

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Proses pembentukan logam atau biasa juga sering disebut dengan *metal forming* adalah suatu proses pembentukan logam dengan mempergunakan gaya untuk mengubah bentuk atau ukuran dari benda kerja yang dikerjakan. Klasifikasi Secara umum dapat dibagi menjadi 4 kelompok besar, yaitu proses *bending*, *pressing*, *drawing*, dan *shearing* (DeGarmo). Salah satu dari proses pembentukan logam yang sering digunakan dalam industri-industri ialah *bending* yang merupakan salah satu bagian dari proses pembentukan yang banyak sekali digunakan dalam industri otomotif, khususnya dalam pembuatan *body* atau rangka kendaraan. Dimana pada proses ini material yang dikerjakan harus dapat berubah bentuk secara plastis dibawah suatu beban tanpa mengalami gangguan pada keutuhan material tersebut (retak, pecah).

Dalam sebuah perusahaan, proses pengembangan produk merupakan sebuah mata rantai penting untuk mempertahankan eksistensi dan kelangsungan hidup perusahaan. Hal ini tentu akan memberikan masukan kepada pihak manajemen perusahaan untuk senantiasa melakukan langkah-langkah strategis bagi peningkatan kualitas dan pengembangan produk. Peningkatan kualitas produk dapat dicapai melalui desain yang tepat dengan mempertimbangkan fungsi yang dibutuhkan dan dapat disesuaikan dengan aspek-aspek manufaktur.

Perusahaan yang bergerak didalam industri plat *metal forming* membutuhkan suatu metode yang baik agar dalam proses manufakturnya tidak terjadi banyak kesalahan. Banyak dari industri manufaktur masih menggunakan prosedur *trial and error* sehingga membuat hasil dari produk sering kali tidak sesuai dengan yang diharapkan.

Banyak sekali permasalahan atau cacat yang sering dijumpai dalam proses *bending*, salah satu permasalahan utama dalam proses *bending* adalah sering terjadinya perubahan dimensi pada hasil akhir pembentukan yang tidak sesuai dengan yang diharapkan. Selain karakteristik fisik material, ada beberapa faktor lain yang juga berpengaruh terhadap hasil akhir pembentukan, antara lain ketebalan plat, radius *bending*, dimensi awal plat, parameter proses, dan *design tool* yang digunakan. Dalam mendesain dimensi awal material maupun *setting tool* untuk mendapatkan hasil akhir yang sempurna, masih sering dilakukan

prosedur *trial and error*, sehingga mulailah banyak digunakan bantuan simulasi komputer, sebagai prediksi proses untuk lebih menghemat waktu analisa.

Cao, Jian (2001) mengembangkan simulasi metode elemen hingga dengan bantuan *software* ABAQUS pada proses *bending* bentuk *straight flanging* untuk mengetahui pengaruh penambahan gap (lebar antara *punch* dan *die*) dan panjang *flange* (panjang pembengkokan) terhadap *springback* yang terjadi. Dari hasil simulasi dapat ditarik kesimpulan bahwa sudut *springback* akan bertambah seiring dengan penambahan gap dan semakin pendeknya panjang *flange*.

Kulkarni, Pravin, dan Prabhakar, Shashikiran (2003) melakukan studi mengenai *springback* pada aluminum, untuk mengetahui pengaruh efek dari laju regangan (*strain-rate*) pada *springback* yang terjadi pada material *aluminum 2024*. Studi yang menggunakan baik metode eksperimen langsung maupun metode elemen hingga dengan simulasi komputer LS-Dyna ini, menghasilkan kesimpulan bahwa *aluminum alloy 2024-T3* lebih sensitif untuk membentuk laju regangan dibandingkan dengan *aluminum alloy 2024-O*. Dari studi ini bisa dilihat bahwa jenis material sangat mempengaruhi laju regangan yang terjadi. Perbedaan laju regangan sangat berkaitan langsung dengan bentuk deformasi produk akhir yang terjadi.

Cao, Jian; Buranathiti, Thaweeapat (2004) melakukan penelitian model analitis untuk memprediksi *springback* pada proses *bending* bentuk *straight flanging*. Dari hasil analisa disebutkan bahwa perubahan radius *die* mempunyai efek lebih besar dibandingkan dengan perubahan *gap*. Hampir sama dengan yang dilakukan Jian Cao (2001), prediksi *springback* menggunakan model analitis menghasilkan kesimpulan yang sama dengan menggunakan metode elemen hingga. Salah satunya yaitu sudut *springback* yang semakin mengecil seiring dengan pengurangan lebar gap maupun pengurangan radius die, yang disebabkan karena perbedaan nilai regangan maupun tegangan yang terjadi pada setiap *setting* variabel bebas yang berbeda.

Choiron, Moch. Agus, dan Widiarko, Kiki Amban (2006) mensimulasikan *springback* pada proses *bending* bentuk *straight flanging* dengan pemodelan dua dimensi, disimpulkan bahwa penambahan radius belokan *die* akan memperbesar daerah elastis pada daerah bengkakan, sehingga *springback* yang terjadi semakin besar. Untuk variasi ketebalan plat didapatkan hasil yang sebaliknya, dimana sudut *springback* akan menurun

seiring pertambahan tebal plat. Penelitian selanjutnya (Choiron, Moch. Agus, 2006) dengan simulasi tiga dimensi proses *bending* bentuk *jogged flange* yang bentuknya lebih kompleks dibandingkan dengan *straight flange*. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan elemen tiga dimensi, dimana komputasinya menggunakan bantuan *software* aplikasi komputer DEFORM-3D ver 5.0. Dengan melihat pengaruh radius *die* dan tebal plat terhadap *springback* yang terjadi, menghasilkan kesimpulan yang sama. Akan tetapi hasil yang didapat menunjukkan kecacatan baru yaitu ketidakrataan hasil produk akhir, akibat *strain-rate* (laju-regangan) pada tiap segmen bahan baku yang berbeda, terutama pada radius belokan plat. Pada daerah tersebut muncul kedwisumbuan tegangan, sehingga deformasi yang terjadi menjadi tidak seragam. Selain karena pengaruh bentuk *tool* (*die*, *blankholder* dan *punch*), pelumasan, kecepatan *punch*, gaya *blankholder*, maupun penyebab lain yang dapat diperbaiki dengan mudah adalah belum dioptimasikannya dimensi awal bahan baku plat.

Riptanto, Saptonugroho Sum Adi mensimulasikan pengaruh dimensi awal plat terhadap ketidakrataan ketinggian yang terjadi pada sisi *flange* pada proses *bending* bentuk *jogged flange* dengan menggunakan bantuan *software* aplikasi komputer DEFORM-3D ver 5.0. Dilakukan *flanging/wiping die* pada sisi *flange* dengan bervariasi radius kedua belokan pada sisi *flange*, antara 5 mm sampai dengan 15 mm. Dari hasil simulasi ditemukan bahwa besar tegangan utama pada sisi belokan memiliki kecenderungan lebih besar dibandingkan pada sisi yang rata.

Dari latar belakang tersebut, penulis ingin mencoba mengembangkan penelitian-penelitian yang sudah ada mengenai *bending flange* dengan cara menganalisis pengaruh dimensi awal plat dengan bervariasi parameter dimensi awal plat dari proses *Bending* bentuk *Jogged Flange* mulai dari tebal plat, perbandingan radius sisi *flange*, dan perbandingan panjang sisi *flange* untuk menemukan pengaruhnya terhadap cacat ketidakrataan pada belokan *flange*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka rumusan masalah yang akan dianalisis pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh dari dimensi awal plat proses *bending* bentuk *jogged flange* terhadap cacat ketidakrataan.

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk menghindari meluasnya permasalahan yang ada dari rumusan masalah diatas, maka diberikan batasan terhadap masalah yang akan diteliti sebagai berikut:

1. Proses pembentukan logam yang dibahas adalah proses *Wipe Bending* bentuk *Jogged Flange*.
2. Kriteria cacat yang diteliti adalah cacat ketidakrataan.
3. Parameter dimensi awal plat yang akan dibahas adalah:
  - o Tebal plat
  - o Perbandingan radius sisi *flange*
  - o Perbandingan panjang sisi *flange*
4. Pemodelan dilakukan dengan simulasi 3D dengan menggunakan *software* ANSYS Workbench ver 13.
5. Model bahan baku dimodelkan sebagai *elastroplastic*.
6. *Punch, Die, dan Holder* dimodelkan sebagai material *rigid*.
7. Koefisien gesek diasumsikan dianggap konstan 0,125.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh variasi dimensi awal dari proses *wipe bending* bentuk *jogged flange* terhadap cacat ketidakrataan hasil akhir pada sisi belokan *flange*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini bagi bidang keilmuan adalah:

1. Penelitian ini nantinya dapat diaplikasikan ke dalam dunia industri, khususnya industri plat *metal forming* yang memproduksi bentuk *Jogged Flange*.
2. Memberikan gambaran mengenai proses *bending* melalui simulasi komputer yang berguna untuk mereduksi waktu yang diperlukan dalam *trial and error setting* proses *bending* beserta penentuan dimensi awal bahan baku plat. Dengan simulasi akan diperoleh bentuk desain awal dimensi bahan baku plat secara *virtual* yang dapat dikembangkan setiap saat dan tentunya dengan waktu yang jauh lebih cepat.
3. Menjadi dasar acuan sehingga dapat dilakukan penelitian selanjutnya.

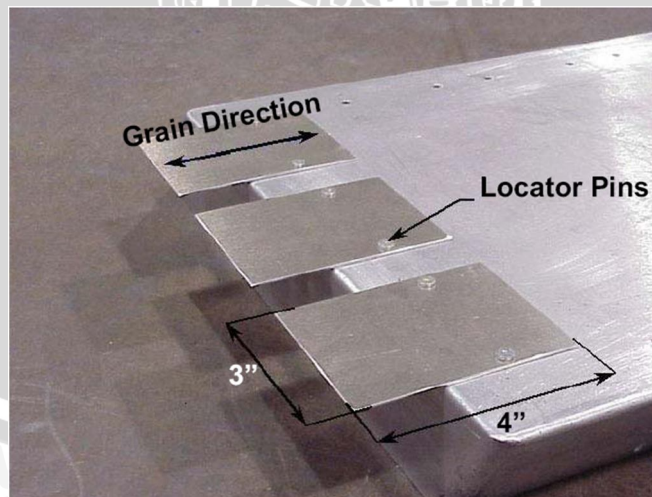
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

**Cao, Jian (2001)** mengembangkan simulasi metode elemen hingga dengan bantuan *software* ABAQUS pada proses *bending* bentuk *straight flanging* untuk mengetahui pengaruh penambahan *gap* (lebar antara *punch* dan *die*) dan panjang *flange* (panjang pembengkokan) terhadap *springback* yang terjadi. Dari hasil simulasi dapat ditarik kesimpulan bahwa sudut *springback* akan bertambah seiring dengan penambahan *gap* dan semakin pendeknya panjang *flange*.

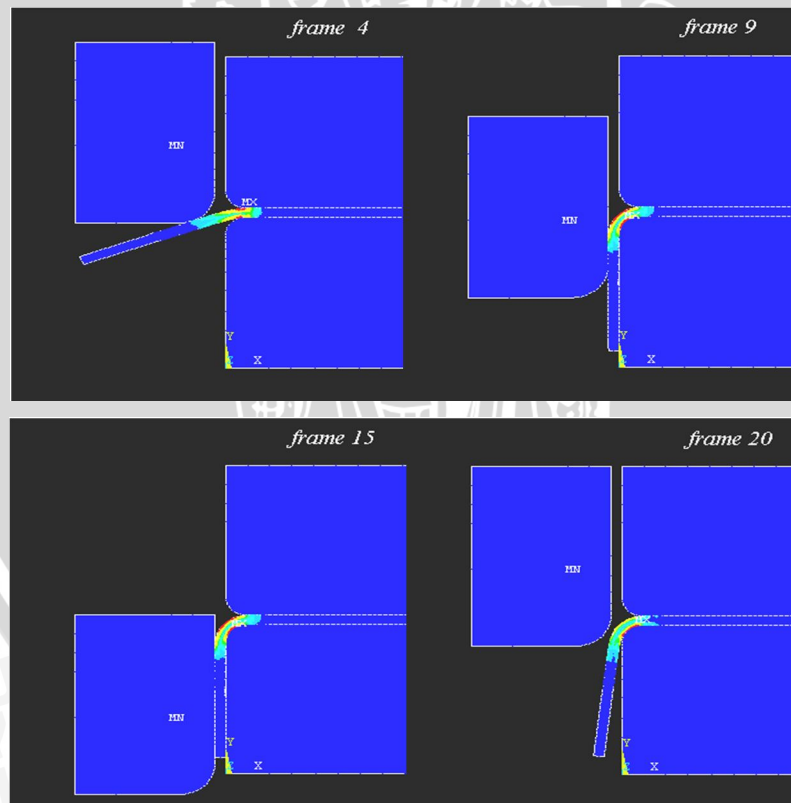
**Kulkarni, Pravin, dan Prabhakar, Shashikiran (2003)** melakukan studi mengenai *springback* pada aluminum, untuk mengetahui efek dari laju regangan (*strain-rate*) pada *springback* yang terjadi pada material *aluminum* 2024. Studi yang menggunakan baik metode eksperimen langsung (gambar 2.1) maupun metode elemen hingga dengan simulasi komputer LS-Dyna ini, menghasilkan kesimpulan bahwa *aluminum alloy* 2024-T3 lebih sensitif untuk membentuk laju regangan dibandingkan dengan *aluminum alloy* 2024-O. Dari studi ini bisa dilihat bahwa jenis material sangat mempengaruhi laju regangan yang terjadi. Perbedaan laju regangan sangat berkaitan langsung dengan bentuk deformasi produk akhir yang terjadi.



Gambar 2.1 *Setting tool* pada eksperimen Pravin Kulkarni  
Sumber: Kulkarni, Pravin dan Prabhakar, Shashikiran (2003)

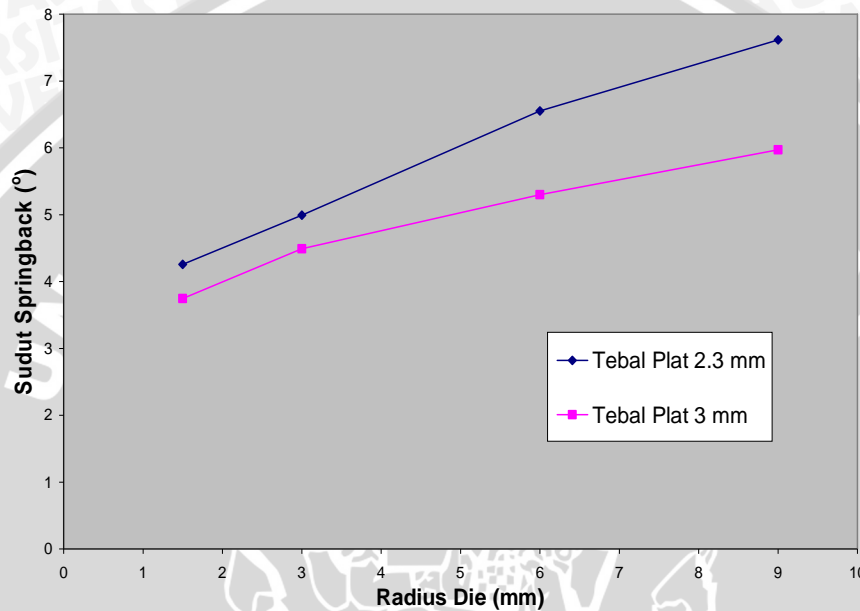
Cao, Jian; Buranathiti, Thaweapat (2004) melakukan penelitian model analitis untuk memprediksi *springback* pada proses *bending* bentuk *straight flanging*. Dari hasil analisa disebutkan bahwa perubahan radius *die* mempunyai efek lebih besar dibandingkan dengan perubahan *gap*. Hampir sama dengan yang dilakukan Jian Cao (2001), prediksi *springback* menggunakan model analitis menghasilkan kesimpulan yang sama dengan menggunakan metode elemen hingga. Salah satunya yaitu sudut *springback* yang semakin mengecil seiring dengan pengurangan lebar *gap* maupun pengurangan radius *die*, yang disebabkan karena perbedaan nilai regangan maupun tegangan yang terjadi pada setiap *setting* variabel bebas yang berbeda.

Choiron, Moch. Agus, dan Widiarko, Kiki Amban (2006) mensimulasikan *springback* pada proses *bending* bentuk *straight flanging* dengan pemodelan dua dimensi, disimpulkan bahwa penambahan radius *die* akan memperbesar daerah elastis pada daerah pembengkokan, sehingga *springback* yang terjadi semakin besar.



Gambar 2.2 Animasi 2D pada proses *straight flanging*.  
Sumber: Choiron, Moch. Agus, dan Widiarko, Kiki Amban (2006).

**Choiron, Moch. Agus, (2006)** melakukan simulasi tiga dimensi proses *bending* bentuk *jogged flange* yang geometrinya lebih kompleks dibandingkan dengan *straight flange*. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan elemen tiga dimensi, dimana komputasinya menggunakan bantuan *software* aplikasi komputer DEFORM-3D ver 5.0. Dengan melihat pengaruh radius *die* dan tebal plat terhadap *springback* yang terjadi, menghasilkan kesimpulan yang sama.



Gambar 2.3 Grafik hubungan radius *die* terhadap sudut *springback* pada variasi tebal plat

Sumber: Choiron, Moch. Agus, (2006).

**Riptanto, Saptonugroho Sum Adi (2007)** melakukan simulasi tiga dimensi proses bentuk *jogged flange* untuk mendapatkan optimasi dimensi awal yang cocok untuk meminimalisir cacat ketidakrataan dengan memvariasikan radius belokan pada plat. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan elemen tiga dimensi, dimana komputasinya menggunakan bantuan *software* aplikasi komputer DEFORM-3D ver 5.0. Dari hasil simulasi ditemukan bahwa besar tegangan utama pada sisi belokan memiliki kecenderungan lebih besar dibandingkan pada sisi yang rata.

## 2.2 Sheet Metal Forming

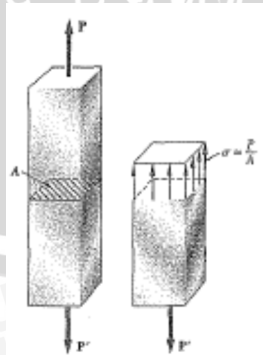
*Sheet metal forming* adalah sebuah proses yang bertujuan agar plat atau material mengalami deformasi plastis sehingga terbentuk komponen dari desain yang diinginkan. Penggunaan *sheet metal forming* menjadi teknik pembentukan yang efektif karena dapat menggantikan proses permesinan dan pengelasan. Komponen yang dihasilkan dari *sheet metal forming* dari bentuk yang sangat sederhana hingga bentuk yang rumit dan kecil seperti yang diperlukan industri elektronik maupun komponen besar seperti bodi mobil pada industri otomotif.

Aplikasi *sheet metal forming* menjadi sangat penting di dalam dunia industri otomotif sejak komponen-komponen mobil dihasilkan dari proses pembentukan dengan proses *metal forming* karena komponen yang dihasilkan lebih bagus dari pada proses pembentukan yang lain seperti halnya pengelasan, selain itu sangat praktis hanya menggunakan beberapa set peralatan cetakan (*rigid tooling dies*) dapat menghasilkan ribuan komponen dengan bentuk dan dimensi yang identik.

Bagian *rigid tooling dies* yang umum dipakai adalah *punch* merupakan bagian yang berfungsi menekan plat kebawah, dan *blank holder* yang merupakan fungsi cekam dari plat agar tetap pada posisi yang stabil.

## 2.3 Deformasi

Tegangan didefinisikan sebagai gaya per satuan luas permukaan dimana gaya bekerja. Tegangan normal adalah tegangan yang disebabkan oleh gaya yang bekerja secara tegak lurus luas permukaan benda (gambar 2.4).



Gambar 2.4 Tegangan akibat gaya pada material

Sumber : Beer, 2006 : 5



$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-1)$$

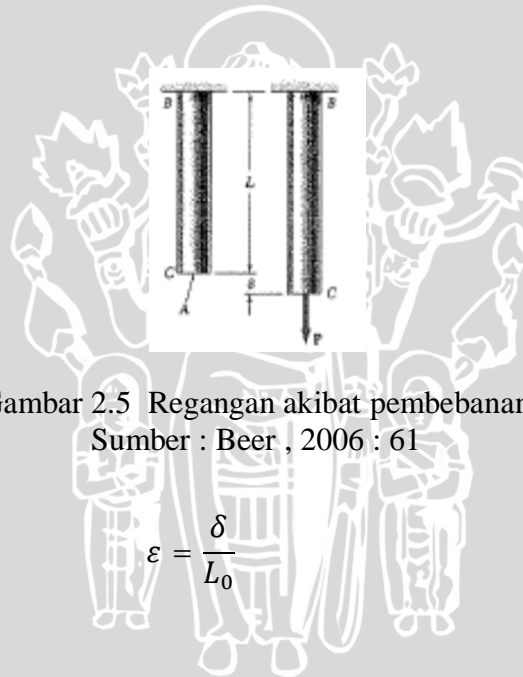
Dengan :

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

$F$  = Gaya normal ( $N$ )

$A$  = Luas permukaan 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 seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Regangan akibat pembebanan  
Sumber : Beer , 2006 : 61

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

dengan :

$\varepsilon$  = Regangan normal

$\delta$  = Perubahan panjang ( $m$ )

$L_0$  = Panjang awal ( $m$ )

Deformasi atau perubahan bentuk terjadi apabila material dikenai gaya. Selama proses deformasi berlangsung bahan menyerap energi sebagai akibat adanya gaya yang bekerja. Sebesar apapun gaya yang bekerja pada bahan, bahan akan mengalami perubahan bentuk dan dimensi. Perubahan bentuk secara fisik pada benda dibagi menjadi dua, yaitu deformasi plastis

dan deformasi elastis. Penambahan beban aksial pada material yang telah mengalami kekuatan tertinggi tidak dapat dilakukan, karena pada kondisi ini bahan telah mengalami deformasi total. Jika beban tetap diberikan maka regangan akan bertambah dimana material seakan menguat yang disebut dengan penguatan regangan (*strain hardening*) yang selanjutnya benda akan mengalami putus pada kekuatan patah (Singer, 1995).

Hubungan tegangan-regangan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P}{\frac{\Delta}{L}} \quad (2-3)$$

Sehingga deformasi ( $\delta$ ) dapat diketahui :

$$\delta = \frac{P \times L}{A \times E} \quad (2-4)$$

dengan :

P = Beban (N)

A = Luas permukaan ( $\text{mm}^2$ )

L = Panjang awal (mm)

E = Modulus Elastisitas ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$\delta$  = Deformasi / pertambahan panjang (mm)

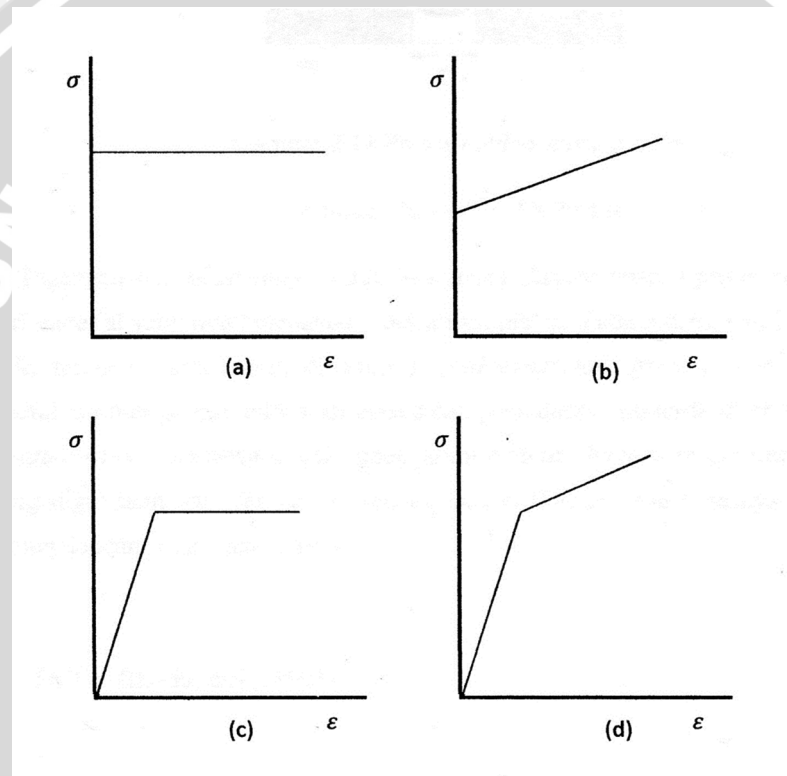
Modulus elastisitas (*Modulus Young*) dinyatakan sebagai perbandingan antara tegangan dan regangan. Modulus elastisitas merupakan karakteristik mekanis dari logam dan setiap logam memiliki modulus elastisitas yang berbeda.

Pada awal pembebanan aksial akan terjadi deformasi elastis, sampai pada kondisi tertentu bahan akan mengalami deformasi plastis. Pada awal pembebanan bahan di bawah kekuatan luluh bahan akan kembali ke bentuk semula, hal ini dikarenakan sifat elastis bahan. Peningkatan beban aksial melebihi kekuatan luluh (*yield point*) yang dimiliki plat akan mengakibatkan aliran deformasi plastis plat tidak akan kembali ke bentuk semula, hal ini bisa dilihat dalam gambar diagram tegangan-regangan uji tarik yang lazim digunakan, yaitu pemodelan *elastic linear strain hardening*.

## 2.4 Hubungan Tegangan dan Regangan Plastis

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 antara tegangan dan regangan. Idealisasi dari permasalahan plastisitas dapat dijelaskan dalam gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Kurva tegangan – regangan permodelan material  
Sumber: Chung, (1988 : 78)

### 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 terpengaruh oleh pembebanan.

d. *Elastic linear strain hardening*

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

## 2.5 Proses Bending

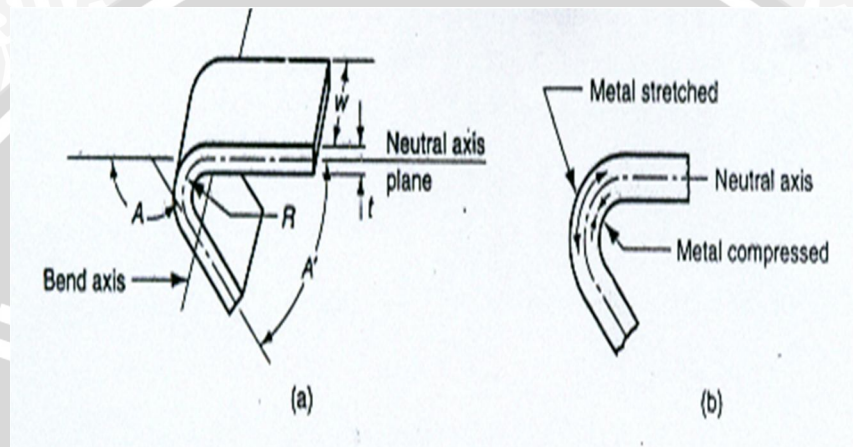
Bending (pembengkokan) adalah proses deformasi secara plastis dari logam dimana bentuk-bentuk yang lurus diubah menjadi lengkungan bersudut terhadap sumbu linier dengan hanya sedikit atau hampir tidak mengalami perubahan luas permukaan. Proses ini merupakan proses yang sering digunakan untuk mengubah plat. Contohnya plat menjadi saluran, drum, tangki dan komponen otomotif serta bentuk-bentuk lainnya (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Contoh bentuk produk-produk hasil proses *bending* plat bentuk jogged flange  
Sumber: <http://www.ozrodders.com>

Jari-jari bending ( $R$ ) didefinisikan sebagai jari-jari lengkungan cekung atau permukaan dalam bengkokan. Pada pembengkokan plastis melampaui batas elastis, sumbu netral bergeser lebih dekat ke permukaan dalam lengkungan pada saat proses pembengkokan dilakukan

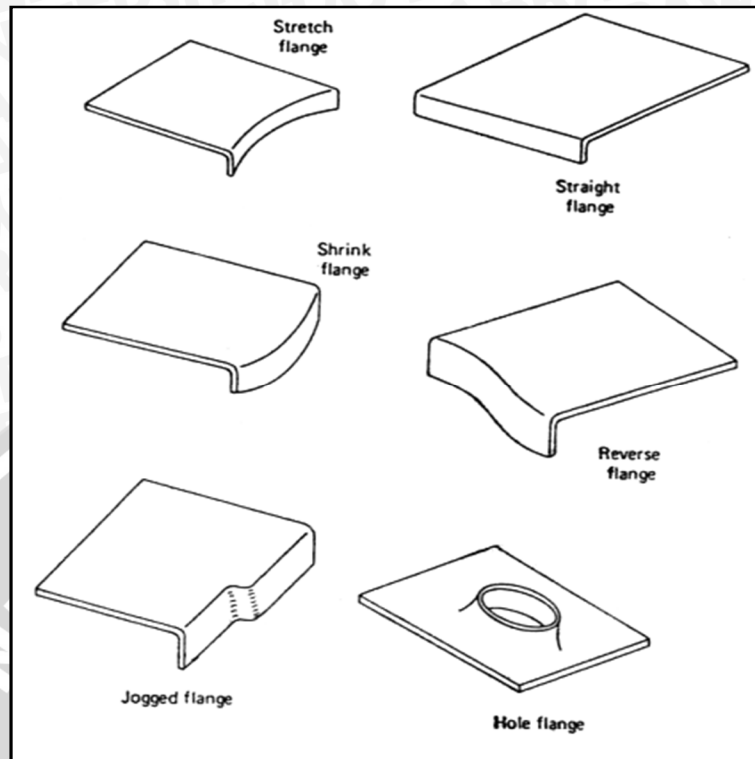
(Gambar 2.8). Karena regangan plastis sebanding dengan jarak dari sumbu netral, serat-serat pada permukaan luar mengalami regangan lebih besar dibanding serat dipermukaan dalam dan serat di permukaan dalam mengalami pengerutan. Serat ditengah-tengah mengalami perentangan dan karena merupakan serat rata-rata, maka harus terjadi pengurangan tebal (pada arah radial) untuk mempertahankan volume konstan, Makin kecil jari-jari lengkungan, makin besar penurunan tebal pada bengkakan.



Gambar 2.8 Skema proses *bending*  
Sumber: Marciniak, Z (2002)

Sebuah plat yang dikenai beban dari luar akan mengalami *defleksi*. Pada beban luar yang tidak terlalu besar *defleksi* plat akan kembali ke bentuk seperti semula setelah beban yang diberikan dilepas. Plat tidak akan terjadi deformasi permanen disebabkan karena gaya elastis plat. Hal ini yang disebut sifat elastisitas material. Peningkatan beban yang melebihi kekuatan luluh (*yield strength*) yang dimiliki plat akan mengakibatkan aliran deformasi plat dimana plat tidak akan kembali ke bentuk seperti semula atau plat mengalami deformasi permanen (*permanent set*) yang disebut plastisitas.

*Flanging* merupakan salah satu jenis dari berbagai macam proses *bending* (Gambar 2.9). *Flanging* adalah proses penekukan dari pembentukan bagian tepi dari lembaran *metal*, biasanya mencapai 90 derajat. Pada dasarnya proses ini sama dengan proses *bending* kecuali pada bagian benda kerja yang dibengkokkan mempunyai ukuran relatif kecil dan biasa terletak di ujung.

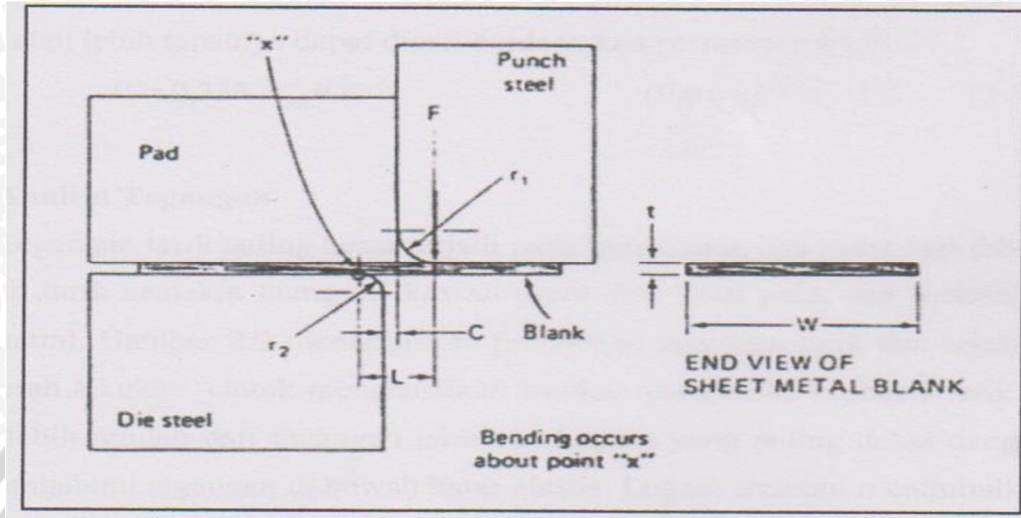


Gambar 2.9 Macam-macam tipe *flange*  
 Sumber: Eary, Donald F. dan Reed, E. A. (1974 : 78)

*Straight flanging* merupakan proses *flanging* yang memiliki bentuk paling sederhana dimana lengkungan membentuk garis lurus searah lebar plat, sehingga geometri produk akhir semisal ketinggian sisi *flange* yang terjadi mudah untuk diamati. Sedangkan *jagged flange* sendiri adalah proses *flanging* yang lebih kompleks dari *straight flange*, dimana lengkungan *flange* tidak lurus, melainkan membentuk belokan, sehingga ketinggian sisi *flange* berbeda pada tiap belokan plat yang berbeda. Proses *flanging* ini memiliki kegunaan yang lebih spesifik dibandingkan *bending* pada umumnya yaitu:

1. *Flanging* digunakan untuk memperkuat ujung dari *part metal* yang berbentuk plat. *Part* ini mungkin berbentuk *flat* atau dapat berupa panel yang berbentuk kompleks seperti yang dihasilkan dari proses pembentukan lain.
2. Pada beberapa kasus, *small flange* digunakan untuk memperhalus ujung berbentuk melingkar sehingga didapatkan penampilan yang menarik.
3. *Flanges* sering kali digunakan untuk menyediakan bentuk bagi penggabungan untuk proses *assembling parts*.

Besarnya gaya yang dibutuhkan untuk proses *bending* khususnya *wiping/flanging dies* dapat dimodelkan sebagai berikut (Gambar 2.10) :



Gambar 2.10 Permodelan gaya *bending*  
 Sumber: Eary, Donald F. dan Reed, E. A. (1974 : 71)

Dari gambar permodelan diatas tampak bahwa pada proses *wipe bending* plat mirip dengan proses penekanan pada *cantilever beam*. Oleh karena itu, rumus balok yang digunakan pada rumus *cantilever beam* adalah:

$$S = \frac{Mc}{I} \tag{2-5}$$

Dimana seperti kita ketahui bahwa rumus formula dari momen inersia, *centroid*, dan momen bendungnya adalah,

$$I = \frac{Wt^3}{12} \tag{2-6}$$

$$c = \frac{t}{2} \tag{2-7}$$

$$M = FL \tag{2-8}$$

Sehingga apabila kita masukkan persamaan (2-6), (2-7), dan (2-8) ke dalam persamaan (2-3) menjadi,

$$S = \frac{FLh/2}{Wt^3/12} \tag{2-9}$$

$$F = \frac{SWt^3/2}{12Lt} \tag{2-10}$$

$$F = 0,167 \frac{SWt^2}{L} \tag{2-11}$$

$$F = 0,167 \frac{SWt^2}{L} \quad \text{dengan } L = r_1 + C + r_2$$

Konstanta 0,167 dinaikkan menjadi 0,333 untuk kompensasi span yang pendek dan tegangan plastis yang terjadi sehingga rumus di atas menjadi :

$$F = 0,333 \frac{SWt^2}{L} \quad (2-12)$$

dengan:

|                |   |  |                      |
|----------------|---|--|----------------------|
| F              | = | gaya <i>bending</i>                      | ( N )                |
| t              | = | tebal plat                               | ( m )                |
| W              | = | lebar plat                               | ( m )                |
| L              | = | <i>span</i>                              | ( m )                |
| r <sub>1</sub> | = | radius <i>punch</i>                      | ( m )                |
| r <sub>2</sub> | = | radius <i>die</i>                        | ( m )                |
| C              | = | kelonggaran <i>die (gap)</i>             | ( m )                |
| S              | = | UTS ( <i>ultimate tensile strength</i> ) | ( N/m <sup>2</sup> ) |
| M              | = | Momen <i>bending</i>                     | ( N.m )              |
| I              | = | Momen inersia                            | ( m <sup>4</sup> )   |
| c              | = | <i>centroid distance</i>                 | ( m )                |

Pada umumnya dalam proses *bending tipe wiping die* diperlukan *pad/holder* yang berfungsi untuk mengimbangi gaya *bending* sehingga plat bisa dibengkokkan. Besarnya gaya yang diberikan pada *pad* umumnya sepuluh kali lebih besar dari gaya *bending* atau lebih tepatnya dapat dicari berdasarkan persamaan berikut:

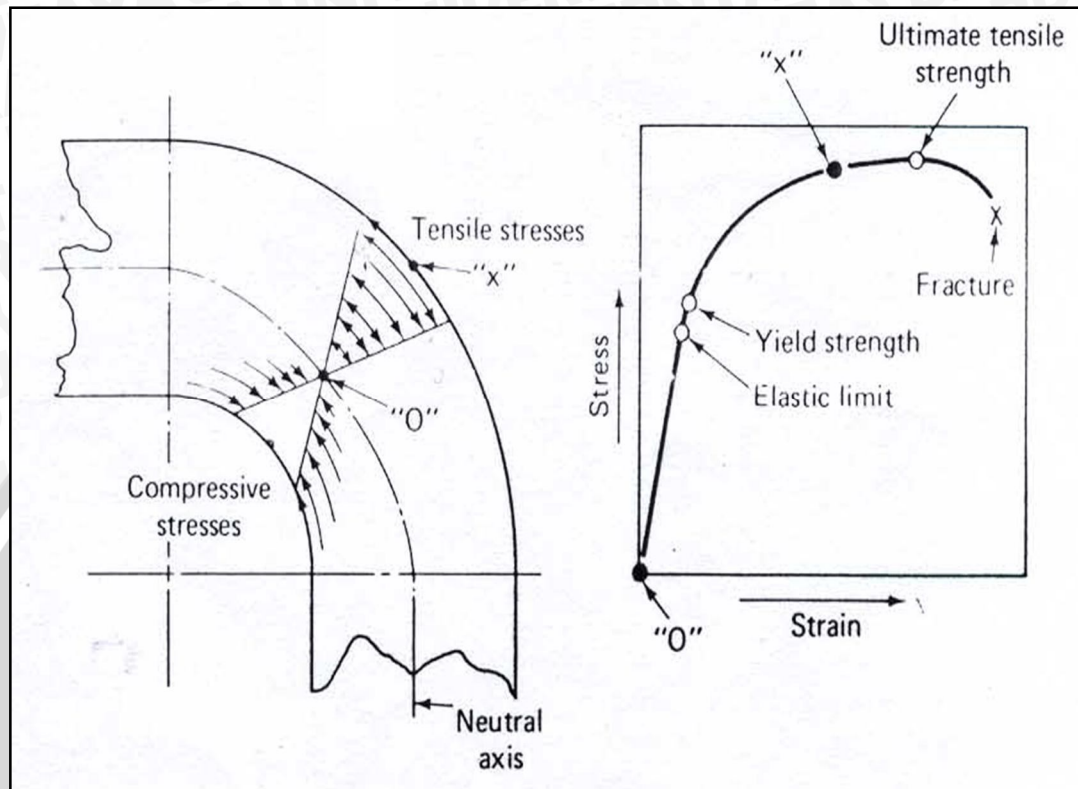
$$F = 0,333 SWt \quad (2-13)$$

## 2.6 Analisa Tegangan

Tegangan tarik paling besar terjadi pada permukaan luar plat saat dibengkokkan. Tegangan tarik semakin kecil kearah pusat dari tebal plat dan bernilai nol pada sumbu netral. Gambar 2.5 menunjukkan perubahan tegangan tarik dan tegangan tekan pada daerah tekukan. Untuk menghasilkan tekukan yang baik, tegangan tarik pada titik x harus lebih rendah dari tegangan *ultimate*. Logam yang paling dekat dengan sumbu netral mengalami tegangan di



bawah batas elastis. Logam tersebut menimbulkan daerah sempit yang elastis pada kedua sisi sumbu netral (Gambar 2.11).



Gambar 2.11 Perubahan tegangan pada radius tekuk  
Sumber: Eary, Donald F. dan Reed, E. A. (1974 : 61)

## 2.7 Cacat Ketidakrataan

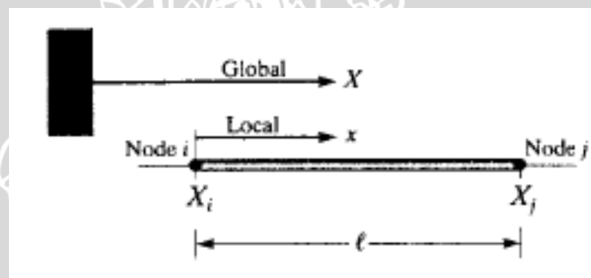
Cacat ketidakrataan merupakan sesuatu yang tidak diinginkan pada hasil produk. Cacat ketidakrataan dalam proses *bending* dapat diakibatkan karena ketidakseragaman deformasi yang terjadi pada proses *bending* itu sendiri. Pada *bending* bentuk *jogged flange*, dimana sisi *flange* yang dibengkokkan tidak rata seperti pada bentuk *straight flange*, pada produk hasil akhirnya bisa didapatkan ketinggian *flange* yang berbeda antara daerah yang lurus dengan daerah yang ada belokannya. Adanya bentuk belokan pada proses *jogged flange*, mengakibatkan terjadinya penipisan tebal plat yang tidak merata yang nantinya dapat mengakibatkan tidak ratanya ketinggian sisi *flange* pada hasil produk akhir. Pengukuran cacat ketidakrataan ketinggian digolongkan sebagai besaran panjang dengan satuannya yaitu meter.

## 2.8 Metode Elemen Hingga

### 2.8.1 Sistem Koordinat

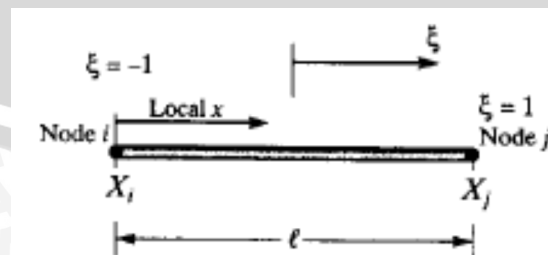
Sistem koordinat dalam analisis dengan metode elemen hingga dibagi menjadi tiga macam, yaitu:

- 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 2.12.
- Sistem koordinat lokal adalah pendekatan terhadap elemen. Orientasinya relatif terhadap elemen yang tidak mempedulikan perubahan dari orientasi relatif elemen ke sistem global. Dapat dijelaskan seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Hubungan sistem koordinat global dengan koordinat lokal elemen  
Sumber : Moaveni, 1999 : 131

- Sistem koordinat alamiah (natural). Sistem ini terdiri dari koordinat dimensi yang letaknya ditandai pada elemen tanpa mempedulikan ukuran atau bentuk elemennya seperti pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Hubungan sistem koordinat lokal dengan koordinat natural elemen  
Sumber : Moaveni, 1999 : 132

### 2.8.2 Prosedur Perhitungan Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan fisika dengan persamaan differensial. Berikut ini diuraikan langkah-langkah dari perhitungan dengan menggunakan metode elemen hingga. Prosedur perhitungan dengan Metode Elemen Hingga antara lain sebagai berikut.

#### 1. Diskritisasi dan pemilihan elemen

Proses pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil yang lebih sederhana yang dihubungkan pada titik simpul (*node*), kemudian dilakukan pemilihan elemen seperti model awal dari struktur. Hal ini dilakukan untuk mempermudah analisis.

#### 2. Memilih fungsi pendekatan

Variasi perpindahan pada suatu elemen didekati dengan fungsi interpolasi yang didasarkan pada harga simpul yang mengitari. Fungsi yang paling umum digunakan adalah polinomial.

#### 3. Menurunkan persamaan matrik kekakuan [k]

Dengan prinsip usaha *virtual* akan dihasilkan persamaan matrik kekakuan elemen yang dinyatakan sebagai berikut :

$$[k] = \int [B]^T [C] [B] d \quad (2-14)$$

dengan:

[k] = matrik kekakuan elemen

[B] = matrik konstitutif hubungan regangan dan perpindahan

[C] = matrik konstitutif hubungan tegangan dan regangan material

V = volume

#### 4. Menghitung matrik beban total

Beban yang bekerja didefinisikan menjadi 3 macam, sehingga beban total adalah :

$$F = Q_{NF} + Q_{BF} + Q_T \quad (2-15)$$

dengan:

$Q_{NF}$  = beban pada konsentrasi nodal

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

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

#### 5. Merakit elemen menjadi struktur

Perakitan persamaan elemen akan dibawa ke bentuk persamaan global, yang prosesnya harus memenuhi sifat konvergen dan sifat sinambung. Salah satunya antara lain : titik-titik yang semula bersebelahan harus tetap bersebelahan satu sama lain setelah elemen dikenai beban. Bentuk persamaan global elemen yaitu :

$$[K]\{q\} = \{R\} \quad (2-16)$$

dengan:

$[K]$  : matrik kekakuan elemen.

$\{q\}$  : vektor perpindahan simpul.

$\{R\}$  : 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 telah mendapatkan syarat batas, merupakan sekumpulan persamaan linier yang secara umum dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 k_{1.1}q_1 + k_{1.2}q_2 + \dots + k_{1.n}q_n &= R_1 \\
 k_{2.1}q_1 + k_{2.2}q_2 + \dots + k_{2.n}q_n &= R_2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 k_{n.1}q_1 + k_{n.2}q_2 + \dots + k_{n.n}q_n &= R_n
 \end{aligned}
 \tag{2-17}$$

Persamaan di atas akan diselesaikan dengan cara eliminasi Gauss untuk mendapatkan besaran-besaran primer 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 dapat berupa tegangan maupun regangan, dengan menggunakan hubungan antara keduanya. Hubungan tegangan-regangan pada kondisi 3D dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}
 \tag{2-18}$$

Hubungan tersebut dapat ditulis dalam bentuk simbol berikut :

$$\{\sigma\} = [C]\{\epsilon\}
 \tag{2-19}$$

Hubungan regangan dengan perpindahan adalah :

$$\{\epsilon\} = [B]\{d\}
 \tag{2-20}$$

Sehingga tegangan dapat dirumuskan sebagai :

$$\{\sigma\} = [C][B]\{d\}
 \tag{2-21}$$

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

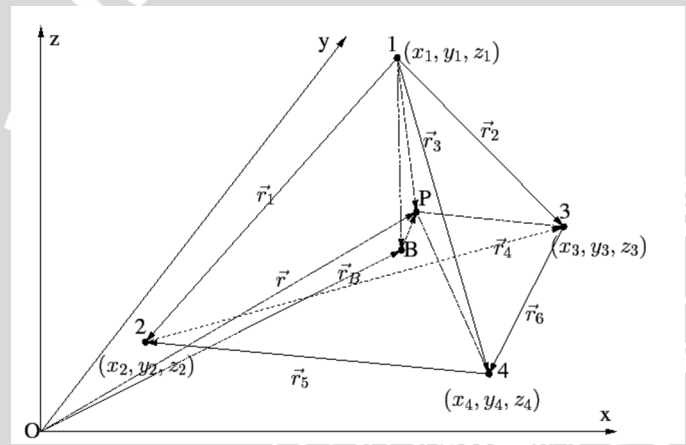
### 2.8.3 Tipe Elemen untuk Analisis Tiga Dimensi

Analisis 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 untuk analisis *solid* :

#### 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 2.14 di bawah ini.



Gambar 2.14 Elemen *Tetrahedral*  
 Sumber : Nentchev , 1997 : 21

Dengan nilai matrik B untuk elemen tetrahedral adalah :

$$B_1 = \begin{bmatrix} f_{i,x} & 0 & 0 \\ 0 & f_{i,y} & 0 \\ 0 & 0 & f_{i,z} \\ f_{i,y} & f_{i,x} & 0 \\ 0 & f_{i,z} & f_{i,y} \\ f_{i,z} & 0 & f_{i,x} \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

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

$$6V = \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_m & y_m & z_m \\ 1 & x_p & y_p & z_p \end{vmatrix} \quad (2-23)$$

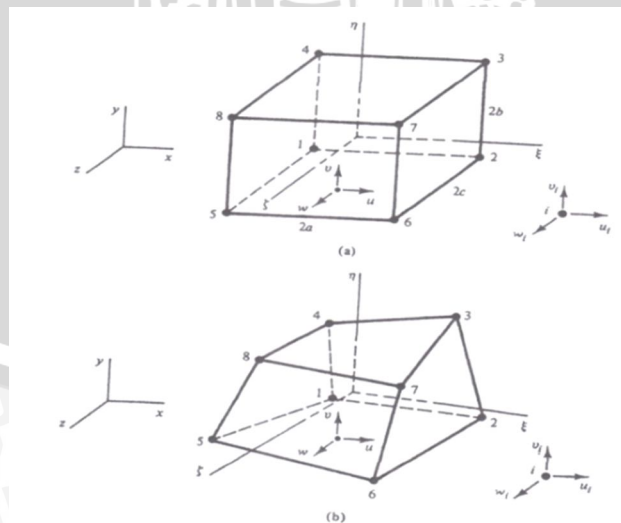
Persamaan di atas akan menghasilkan nilai dari volume *tetrahedral*. Persamaan di atas diselesaikan dengan menggunakan kofaktor dari determinan matriks tersebut, sehingga diperoleh nilai dari  $a_i, b_i, c_i$  sebagai komponen untuk memperoleh besarnya perpindahan dengan menggunakan persamaan :

$$N_i = \frac{a_i + b_y + c_z}{6V} \quad (2-24)$$

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 di sepanjang 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 pada gambar 2.15 di bawah ini.



Gambar 2.15 Elemen *Heksahedron* dan pasangan isoparametriknya  
 Sumber: Cook, 1989 : 67

Hubungan antara regangan-peralihan dapat lebih disederhanakan menjadi:

$$\epsilon_t = B_i q_i \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (2-25)$$

Dimana :

$$B_1 = d f_i \begin{bmatrix} f_{i,x} & 0 & 0 \\ 0 & f_{i,y} & 0 \\ 0 & 0 & f_{i,z} \\ f_{i,y} & f_{i,x} & 0 \\ 0 & f_{i,z} & f_{i,y} \\ f_{i,z} & 0 & f_{i,x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{G1i} & 0 & 0 \\ 0 & D_{G2i} & 0 \\ 0 & 0 & D_{G3i} \\ D_{G2i} & D_{G1i} & 0 \\ 0 & D_{G3i} & D_{G2i} \\ D_{G3i} & 0 & D_{G1i} \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

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

## 2.9 Software Ansys

Simulasi komputer adalah suatu proses simulasi yang dilakukan dengan menggunakan bantuan komputer memakai *software* berbasis metode elemen hingga yang sering kali digunakan untuk membantu menyelesaikan berbagai kasus *engineering*. Salah satu *software* yang menyediakan aplikasi ini ialah *software* ANSYS. *Software* yang berbasis elemen hingga ini mempunyai kelebihan yaitu kemampuan untuk mendiskritisasi model dengan sangat halus, mampu bekerja dengan elemen lebih banyak dan menghasilkan *output* dengan ketelitian tinggi. Contoh kasus-kasus yang mampu diselesaikan *software* ANSYS meliputi:

1. Analisis struktur statis/dinamis baik linier maupun non-linier.
2. Perpindahan panas dan mekanika fluida.
3. Fenomena *elektromagnetik*.

Secara umum langkah-langkah analisis dengan menggunakan ANSYS dibagi menjadi 3 bagian utama. Hal ini menjadi panduan utama dalam menentukan langkah-langkah penyelesaian dengan menggunakan metode ini. Tahap tersebut adalah:

### 1. Preprocessing

Adalah tahap mendefinisikan masalah dengan langkah-langkah sebagai berikut:



- Pemodelan geometri yaitu melakukan proses modeling geometri baik 1D, 2D maupun 3D.
- Menentukan tipe elemen dan material yang digunakan beserta *properties*.
- Melakukan *meshing* yaitu pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil/elemen diskrit pada *lines*, *area* atau *volume* sesuai kebutuhan.

## 2. Solution

Adalah tahap pemberian beban (*load*), *constraint* dan *solving*. Pada tahap ini ditentukan bagaimana beban diaplikasikan dan berapa besarnya. Selanjutnya dipilih model *constraints* yang digunakan (translasi atau rotasi) dan yang terakhir adalah tahap *solving* (*running program*).

## 3. Postprocessing

Adalah tahap akhir dimana hasil dari *solving* bisa dilihat. Pada tahap ini ada beberapa hal yang bisa diamati atau ditampilkan yaitu:

- Perpindahan/*deformation*.
- Distribusi *Strain* (regangan), *Strain Rate* (laju regangan).
- Distribusi *Stress* (tegangan).
- Distribusi temperatur, dan lain-lain.

### 2.10 Hipotesis

Pada proses *bending* bentuk *jogged flange*, akan terjadi ketidakrataan deformasi terutama di daerah belokan sisi *flange* yang diakibatkan oleh distribusi tegangan yang tidak merata. Ketidakseragaman deformasi akan mengakibatkan tidak ratanya ketinggian sisi *flange*.