. Energi yang diterima oleh *crash box* saat terjadi tabrakan diserap melalui deformasi plastis pada *crash box* itu sendiri, *crash box* menyerap energi dan mengurangi gaya maksimalnya dimana seluruh energi tabrakan didistribusikan secara merata dan besar gayanya tidak melebihi nilai yang diizinkan agar struktur yang lain terlindung dari kerusakan yang parah. Agar *crash box* dapat memproteksi struktur dengan baik maka desain *crash box* harus mengikuti kriteria sebagai berikut :

- Energi akibat tabrakan sebanyak mungkin harus dapat didistribusikan menjadi deformasi *irreversible* atau energi tabraknya diubah menjadi deformasi plastis.

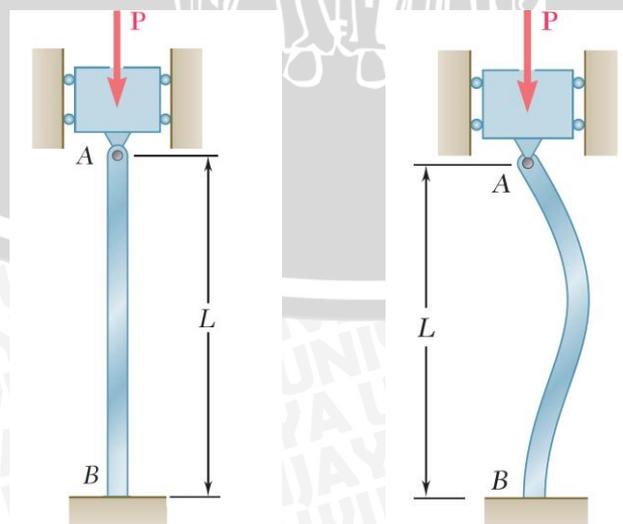
- *Crash box* adalah peralatan sekali pakai sehingga harus mudah diproduksi dan biayanya rendah serta mudah pemasangan dan pelepasannya.
- *Crash box* harus cukup panjang agar jalur deformasi untuk penyerapan energi tabrakan semakin panjang pula, tetapi tidak mengambil terlalu banyak ruang pada bagian depan kendaraan.



Gambar 2.1 *Crash box* pada struktur rangka kendaraan  
Sumber : Liu Yanjie (2008)

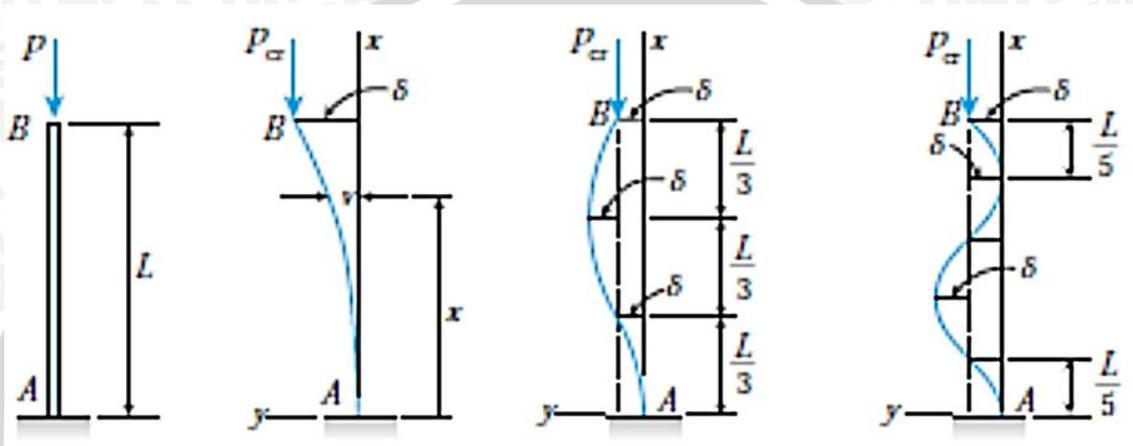
### 2.3 Tekuk (*Buckling*)

*Buckling* merupakan suatu jenis dari kegagalan struktur yang terjadi pada struktur kolom yang terjadi akibat pembebanan secara aksial pada struktur tersebut, jika suatu tiang yang tipis diberi tekanan maka tiang tersebut akan membengkok dan terdefleksi secara lateral. Dengan bertambahnya beban aksial pada akhirnya kolom akan terdeformasi plastis. Ilustrasi *buckling* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 *Buckling* pada struktur kolom  
Sumber : Beer, 2006: 635

*Crash box* merupakan salah satu jenis komponen yang berfungsi untuk menyerap energi kinetik akibat tabrakan dimana energi tersebut diubah ke bentuk lain yaitu deformasi plastis pada struktur dengan bentuk tekukan –tekukan yang disebut *buckling*, sehingga dengan adanya *buckling* pada *crash box* tersebut energi kinetik akibat tabrakan yang diterima oleh kendaraan tidak langsung tersalur ke rangka utama yang akan menyebabkan kerusakan parah dan cedera pada penumpang.



Gambar 2.3 Teori dasar *buckling*  
Sumber : Gere, 2003 : 765

Perilaku struktur kolom yang ideal ketika diberi beban secara aksial ada tiga yaitu :

- Jika  $P < P_{cr}$  , maka struktur kolom dalam keadaan stabil dan setimbang dengan posisi tegak lurus.
- Jika  $P = P_{cr}$ , maka struktur kolom berada dalam kondisi netral ekuilibrium baik dalam posisi tegak atau sedikit membengkok.
- Jika  $P > P_{cr}$ , maka struktur kolom berada dalam kondisi ekuilibrium yang tidak stabil pada keadaan tegak dan karena itu terjadi *buckling*.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (2-1)$$

Dengan :

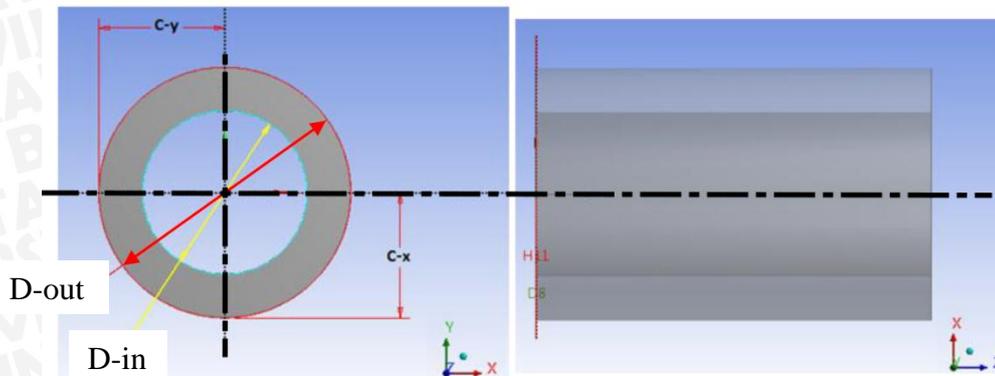
$P_{cr}$  = Beban kritis (N)

E = Modulus Elastisitas (Pa)

I = Momen inersia penampang ( $m^4$ )

L = Panjang kolom (m)

Momen inersia untuk silinder berdinding tebal ditunjukkan oleh Gambar 2.4 berikut ini:



Gambar 2.4 Silinder Berdinding Tebal  
Sumber : Dokumen Pribadi

Misalkan  $D_{in}$  adalah diameter dalam silinder,  $D_{out}$  adalah diameter luar, maka:

$$I = \frac{\pi}{64} (D_{out}^4 - D_{in}^4) \quad (2-2)$$

## 2.4 Tinjauan Umum Pengujian *Crash Box*

### 2.4.1 *Quasi-Static Test*

*Quasi-Static Test* digunakan untuk menguji kekuatan *crash box*, prosedur pengujiannya dengan cara *crash box* diletakkan di dasar mesin uji dengan tumpuan baja dan kemudian dikenai kompresi aksial dengan kelajuan konstan sebesar 7,67 m/s. Pengujian ini dimaksudkan sebagai langkah validasi terhadap simulasi yang dilakukan. Peralatan *Quasi-Static test* dapat dilihat pada Gambar 2.5.

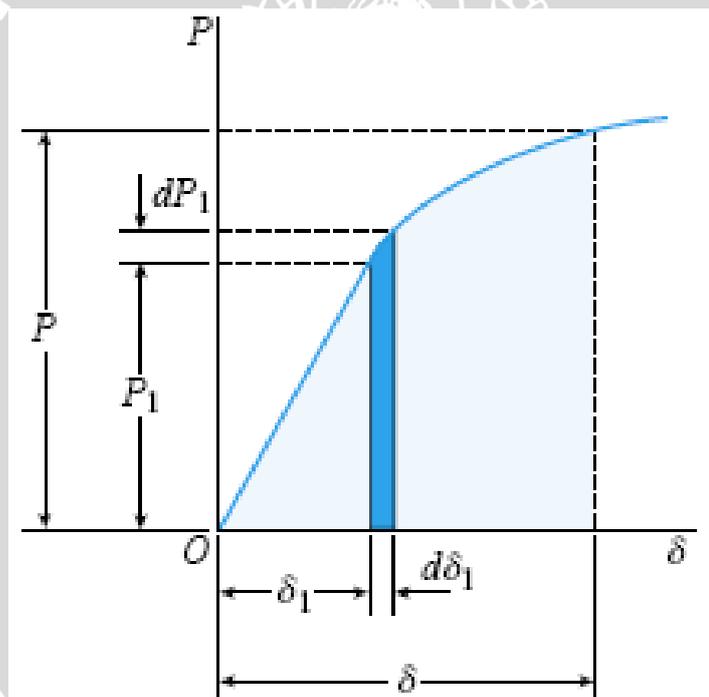


Gambar 2.5 *Quasi-Static Test machine*  
Sumber : Chun Hou, 2013

### 2.4.2 Energi Regangan

Tumbukan dua buah benda akan menimbulkan konversi energi dari energi kinetik menjadi energi regangan (*strain energy*) pada material dengan mengabaikan perubahan energi ke bentuk lain. Energi regangan merupakan konsep dasar dalam mekanika terapan yang banyak digunakan untuk menentukan respon struktur terhadap beban statik dan dinamik.

Pada kondisi statik, pembebanan diterapkan secara perlahan-lahan sehingga beban bertambah dari nol ke harga maksimum. Pembebanan akan menyebabkan material mengalami pertambahan panjang (perpindahan akibat deformasi) hingga mencapai pertambahan panjang maksimum sesuai besar pembebanan. Fenomena ini umumnya disajikan dalam bentuk diagram beban-perpindahan (*load-displacement diagrams*) seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Diagram beban-perpindahan  
Sumber : Gere, 2004 : 116

Berdasarkan tinjauan geometrik, usaha yang dilakukan oleh beban dalam rentang nilai  $P$  dan  $\delta$  dinyatakan sebagai luas daerah dibawah kurva beban-perpindahan, sehingga dapat dirumuskan usaha total yang dilakukan oleh beban :

$$U = W = \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta \quad (2-3)$$

Dengan :

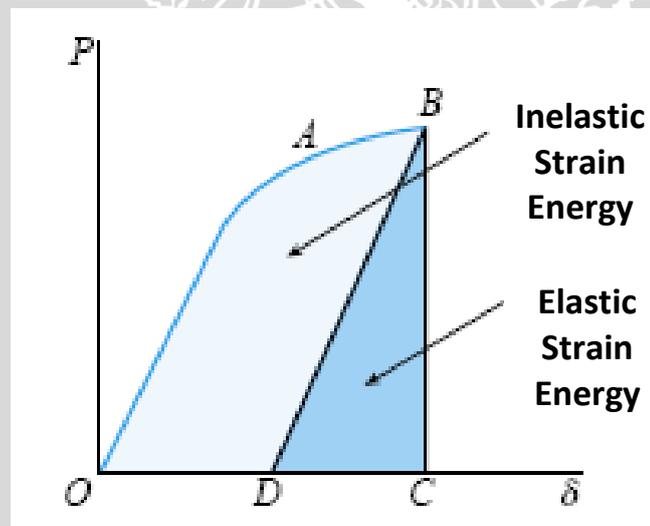
$U$  =Energi regangan (J)

$W$  = Usaha (J)

$P$  = Beban (N)

$\delta$  = Perpindahan (m)

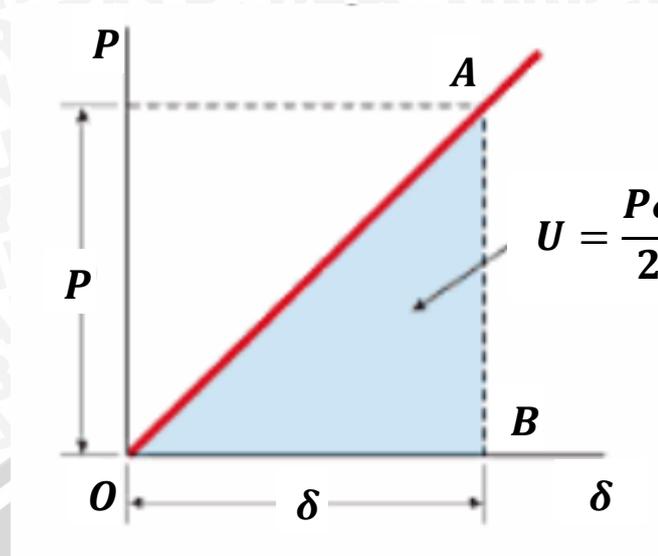
Energi regangan dibagi menjadi dua yakni energi regangan elastis dan energi regangan inelastis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Saat pembebanan dihilangkan perlahan-lahan material akan kembali ke bentuk semula. Namun material tidak akan kembali ke bentuk semula bila batas elastis terlampaui. Hanya sebagian dari energi regangan yang dipulihkan bila pembebanan melewati batas elastis. Selama pembebanan dihilangkan, maka diagram akan berubah menurut garis BD. Energi regangan inelastis (OABDO) merupakan energi yang hilang dalam proses untuk mengubah bentuk secara permanen.



Gambar 2.7 Energi regangan elastis dan plastis

Sumber : Gere, 2004 : 117

Pada batas elastis, diagram beban – perpindahan mengikuti garis linear seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 sehingga besar energi regangan yang tersimpan adalah sebesar luas daerah segitiga yang dibentuk oleh garis linear A dengan sumbu x. Besar energi regangan yang tersimpan sama dengan usaha yang dilakukan oleh beban.



Gambar 2.8 Diagram beban-perpindahan elastis  
 Sumber : Gere (2004 : 118)

Sehingga rumus energi regangan dalam kondisi elastis dapat ditulis :

$$U = W = \frac{P \cdot \delta}{2} \tag{2-4}$$

Dimana dapat diperoleh hubungan antara perpindahan dengan beban :

$$\delta = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} \tag{2-5}$$

Dan persamaan energi regangan dapat dirumuskan menjadi :

$$U = \frac{P^2 \cdot L}{2 \cdot E \cdot A} \tag{2-6}$$

Dengan :

P = Beban (N)

L = Panjang material (m)

E = Modulus elastisitas (Pa)

A = Luas penampang (m<sup>2</sup>)

## 2.5 Teori Tegangan dan Regangan

### 2.5.1 Prinsip Analisis Tegangan

Prinsip analisis tegangan selalu berhubungan dengan perilaku benda dalam kondisi mengalami pembebanan atau disebut juga mekanika bahan. Tujuan utama dari analisis tegangan adalah untuk menentukan tegangan dan regangan internal material,

mengetahui deformasi dan defleksi yang terjadi serta untuk memperoleh solusi dari permasalahan dinamika dari struktur. Beberapa prinsip dari analisis tegangan yaitu:

- Keseimbangan gaya dan momen

Persamaan dasar dalam permasalahan statika berlaku dalam analisis tegangan yaitu :

$$\sum F = 0 ; \sum M = 0 \quad (2-7)$$

- Kompatibilitas perpindahan (*strain-displacement relation*)

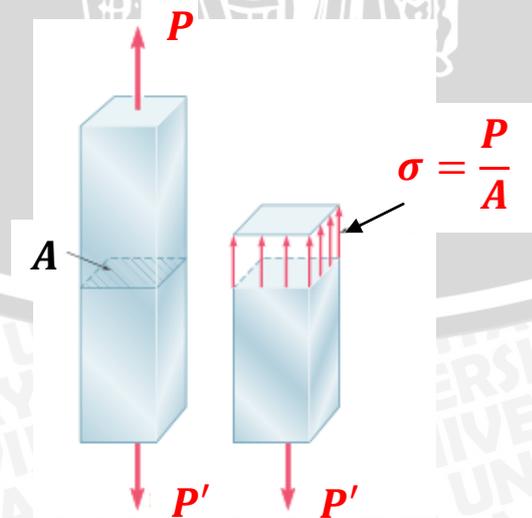
Bagian yang mengalami perpindahan dalam suatu struktur kontinu akibat deformasi mempunyai hubungan antara satu bagian dengan bagian lainnya.

- Hubungan konstitusif (*stress-strain-displacement*)

Terdapat hubungan yang erat antara tegangan, regangan dan perpindahan. Dimana perlu memperhitungkan kondisi batas yaitu gaya dan perpindahan pada batas dari komponen.

### 2.5.2 Konsep Tegangan dan Regangan

Tegangan didefinisikan sebagai gaya per satuan luas permukaan dimana gaya bekerja. Secara umum tegangan dibagi menjadi dua yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal adalah tegangan yang disebabkan oleh gaya yang bekerja secara tegak lurus luas permukaan benda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Tegangan akibat gaya pada material  
Sumber : Beer, 2006 :5

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2-8}$$

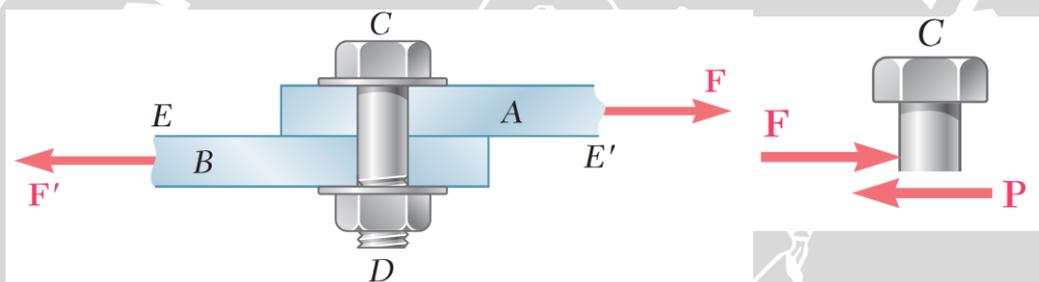
Dengan :

$\sigma$  = Tegangan normal ( $N/m^2$ )

F = Gaya normal (N)

A = Luas permukaan dimana gaya bekerja ( $m^2$ )

Sedangkan tegangan geser adalah tegangan yang disebabkan oleh gaya geser yang bekerja sejajar dengan luas permukaan benda. Tegangan geser dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Tegangan geser pada material  
 Sumber : Beer, 2006 : 10

$$\tau = \frac{F_s}{A} \tag{2-9}$$

Dengan :

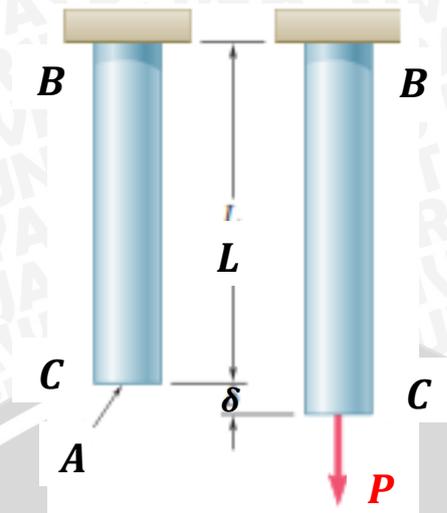
$\tau$  = Tegangan geser ( $N/m^2$ )

$F_s$  = Gaya geser (N)

A = Luas permukaan benda dimana gaya bekerja ( $m^2$ )

Bila suatu benda diberi gaya maka akan terjadi tegangan pada elemen-elemen benda tersebut. Tegangan yang terjadi akan menimbulkan regangan. Regangan didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang dengan panjang awal suatu benda.





Gambar 2.11 Regangan akibat pembebanan  
 Sumber : Beer, 2006 : 61

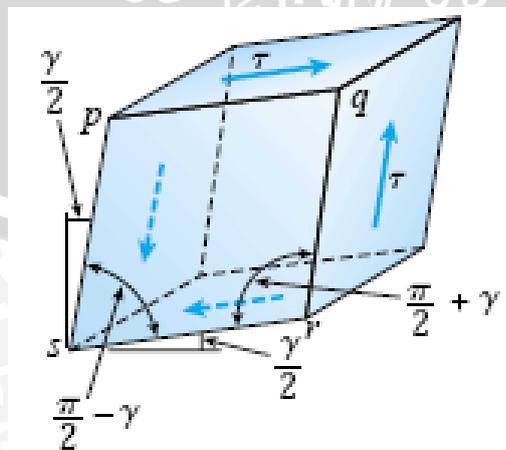
Regangan dibagi menjadi dua, yaitu regangan normal dan regangan geser.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (2-10)$$

Dengan :

- $\epsilon$  = Regangan normal
- $\delta$  = Perubahan panjang ( $m$ )
- $L_0$  = Panjang awal ( $m$ )

Sedangkan regangan geser adalah perubahan sudut antara dua permukaan tegak lurus dari elemen diferensial benda.



Gambar 2.12 Regangan geser pada elemen material  
 Sumber : Gere, 2004 : 32

$$\gamma = \frac{S_s}{S_0} \quad (2-11)$$

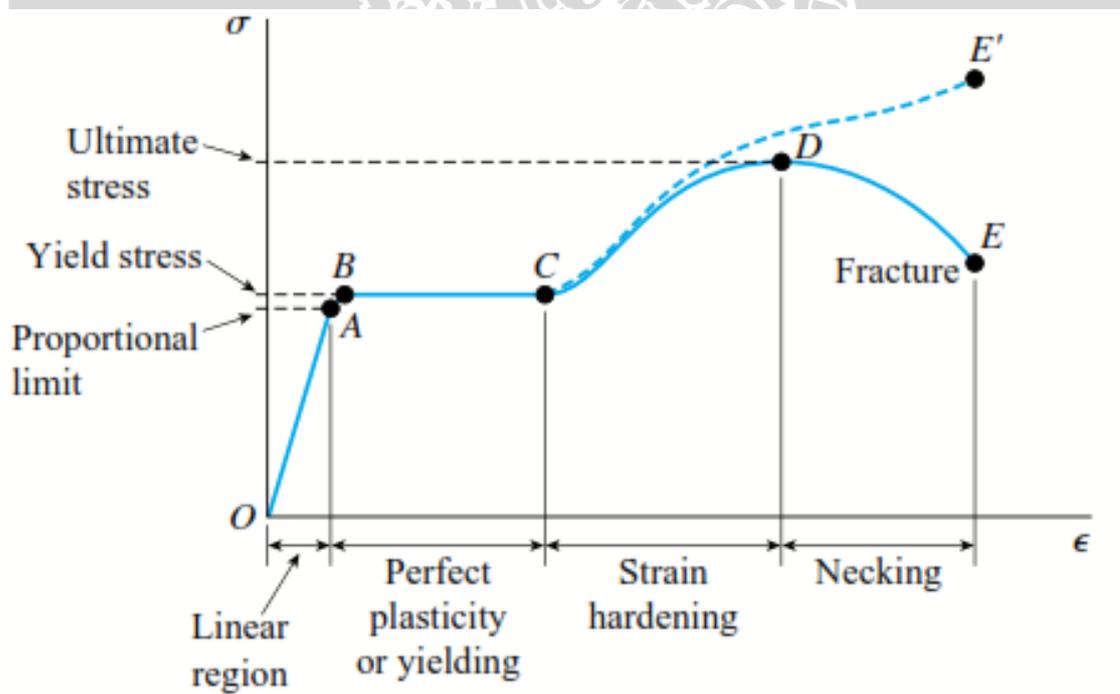
Dengan :

$\gamma$  = Regangan geser

$S_s$  = Perubahan sudut ( $^\circ$ )

$S_0$  = Sudut awal ( $^\circ$ )

Rasio antara tegangan normal dan regangan normal disebut Modulus Elastisitas atau Modulus Young. Modulus ini berlaku pada garis lurus sebelum batas proporsional atau daerah elastis material. Rasio antara tegangan geser dengan regangan geser disebut Modulus Geser atau Modulus Kekakuan. Hubungan antara tegangan dan regangan ditampilkan dalam kurva tegangan dan regangan seperti pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Grafik hubungan tegangan dan regangan  
 Sumber : Gere, 2004 : 15

Sehingga dapat ditulis rumusan untuk Modulus Elastisitas dan Modulus Kekakuan:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2-12)$$

Dengan :

$E$  = Modulus Elastisitas ( $N/m^2$ )

$\sigma$  = Tegangan ( $N/m^2$ )

$\varepsilon$  = Regangan

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2-13)$$

Dengan :

$G$  = Modulus geser ( $N/m^2$ )

$\tau$  = Tegangan geser ( $N/m^2$ )

$\gamma$  = Regangan geser

Material yang mengalami pembebanan secara aksial akan mengalami regangan searah maupun tegak lurus arah pembebanan. Konstanta yang menyatakan hubungan regangan tegak lurus arah pembebanan (lateral) ini dengan regangan aksial disebut rasio Poisson (Poisson's ratio).

$$\nu = - \frac{\text{regangan lateral}}{\text{regangan aksial}} \quad (2-14)$$

Dengan :

$\nu$  = Poisson's Ratio

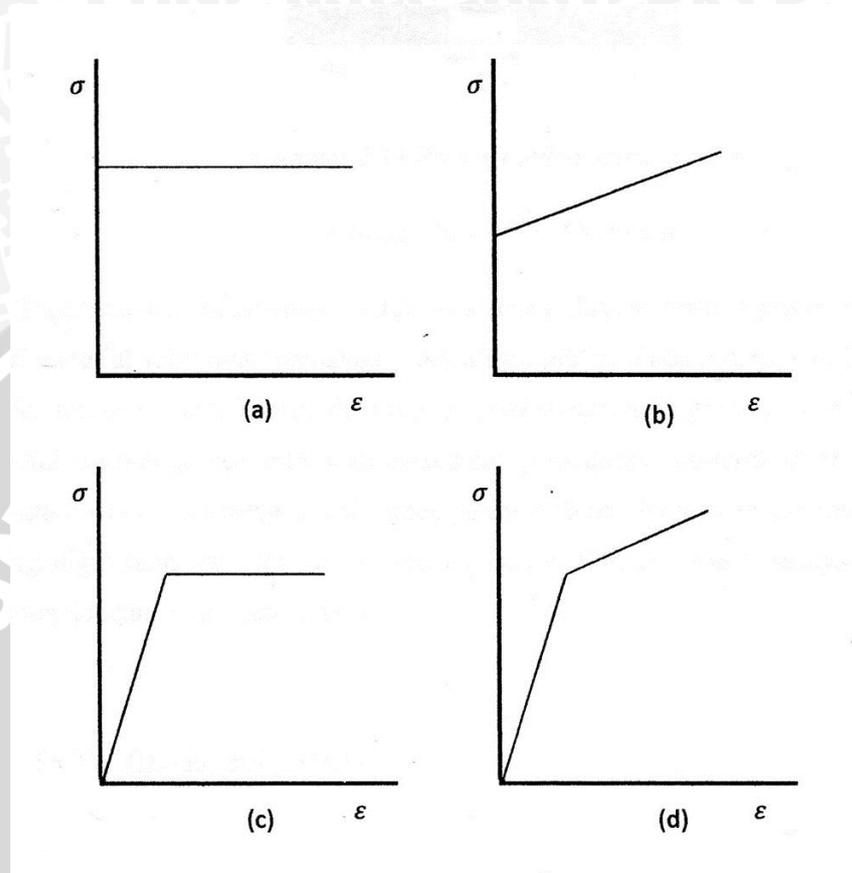
Sehingga dapat diperoleh hubungan antara Modulus Elastisitas, Modulus Kekakuan, dan Poisson's Ratio :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2-15)$$

### 2.5.3 Hubungan Tegangan dan Regangan Plastik

Material dalam kondisi plastis mengalami deformasi yang terjadi secara permanen (*irreversible*) dan hukum Hooke tidak berlaku pada area ini. Salah satu karakteristik dari deformasi plastis adalah logam sebenarnya bersifat tidak mampu tekan (*incompressible*) sehingga pada deformasi plastis dapat diasumsikan volume material adalah konstan.

Untuk memperoleh solusi dari permasalahan deformasi maka diperlukan idealisasi hubungan tegangan dan regangan. Idealisasi dari permasalahan plastisitas dapat dijelaskan dalam Gambar 2.14 berikut.



Gambar 2.14 Kurva tegangan-regangan pemodelan material  
Sumber : Chung, 1988 : 48

a. *Rigid perfectly plastic*

Permodelan dimana material tidak mengalami deformasi elastis terlebih dahulu melainkan langsung mengalami deformasi plastis saat diberi pembebanan sampai batas tertentu. Deformasi akan terus terjadi jika pembebanan terus dilakukan walaupun besar pembebanan tidak ditambahkan.

b. *Rigid linear strain hardening*

Material tidak mengalami deformasi elastis sehingga hanya mengalami deformasi plastis. Deformasi plastis akan terus bertambah seiring dengan penambahan pembebanan secara linier.

c. *Elastic perfectly plastic.*

Permodelan dimana material mengalami deformasi elastis dilanjutkan dengan deformasi plastis. Deformasi plastis yang terjadi tidak dipengaruhi oleh penambahan pembebanan.

d. *Elastic linear strain hardening*

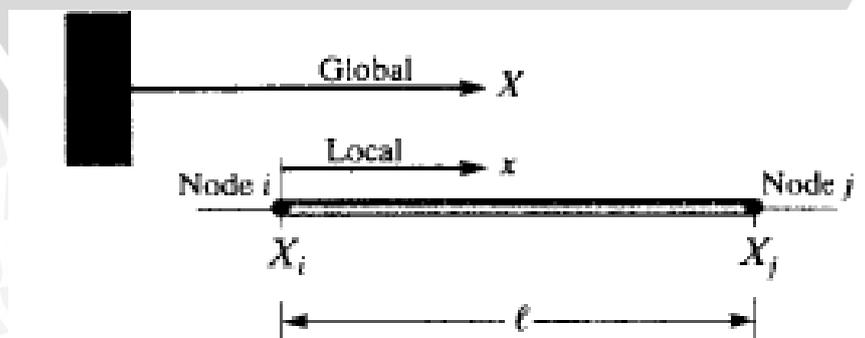
Permodelan dimana material mengalami deformasi elastis dilanjutkan dengan deformasi plastis. Penambahan pembebanan akan menimbulkan peningkatan deformasi pada material.

## 2.6 Metode Elemen Hingga

### 2.6.1 Sistem Koordinat

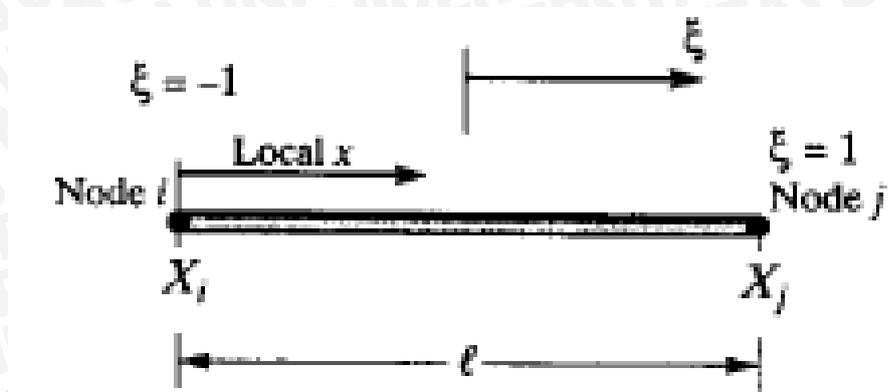
Sistem koordinat dalam analisis dengan metode elemen hingga dibagi menjadi tiga macam, yaitu:

- Sistem koordinat global adalah kerangka dari acuan untuk bagian keseluruhan. Semua titik diletakkan pada penggunaan jarak sistem koordinat global, hanya ada satu sistem global dalam sebuah analisa khusus seperti pada Gambar 2.15.
- Sistem koordinat lokal adalah pendekatan terhadap elemen. Orientasinya relatif terhadap elemen yang tidak mepedulikan perubahan dari orientasi relatif elemen ke sistem global. Dapat dijelaskan seperti pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Hubungan sistem koordinat global dengan koordinat elemen  
Sumber : Moaveni, 1999 : 131

- c. Sistem koordinat alamiah (natural). Sistem ini terdiri dari koordinat dimensi yang letaknya ditandai pada elemen tanpa memperdulikan ukuran atau bentuk elemennya seperti pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Hubungan sistem koordinat lokal dengan koordinat natural elemen.  
Sumber : Moaveni, 1999 : 132

### 2.6.2 Prosedur Perhitungan Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu prosedur numerik dengan konsep dasar adalah pembagian (diskretisasi) suatu kontinum menjadi elemen-elemen kecil yang berhingga dan memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana dari kontinumnya yang disebut elemen hingga. Analisa metode elemen hingga dilakukan untuk mendapatkan suatu nilai pendekatan (bukan eksak) berdasarkan asumsi perpindahan atau asumsi tegangan atau dapat juga berdasarkan kombinasi keduanya.

#### 1. Diskretisasi dan pemilihan elemen

Diskretisasi adalah proses membagi suatu struktur menjadi elemen-elemen kecil yang berhingga dan memiliki geometri yang lebih sederhana. Elemen-elemen ini berhubungan pada titik-titik simpul (node) membentuk rangkaian yang secara bersama dan keseluruhan mendekati bentuk struktur sebenarnya. Jadi bentuk geometri struktur yang kompleks dapat disederhanakan dengan diskretisasi untuk lebih mempermudah penganalisaan.

Pemilihan jenis elemen tergantung pada karakteristik rangkaian kesatuan dan idealisasi yang dipilih. Idealisasi struktur dua dimensi dapat menggunakan elemen segitiga, segiempat maupun kuadrilateral, sedangkan struktur tiga dimensi dapat menggunakan elemen heksahedron.

## 2. Memilih fungsi pendekatan

Variasi perpindahan pada suatu elemen didekati dengan fungsi interpolasi yang didasarkan pada harga simpul yang mengitari. Fungsi yang umum digunakan adalah polinomial. Pendekatan dengan fungsi interpolasi ini disebabkan sulitnya mencari jawaban tertutup, sehingga dipilih suatu bentuk jawaban, yaitu distribusi perpindahan yang merupakan besaran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi yang harus memenuhi hukum, prinsip dan syarat batas yang menjadi sifat persoalan.

## 3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan

Prinsip usaha virtual menghasilkan persamaan matrik kekakuan elemen, yang dinyatakan sebagai:

$$[k] = \int [B]^T [C] [B] dV \quad (2-16)$$

Dengan:

$[k]$  = matrik kekakuan elemen

$[B]$  = matrik konstitutive hubungan regangan-perpindahan

$[C]$  = matrik konstitutive hubungan tegangan-regangan

$V$  = volume

## 4. Menghitung matrik beban total

Beban yang bekerja didefinisikan menjadi tiga macam, sehingga beban total adalah:

$$F = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \quad (2-17)$$

Dengan:

$Q_{NF}$  = beban pada konsentrasi node

$Q_{BF}$  = beban akibat beban sendiri (*body force*)

$Q_T$  = beban traksi (*surface traction*)

### 5. Merakit elemen menjadi struktur

Perakitan persamaan elemen dibawa ke bentuk persamaan global. Prosesnya harus memenuhi sifat konvergen dan sifat sinambung, yaitu titik-titik yang semula bersebelahan harus tetap bersebelahan setelah elemen dikenai beban. Bentuk persamaan global elemen:

$$[K]\{q\} = \{R\} \quad (2-18)$$

Dengan:

$[K]$  = matrik sifat/kekakuan elemen

$\{q\}$  = vektor perpindahan node

$\{R\}$  = matrik beban total

Setelah matrik kekakuan global diperoleh dan syarat-syarat batasnya dimasukkan maka perpindahan simpul ( $q$ ) dapat dicari. Suatu syarat batas memberikan informasi bagaimana struktur ditopang dalam ruang, dengan memasukkan nilai perpindahan yang telah ditetapkan sesuai kondisi pada struktur.

### 6. Mendapatkan perpindahan global

Persamaan global yang mendapatkan syarat batas merupakan sekumpulan persamaan linier yang dapat diselesaikan dengan cara eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran primer, yaitu  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ .

$$\begin{aligned} k_{1,1} q_1 + k_{1,2} q_2 + \dots + k_{1,n} q_n &= R_1 \\ k_{2,1} q_1 + k_{2,2} q_2 + \dots + k_{2,n} q_n &= R_2 \\ \dots & \\ k_{n,1} q_1 + k_{n,2} q_2 + \dots + k_{n,n} q_n &= R_n \end{aligned} \quad (2-19)$$

Persamaan diatas akan diselesaikan dengan cara eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran rimer yaitu  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ .

### 7. Mendapatkan besaran sekunder dan interpretasi hasil

Dari besaran pertamanya yang berupa perpindahan, dapat dicari besaran sekunder yang berupa tegangan atau regangan, dengan menggunakan hubungan antar keduanya. Hubungan tegangan-regangan pada kondisi 3D daat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2-20)$$

Hubungan tegangan-regangan:

$$\{\sigma\} = [C] \{\epsilon\} \quad (2-21)$$

Hubungan regangan-perpindahan:

$$\{\epsilon\} = [B] \{d\} \quad (2-22)$$

Sehingga tegangan dapat dirumuskan sebagai:

$$\{\sigma\} = [C] [B] \{d\} \quad (2-23)$$

Hasil akhir dari perhitungan dengan metode elemen hingga ini berupa harga distribusi tegangan yang akan ditampilkan di sepanjang struktur untuk dianalisa sesuai dengan rumusan masalah.

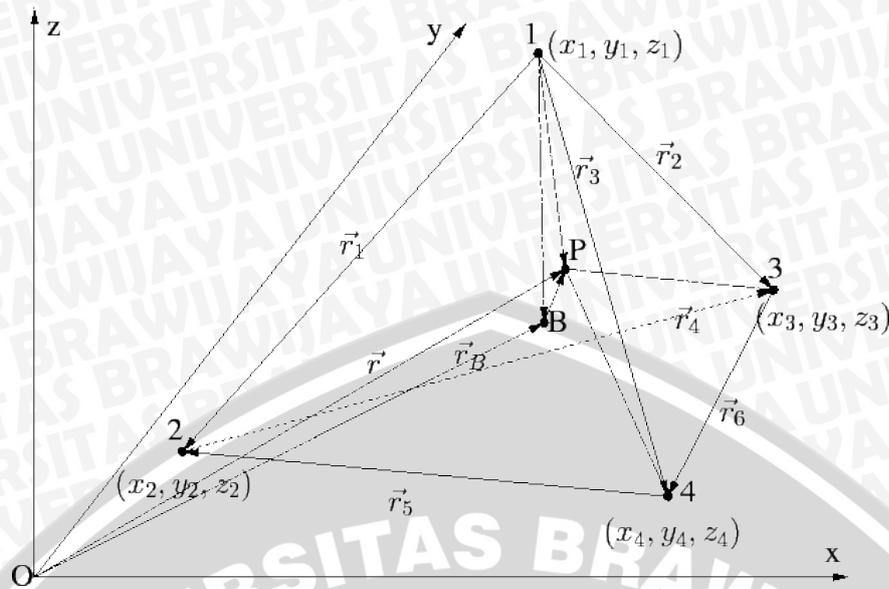
### 2.6.3 Tipe Elemen untuk Analisis Tiga Dimensi

Analisa elemen hingga pada dasarnya dikembangkan untuk kondisi 2-D struktur 3-D menyebabkan penambahan persamaan berganda dalam jumlah besar, tetapi dengan menggunakan elemen dengan orde lebih tinggi dan komputer yang lebih cepat, maka masalah tersebut dapat diatasi.

Macam- macam Tipe Elemen Hingga :

#### 1. Elemen *Tetrahedral*

Elemen *tetrahedral* didefinisikan dalam tiga sumbu koordinat ,  $x,y,z$ , sehingga memiliki tiga komponen perpindahan yaitu  $u, v, w$ . Skema elemen *tetrahedral* dalam sumbu koordinat dapat dilihat pada Gambar 2.17 di bawah ini.



Gambar 2.17 Elemen *tetrahedral*  
 Sumber : Nentchev (1997 : 21)

Untuk mendapatkan volume *tetrahedral*,  $V$ , dapat diperoleh dengan menggunakan fungsi determinan dari matriks *tetrahedral*.

$$6V = \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_m & y_m & z_m \\ 1 & x_p & y_p & z_p \end{vmatrix} \quad (2-24)$$

Persamaan diatas akan menghasilkan nilai dari volume *tetrahedral*. Persamaan diatas diselesaikan dengan menggunakan kofaktor dari determinan matriks tersebut, sehingga diperoleh nilai  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  sebagai komponen untuk memperoleh besarnya perpindahan dengan menggunakan persamaan :

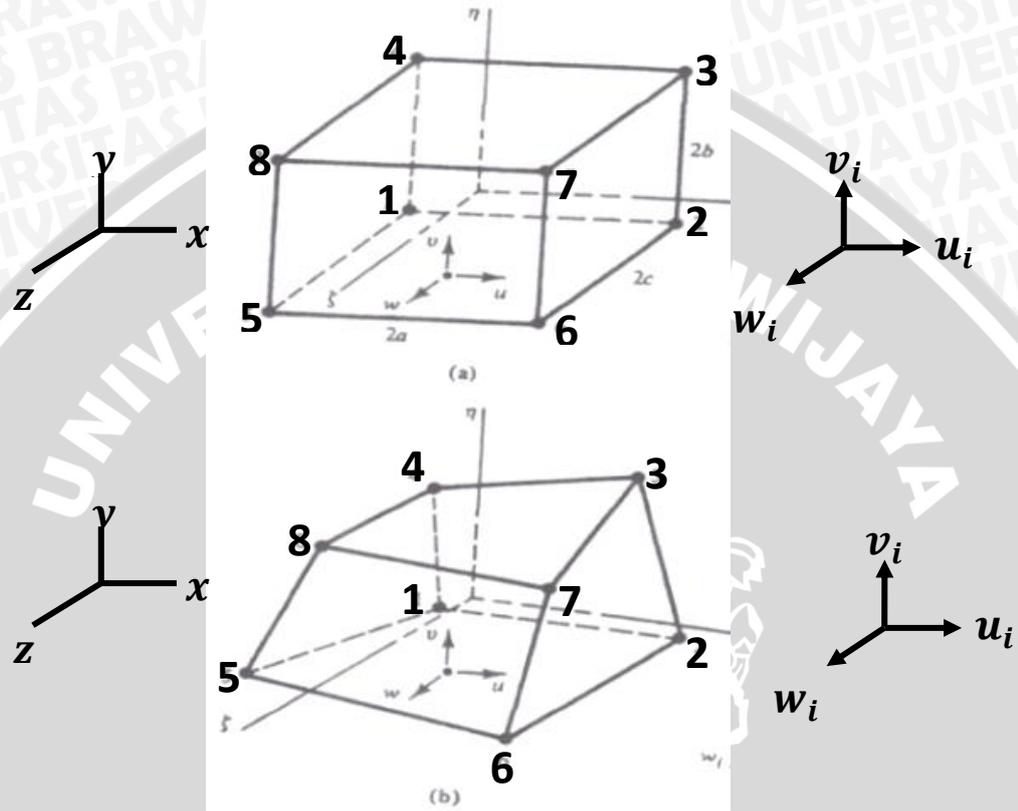
$$N_i = \frac{a_i + b_y + c_z}{6V} \quad (2-25)$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut, akan diperoleh besarnya perpindahan sebagai besaran primer. Hasil akhir dari perhitungan dengan metode elemen hingga ini berupa harga distribusi tegangan yang akan diplot disepanjang struktur untuk dianalisis sesuai dengan rumusan masalah yang ada.



2. Elemen *heksahedron*

Elemen *heksahedron* didefinisikan dalam tiga sumbu koordinat  $x, y, z$  sehingga memiliki tiga komponen perpindahan yaitu  $u, v, w$ . skema elemen *heksahedron* dalam sumbu koordinat dapat dilihat ada Gambar 2.18 dibawah ini.



Gambar 2.18 Elemen *heksahedron*  
 Sumber : Cook (1989:67)

Hubungan antara regangan-peralihan dapat lebih disederhanakan menjadi:

$$\epsilon_t = B_i q_i \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \tag{2-26}$$

Dimana :

$$B_1 = df_1 \begin{bmatrix} f_{i,x} & 0 & 0 \\ 0 & f_{i,y} & 0 \\ 0 & 0 & f_{i,z} \\ f_{i,y} & f_{i,x} & 0 \\ 0 & f_{i,z} & f_{i,y} \\ f_{i,z} & 0 & f_{i,x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{G11} & 0 & 0 \\ 0 & D_{G2i} & 0 \\ 0 & 0 & D_{G3i} \\ D_{G2i} & D_{G1i} & 0 \\ 0 & D_{G3i} & D_{G2i} \\ D_{G3i} & 0 & D_{G1i} \end{bmatrix} \tag{2-27}$$



Sehingga dari hubungan antara regangan dan peralihan dapat dieliminasi sehingga akan mendapatkan tegangan dan regangan dalam metode elemen hingga.

## 2.7 Software Berbasis Metode Elemen Hingga

Secara umum langkah-langkah analisis dengan menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga dibagi menjadi tiga, yaitu :

### 1. *Preprocessing* (Proses Awal)

Tahap-tahap penting dalam *Preprocessing* :

- Pemodelan geometri : disini dilakukan proses modeling geometri baik 1D, 2D maupun 3D.
- Pemilihan tipe elemen : digunakan untuk mendiskritisasikan model yang dibuat.
- *Material properties* : input data material yang digunakan.
- *Meshing* : pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil/elemen diskrit.

### 2. *Solution* (Proses Solusi)

Tahap-tahap penting dalam *Solution* :

- Mendefinisikan analisis solusi yang dipakai (*Analysis Type*).
- Memasukkan kondisi batas (*constrain*).
- Menerapkan pembebanan.
- Penyelesaian (*Solving*).

### 3. *General Postprocessing* (Proses Pembacaan Hasil)

#### • *Plot Result*

Dengan menggunakan *contour plot* akan tampak distribusi tegangan atau variabel lain pada model sehingga mudah dalam menginterpretasikan informasi yang disajikan. Disini model digambarkan dengan sebaran warna yang menunjukkan besarnya tegangan yang terjadi.

#### • *List Result*

Hasil analisis dalam bentuk *List Result* berupa tabel yang memberikan informasi secara detail mengenai perindahan, tegangan dan regangan yang terjadi pada tiap node maupun elemennya.

#### • *Animation*

Hasil analisa ditampilkan dalam bentuk simulasi (animasi).

## 2.8 Hipotesis

Semakin besar sudut tirus pada dinding suatu *crash box* maka akan meningkatkan kemampuan *crash box* tersebut dalam menyerap energi. Semakin besar luas penampang suatu *crash box* maka nilai beban kritis ketika diberi kompresi aksial untuk memulai *buckling* akan semakin besar, karena kekakuannya yang semakin meningkat.

