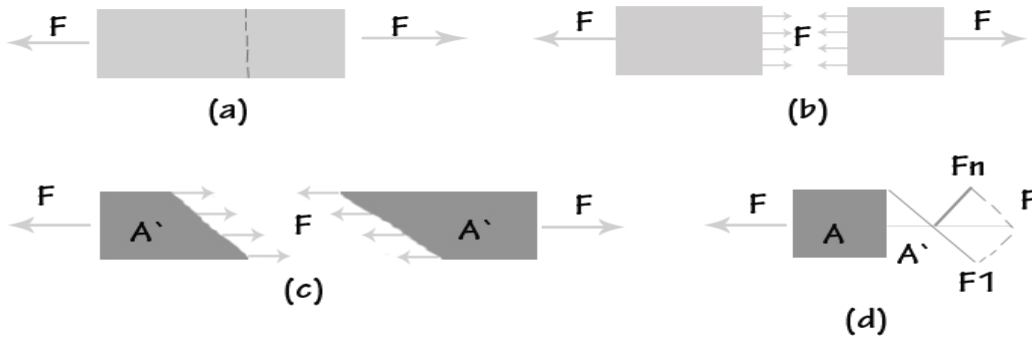


**BAB II**  
**TINJAUAN PUSTAKA**

**2.1. Konsep Tegangan**

Gerak suatu benda tegar, yaitu suatu atraksi matematis guna memudahkan perhitungan, karena semuanya beda nyata, sampai suatu batas tertentu, berubah di bawah pengaruh gaya yang dikerjakan terhadapnya.



Gambar. 2.1. Konsep tegangan (a) Sebuah batang yang tertegang. (b) Tegangan di irisan tegak lurus sama dengan  $F/A$ . (c) dan (d) Tegangan di irisan yang miring dapat iuraikan menjadi tegangan normal  $F_n/A'$  dan tegangan tangensial (singgung)  $F_t/A'$ .

Gambar 2.1 (a) memperlihatkan sebuah batang yang penampang lintangnya *uniform* dan luasnya  $A$ . Batang ini pada masing – masing ujungnya mengalami gaya tarik  $F$  yang sama besarnya dan berlawanan arahnya. Dikatakanlah bahwa batang itu dalam keadaan tertegang.

Irisan tegak lurus pada panjang batang (dalam gambar ditandai dengan garis putus – putus), karena masing – masing potongan batang itu dalam kesetimbangan, maka potongan di sebelah kanan irisan tentu mengerjakan tarikan terhadap potongan di sebelah kiri dengan gaya  $F$ , dan sebaliknya. Asal irisan itu tidak terlalu dekat ujung batang, tarikan tersebut akan terdistribusi merata pada luas penampang lintang  $A$ , seperti ditunjukkan oleh beberapa anak panah pendek dalam Gambar 2-1 (b).

Tegangan (ketegangan) dalam irisan tersebut didefinisikan sebagai perbandingan besar gaya  $F$  pada luasan bidang penampang  $A$  (Persamaan 2-1).

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

Dengan  $F$  adalah gaya yang dikenakan tegak lurus terhadap penampang melintang benda kerja (newton), sedangkan  $A$  merupakan luasan penampang melintang benda kerja (tegak lurus dengan gaya) ( $m^2$ ).

Tegangan semacam ini disebut tegangan tarikan, karena kedua potongan batang itu saling melakukan tarikan satu sama lain. Tegangan itu merupakan pula tegangan normal, sebab gaya yang terdistribusi tegak lurus pada luas.

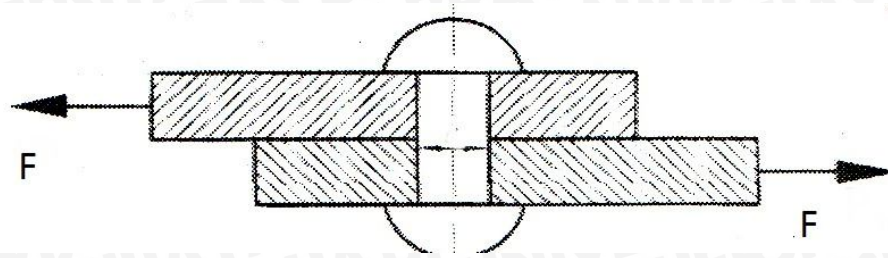
Pada Gambar 2.1 (c) gaya resultan yang dikerjakan terhadap potongan yang satu oleh potongan yang satu lagi dan sebaliknya sama besarnya dan berlawanan arah dengan gaya  $F$  di ujung irisan. Tetapi gaya itu sekarang terdistribusi pada bidang  $A'$  yang lebih luas dan arahnya tidak tegak lurus pada bidang.

Bila resultan seluruh gaya yang terdistribusi itu dinyatakan dengan satu vektor yang besarnya  $F_1$  seperti dalam Gambar 2-1 (d), vektor ini dapat diuraikan menjadi komponen  $F_n$  yang normal terhadap bidang  $A'$  dan komponen  $F_t$  yang tangen terhadapnya. Tegangan normalnya didefinisikan sebagai perbandingan komponen  $F_1$  terhadap bidang  $A'$ . Perbandingan komponen  $F_1$  terhadap bidang  $A'$  disebut tegangan tangensial pada irisan:

$$\text{Tegangan normal} = \frac{F_n}{A'}$$

$$\text{Tegangan tangensial (luncur)} = \frac{F_t}{A'} \quad (2-2)$$

Tegangan timbul akibat adanya tekanan, tarikan, bengkokan dan reaksi. Pada pembebanan tarik terjadi tegangan tarik, pada pembebanan tekan terjadi tegangan tekan, begitu pula pada pembebanan yang lain. Ada beberapa macam tegangan, salah satu macam tegangan yaitu tegangan geser. Tegangan geser terjadi jika suatu benda bekerja dengan dua gaya yang berlawanan arah, tegak lurus sumbu batang, tidak segaris gaya namun pada penampangnya tidak terjadi momen. Tegangan ini banyak terjadi pada konstruksi, misalnya: sambungan keling, gunting dan sambungan baut.



Gambar 2.2. Tegangan Geser

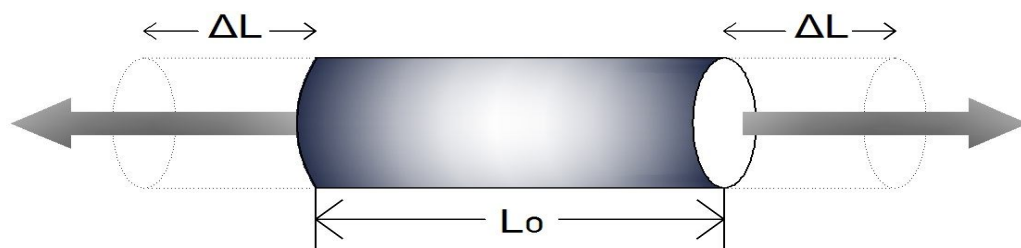
Tegangan geser terjadi karena adanya gaya radial  $F$  yang bekerja pada penampang normal dengan jarak yang relatif kecil, maka pelengkungan benda diabaikan seperti terlihat pada Gambar 2.2.

## 2.2 Konsep Regangan

Regangan (*strain*) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang batang dengan panjang mula-mula yang dinyatakan dengan:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2-3)$$

Dengan  $\Delta L$  adalah pertambahan panjang material setelah dikenai beban dan  $L_0$  adalah panjang mula-mula material ketika belum dikenai beban. Regangan merupakan ukuran mengenai seberapa jauh batang tersebut berubah bentuk. Tegangan diberikan pada materi dari arah luar, sedangkan regangan adalah tanggapan materi terhadap tegangan.



Gambar 2.3. Regangan

Pada Gambar 2.3 pertambahan panjang dapat dilihat dari garis putus – putus, Perpanjangan itu tidak hanya timbul pada ujung – ujung batang saja, setiap unsur batang itu bertambah panjang, sebanding dengan pertambahan panjang batang itu didefinisikan sebagai perbandingan pertambahan panjang terhadap panjang awalnya.

### 2.3. Hubungan Tegangan dan Regangan

Dalam hubungan tegangan dan regangan untuk setiap peningkatan tegangan terjadi pula peningkatan regangan yang sebanding sampai batas tegangan tercapai. Ketika tegangan mencapai nilai batas maka hubungan antara tegangan dan regangan tidak lagi proporsional.

Hubungan proporsional antara tegangan dan regangan ini dinyatakan dalam hukum *Hooke*, yaitu:

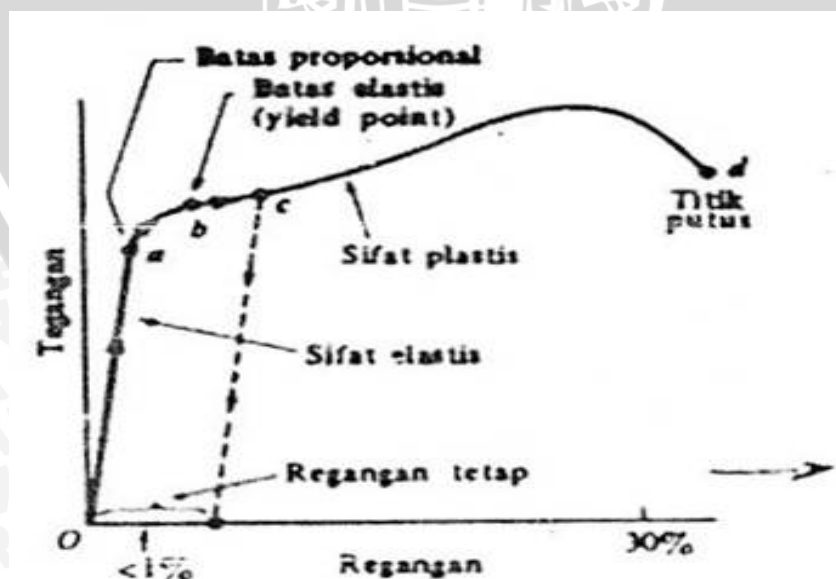
$$\frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} = \frac{\sigma_b}{\varepsilon_b} = \text{konstan} \quad (2-4)$$

Pada Persamaan (2-4) bahan yang mengikuti hukum *Hooke* beban yang bekerja pada  $F_a$  dan  $F_b$  akan menghasilkan tegangan  $\sigma_a$  dan  $\sigma_b$  dan perbandingan dua nilai tersebut konstan.

Konstanta tersebut kini dikenal dengan istilah modulus elastisitas atau modulus *Young*. Modulus elastisitas adalah ukuran kekakuan suatu bahan. Makin besar modulus elastisitas makin kecil regangan elastis yang dihasilkan akibat pemberian tegangan. Modulus *Young* dinotasikan dengan symbol  $E$ , dan berlaku untuk tarik atau tekan, dinyatakan dengan Persamaan (2-5):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\text{tegangan}}{\text{regangan}} \quad (2-5)$$

Hubungan antara tegangan dan regangan tersebut dapat direpresentasikan ke dalam grafik hubungan tegangan dan regangan.



Gambar 2.4. Grafik tegangan dan regangan  
(sumber: <http://img525.imageshack.us/img525/1305/image003i.jpg>)

Grafik tegangan regangan seperti ditunjukkan Gambar 2.8 mempunyai daerah plastis dan elastis dimana ditunjukkan batasnya oleh titik b atau disebut dengan *yield point*. Di bagian awal kurva (sampai regangan yang kurang dari 1 %), tegangan dan regangan adalah proporsional sampai titik a (batas proporsionalnya) tercapai. Hubungan proporsional antara tegangan dan regangan dalam daerah ini disebut hukum *Hooke*. Mulai a sampai b tegangan dan regangan tidak proporsional, tetapi walaupun demikian, bila beban diadukan disembarang titik antara 0 dan b, kurva akan menelusuri jejaknya kembali dan bahan yang bersangkutan akan kembali kepada panjang awalnya. Dikatakanlah bahwa dalam daerah ob bahan itu elastis atau memperlihatkan sifat elastis dan titik b dinamakan batas elastis. Ketika beban ditambahkan, regangan akan bertambah dengan cepat, tetapi apabila beban dilepas di suatu titik selewat b, misalkan di titik c, bahan tidak akan kembali kepanjang awalnya, melainkan akan mengikuti garis putus - putus pada Gambar 2.4. Panjangnya pada tegangan nol kini lebih besar dari panjang awalnya dan bahan itu dikatakan mempunyai suatu regangan tetap (*permanent set*). Penambahan beban lagi sehingga melampaui c akan sangat menambah regangan sampai tercapai titik d, dimana bahan menjadi putus. Dari b ke d, logam itu dikatakan mengalami arus plastis atau deformasi plastis, dalam mana terjadi luncuran dalam logam itu sepanjang bidang yang tegangan luncurnya maksimum. Jika antara batas elastis dan titik putus terjadi deformasi plastis yang besar, logam itu dikatakan kenyal (*ductile*). Akan tetapi jika pemutusan terjadi segera setelah melewati batas elastis, logam itu dikatakan rapuh.

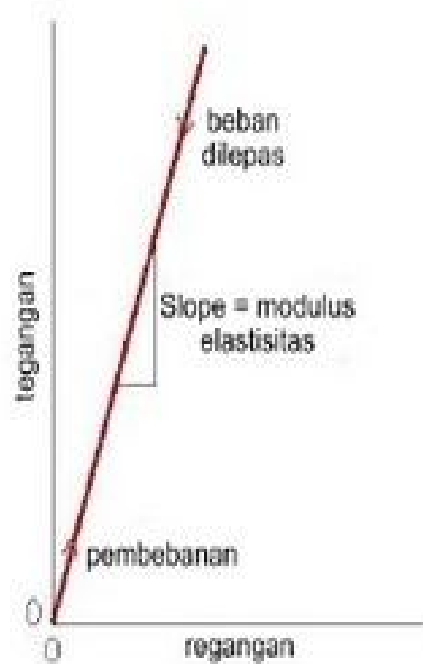
### 2.3.1. Deformasi Elastis

Deformasi elastis adalah deformasi atau perubahan bentuk material yang apabila gaya penyebab deformasi itu dihilangkan maka deformasi kembali ke bentuk semula. Jadi deformasi elastis bersifat *reversible*. Adanya tegangan akan menggeser atom-atom ke tempat yang baru dan atom-atom tersebut akan kembali ke tempat semula ketika tegangan tersebut dihilangkan. Jarak pergeserannya pun relative kecil yaitu kurang dari 0,5%.

Pada uji tarik peningkatan tegangan dan regangan akan sebanding satu dengan lainnya ketika deformasi masih bersifat elastis. Hal ini dikenal sebagai hukum *Hooke*, dengan Persamaan (2-6):

$$\sigma = E \epsilon \quad (2-6)$$

Dengan  $E$  adalah Modulus Elastisitas. Modulus Elastisitas menentukan kemiringan grafik daerah elastis. Modulus Elastisitas mempunyai unit yang sama dengan tegangan. Semakin tinggi  $E$  maka material akan semakin kaku. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Grafik tegangan – regangan menunjukkan deformasi elastis linier saat siklus pembebanan dan pelepasan beban.  
(sumber: <http://id.scribd.com/doc/109073963/20/B-Konsep-Tegangan-dan-Regangan>)

Kemiringan dari *slope* diagram tegangan regangan dapat digunakan untuk menunjukkan modulus elastisitas  $E$ . Pada Gambar 2.5 terlihat bahwa material tersebut bersifat kaku atau material tersebut tahan terhadap deformasi elastis. Semakin besar modulusnya, semakin kaku bahan tersebut, atau regangan elastis yang terjadi lebih kecil saat diberikan suatu tegangan tertentu. Modulus elastisitas merupakan parameter penting dari suatu desain yang digunakan untuk menghitung defleksi elastis suatu material.

Ketika material mengalami tegangan tarik, maka material akan mengalami perpanjangan, namun akan mengecil penampang melintangnya. Perbandingan antara regangan tegak lurus dengan sumbu benda kerja dan regangan searah sumbu benda kerja disebut *Poisson's Ratio*.

Jika benda mengalami gaya geser, maka hubungan antara gaya geser dan regangan geser pada daerah elastis ditunjukkan pada Persamaan (2-7):

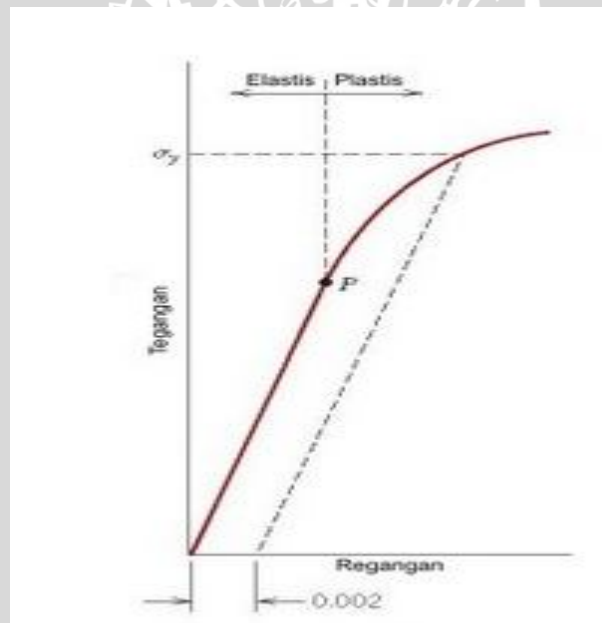
$$\tau = G\gamma \quad (2-7)$$

Dengan  $G$  adalah modulus geser,  $\gamma$  adalah regangan geser.

### 2.3.2. Deformasi Plastis

Deformasi pada daerah plastis bersifat *irreversible* tak murni, yang berarti ketika tegangan pada benda kerja dihilangkan, maka dimensi dari benda kerja tidak persis kembali ke kondisi semula. Ketika beban dihilangkan, regangan yang terjadi akan mengecil namun tidak kembali ke panjang awal material.

Untuk kebanyakan bahan logam, deformasi elastis pada saat regangan hanya terjadi sekitar 0,005. Saat material terdeformasi melewati titik ini, tegangan tidak lagi proporsional terhadap regangan (hukum *Hooke* tidak dapat digunakan lagi disini), dan terjadi perubahan permanen, atau deformasi plastis terjadi.



Gambar 2.6. Deformasi elastis dan plastis, batas proporsionalnya  $P$ , dan kekuatan luluh ditentukan menggunakan metode *offset* 0,002 regangan.

(sumber: <http://id.scribd.com/doc/109073963/20/B-Konsep-Tegangan-dan-Regangan>)

Gambar 2.6. menggambarkan skematis perilaku tarik tegangan - regangan untuk beberapa logam saat masuk ke wilayah plastis. Transisi dari elastis ke plastik terjadi secara bertahap bagi sebagian besar logam, beberapa terdapat hasil kurva yang melengkung pada awal terjadinya deformasi plastik, yang meningkat lebih cepat dengan

meningkatnya tegangan. Dari perspektif atom, deformasi plastik terjadi dengan memutuskan ikatan dengan atom tetangga aslinya dan kemudian membentuk ikatan baru dengan atom tetangga. Hal ini terjadi terus menerus pada saat tegangan diberikan karena sejumlah besar atom atau molekul bergerak relatif terhadap satu sama lain, dan pada saat tegangan dilepaskan mereka tidak kembali ke posisi semula.

#### 2.4. Kriteria Tegangan Geser

Teori tegangan geser maksimum, atau *Tresca* berisi bahwa luluh akan terjadi pada saat tegangan geser maksimum (terbesar) mencapai nilai kritisnya. Kriteria luluh *tresca* tidak semata-mata tergantung pada nilai tegangan normal, tetapi tergantung pada tegangan geser maksimum yang dihasilkan oleh suatu sistem tegangan tertentu. Berdasarkan teori ini, pada kondisi tegangan multi dimensional, material akan mengalami luluh ketika tegangan geser maksimal yang terjadi sama dengan atau melebihi tegangan luluh geser, maka dari itu sebuah material belum mengalami deformasi plastis selama tegangan geser maksimum berada di bawah tegangan luluh geser yang di dapat pada uji *tensile*.

$\tau_{\max} = k$  dengan  $k$  adalah tegangan luluh geser.

$$\text{Dengan } \tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

Tegangan luluh geser dapat dicari pada uji tarik sebagai berikut:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{2}$$

dari persamaan tersebut didapat tegangan luluh geser yang terjadi adalah  $k = \frac{Y}{2}$

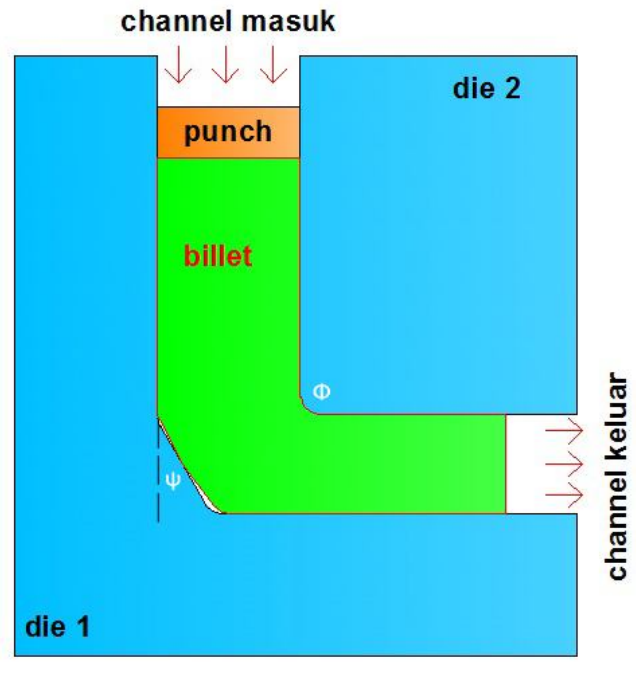
sehingga dapat disimpulkan bahwa pada kasus beban multiaksial, luluh akan terjadi jika:

$$\tau_{\max} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = Y$$

#### 2.5. Prinsip Kerja ECAP

Pada dasarnya sebuah mekanisme cetak tekan terdiri dari material uji, *punch* yang berfungsi untuk menekan spesimen melalui alur cetakan, pelumas dan cetakan dengan dua buah alur yang berpenampang sama yang saling berpotongan.





Gambar 2.7. Proses ECAP

Pada Gambar 2.7  $\Phi$  adalah sudut *intersection*, sedangkan  $\psi$  adalah sudut *fillet*. Benda kerja yang sudah dilubrikasi dengan ukuran penampang yang hampir sama dengan saluran tersebut, dimasukkan ke dalam saluran bagian atas, kemudian ditekan dengan tekanan sebesar *plunger/punch* sampai benda kerja berada di saluran berikutnya.

Setelah proses penekanan, *punch* kemudian kembali mundur kemudian benda ditarik dari saluran kedua. Karena ukuran penampang material tidak berubah, maka proses ini dapat diulang - ulang untuk mendapat regangan besar sehingga mendapat perbaikan butir sampai ukuran *submikrometer*.

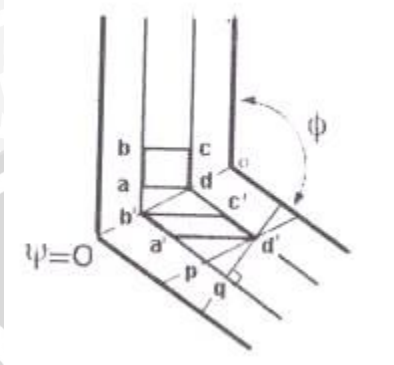
Gaya geser dikenakan pada benda kerja ketika melewati belokan. Akibat dari gaya geser tersebut, material akan mengalami deformasi. Gaya geser tersebut harus melebihi tegangan luluh dari material agar terjadi suatu deformasi plastis. Deformasi plastis menyebabkan terjadinya slip pada butiran sehingga butiran akan terbagi-bagi menjadi ukuran yang lebih kecil.

## 2.6. Karakter Deformasi Pada Proses ECAP

Karakter deformasi dalam material dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti rute deformasi, besarnya sudut *fillet* pada sudut luar daerah perpotongan saluran, gaya gesek, dan lain - lain.

### 2.6.1 Pengaruh Sudut *Intersection*

Sudut *intersection* berpengaruh besar terhadap tingkat regangan geser yang dikenakan pada material. Secara teoritis, hubungan antara sudut belok *die* dengan regangan geser yang terjadi dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 2.8. Prinsip kerja ECAP tanpa sudut *fillet* (sumber: Pei Ling, 2001)

Diasumsikan dua saluran tersebut berpotongan dengan sudut miring sebesar  $\Phi$ , sebuah elemen kecil dari benda kerja diperlihatkan dalam Gambar 2.8 dengan dimensi  $abcd$ , setelah melewati perpotongan (*intersection*), akan terdeformasi menjadi dimensi  $a'b'c'd'$ . Dengan notasi yang ada pada Gambar 2.8, maka regangan geser  $\gamma$  (Wen-Hsien Huang, 1999) didapat dari:

$$\gamma = a'q / qd'$$

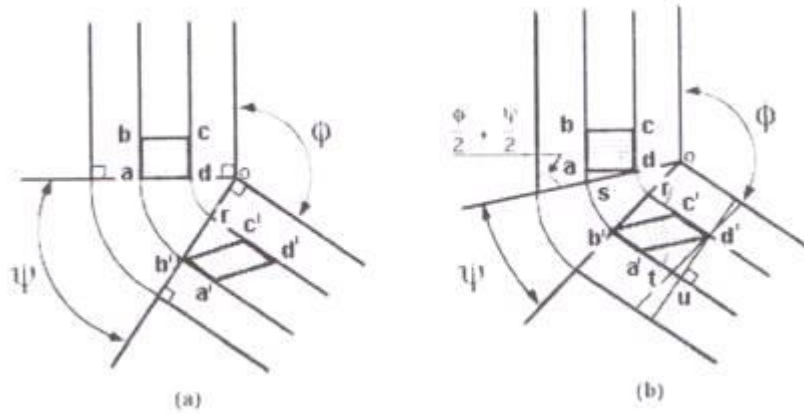
Dengan  $qd' = ad$  dan  $ab' = dc' = a'p = pq = ad \cot(\Phi/2)$ , karena  $a'q = a'p + pq$  sehingga  $a'q = 2ad \cot(\Phi/2)$ , maka setiap *pressing* didapatkan regangan geser sebesar:

$$\gamma = 2 \cot(\Phi/2) \quad (2-8)$$

Menurut Persamaan 2-8 tersebut (Iwahashi *et. al.*, 1996), semakin kecil sudut  $\Phi$ , maka akan semakin besar regangan geser yang terjadi.

### 2.6.2 Pengaruh Sudut *Fillet* ( $\psi$ )

Secara teoritis, pengaruh sudut *fillet* pada sudut luar daerah *intersection* terhadap keseragaman regangan yang terjadi dapat dijabarkan sebagai berikut:



Gambar 2.9. Prinsip kerja ECAP menggunakan *fillet* pada sudut luar belokan. (a) sudut *fillet* =  $\pi - \Phi$ , (b) sudut *fillet* berada diantara  $\psi = 0$  dan  $\psi = \pi - \Phi$

Pada Gambar 2.9(a) dimana  $\psi = \pi - \Phi$ , regangan geser didapat dari

$$\gamma = rc' / rb'$$

Dengan  $rb' = da = (oa - od)$  dan  $ab' = dc' = oa\psi = (rc' + od)\psi$ , sehingga  $rc' = (oa - od)\psi$ . Maka untuk kondisi tersebut, (Wen-Hsien Huang, 1999)

$$\gamma = \psi$$

Pada Gambar 2.9(b) dengan  $\psi$  berada dalam kondisi tengah (jari-jari *fillet* tidak tegak lurus dengan dinding *die*), regangan gesernya adalah

$$\gamma = a'u / d'u$$

Dengan

$$a'u = (a't + tu) = (rc' + as)$$

, dan

$$as = ad \cot(\Phi/2 + \psi/2)$$

$$ab' = dc' = (as + \cos\psi) = rc' + od\psi$$

$$(os - od) = ad \cdot \text{Csc}(\Phi/2 + \psi/2)$$

, sehingga

$$a'u = 2ad \cot(\Phi/2 + \psi/2) + ad\psi \text{csc}(\Phi/2 + \psi/2)$$

Didapatkan regangan geser untuk kondisi tengah sebagai berikut:

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \text{csc}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \quad (2-9)$$

Berdasarkan dari Persamaan (2-9), dengan penambahan sudut *fillet* justru akan mengurangi regangan yang terjadi. Dengan menggunakan *fillet* pada sudut luar *die*, maka distribusi regangan yang terjadi pada material tidak *uniform* (Wu, 1997). Pada bagian bawah *billet*, setelah melewati *intersection*, deformasi yang terjadi berbeda pada

bagian atas, sehingga distribusi regangan plastis berbeda jika dibandingkan secara vertikal pada *billet* setelah melewati daerah deformasi.

### 2.6.3 Pengaruh Gaya Gesek

Pengaruh gaya gesek pada proses *ECAP* disimpulkan oleh Li *et. at.*, menggunakan pendekatan *Finite Element Analysis*. Dengan bertambahnya gaya gesek maka celah antar material dengan sudut luar pada belokan *die* akan berkurang (Li *et. at.*, 2004). Celah ini terisi oleh material yang disebabkan oleh gaya gesek dengan *die* maka bagian sekitar permukaan luar akan tetap mengalami gaya geser, namun material akan semakin tidak homogen. Deformasi plastis akan semakin meningkat pada daerah tertentu (lokal) seiring meningkatnya gesekan, yaitu pada daerah atas dan bawah, bukan bagian tengah.

### 2.7 Gaya Tekan *Punch*

Sudut *intersection* dan gaya gesek berpengaruh terhadap gaya yang dibutuhkan *punch* untuk menekan *billet* sampai pada saluran kedua. Menurut analisis dari Segal dan Lee (dalam Li *et. at.*, 2004). Tekanan ( $P$ ) yang dibutuhkan untuk menekan *billet* dapat diperoleh dari Persamaan (2-10):

$$P = 2k \cot\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2-10)$$

Dengan  $k$  adalah tegangan luluh geser material. Tekanan adalah gaya geser per satuan luas, yang dirumuskan dengan  $P = F/A$ , maka untuk mencari gaya *punch* didapat melalui Persamaan (2-11):

$$F = A \cdot 2 \cdot k \cot\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2-11)$$

### 2.8 Konsep Dasar Elemen Hingga

Apabila suatu benda / material dikenai gaya seperti beban, tekanan, temperatur, dan kecepatan fluida dan panas maka akan timbul akibat-akibat seperti perubahan bentuk (deformasi) tegangan, temperatur, tekanan, dan kecepatan fluida. Sifat distribusi dari akibat-akibat yang ditimbulkan (deformasi) dalam suatu benda tergantung pada karakteristik sistem gaya dan beban itu sendiri. Dalam metode elemen hingga akan dapat temukan distribusi dari akibat-akibat ini, yang dinyatakan dengan perpindahan/*displacement*.

Menurut Wirjosoedirdjo (1988), metode elemen hingga dapat digunakan dengan melakukan langkah- langkah sebagai berikut:

1. Diskritisasi dan memilih konfigurasi elemen. Langkah ini menyangkut pembagian benda menjadi sejumlah benda kecil yang sesuai yang disebut elemen-elemen hingga. Perpotongan antara sisi - sisi elemen dinamakan simpul atau titik simpul, dan antara elemen - elemen disebut garis simpul. Jumlah elemen yang digunakan akan semakin baik bila mendekati medium kontinum dan jenis elemen yang digunakan tergantung pada karakteristik rangkaian kesatuan dan idealisasi yang dipilih untuk digunakan seperti jenis elemen garis, elemen bidang, dan elemen ruang.
2. Memilih model atau fungsi pendekatan. Dalam langkah ini dipilih suatu pola atau bentuk untuk distribusi besaran yang tidak diketahui yang dapat berupa suatu perpindahan dan/ atau tegangan untuk persoalan - persoalan tegangan - deformasi. Titik - titik simpul elemen memberikan titik strategis untuk penulisan fungsi - fungsi matematis yang menggambarkan bentuk distribusi dari besaran yang tidak diketahui pada wilayah elemen. Fungsi matematis yang biasa digunakan biasanya adalah polinomial. Jika  $u$  dinyatakan sebagai besaran tak diketahui, maka fungsi interpolasi polinomial dapat dinyatakan sebagai :  $U = N_1u_1 + N_2u_2 + N_3u_3 + \dots + N_mu_m$ . Dengan  $u_1, u_2, u_3, \dots, u_m$  adalah nilai dari besaran-besaran yang tidak diketahui pada titik-titik simpul dan  $N_1, N_2, \dots, N_m$  adalah fungsi - fungsi interpolasi.
3. Menentukan hubungan regangan - perpindahan dan tegangan - regangan. Hukum tegangan regangan digunakan dalam analisis ini. Sebagai contoh adalah tegangan terhadap regangan dalam suatu benda pejal :  $\sigma = E\varepsilon$ ; dengan  $\sigma$  = tegangan,  $E$  = modulus elastisitas,  $\varepsilon$  = regangan/ deformasi
4. Menurunkan persamaan - persamaan elemen. Penurunan persamaan elemen dapat menggunakan metode energi dan metode residu berbobot. Penggunaan salah satu dari metode tersebut menghasilkan persamaan yang menggambarkan perilaku suatu elemen, yang dinyatakan sebagai :  $[k]\{q\} = \{Q\}$  ; dengan  $[k]$  = matrik sifat elemen/ kekakuan,  $\{q\}$  = vektor besaran yang tidak diketahui disimpul-simpul elemen/ perpindahan simpul, dan  $\{Q\}$  = vektor parameter pemaksa simpul elemen/ gaya simpul.
5. Perakitan persamaan elemen untuk mendapatkan persamaan global atau persamaan rakitan dan mengenal syarat batas. Proses perakitan didasarkan pada hukum kekontinuan. Persamaan elemen yang diperoleh dijumlahkan untuk memperoleh persamaan global.
6. Memecahkan besaran-besaran primer yang tak diketahui.
7. Memecahkan besaran-besaran penurunan atau sekunder.
8. Interpretasi hasil - hasil.

## 2.9 Software ABAQUS

ABAQUS merupakan suatu *software* berbasis *finite element* dengan penyelesaian numerik yang dapat digunakan pada berbagai persoalan *engineering*. Beberapa persoalan yang mampu diselesaikan meliputi:

1. Analisis struktur statis / dinamis baik linier atau bukan.
2. Fenomena elektromagnetik
3. Perpindahan panas dan mekanika fluida

Secara umum solusi metode elemen hingga dapat dibagi menjadi 3 bagian utama, yaitu:

### 1. Preprocessing

Adalah tahap pembuatan model fisik dari masalah yang akan diselesaikan dan membuat *input file* yang akan digunakan dalam simulasi nantinya. Dalam tahap ini ditentukan beberapa hal seperti:

- Menentukan tipe elemen dan material yang digunakan beserta *properties*-nya
- Menentukan *keypoint*, *lines*, *area* atau *volume*
- Menentukan beban yang bekerja pada material
- Menentukan kondisi batas (*boundary condition*)
- Melakukan *meshing* pada *lines*, *area* atau *volume* sesuai kebutuhan
- Menentukan jenis analisis yang digunakan
- Pembuatan *input file*

Pada tahap ini tingkat ketelitiannya disesuaikan dengan analisis dimensi yang digunakan. Semisal 1 dimensi, 2 dimensi, *axi-symmetric*, atau 3 dimensi.

### 2. Simulation

Tahap dilakukannya perhitungan masalah numeris yang sudah didefinisikan dalam tahap *preprocessing*. Hasil perhitungan akan disimpan di dalam file biner yang siap diolah dalam tahap *postprocessing*.

### 3. Postprocessing

Tahap akhir dimana hasil *solving* (*running program*) bisa dilihat. Pada tahap ini ada beberapa hal yang dapat kita amati, yaitu:

- Daftar dari perpindahan nodal
- Elemen gaya dan momen
- *Deflection plots*
- *Stress contour diagram*

### 2.10. Hipotesa

Semakin banyak *stage* yang dilalui oleh *billet* maka semakin besar pula nilai tegangan geser maksimal yang didapat dikarenakan adanya tegangan sisa pada *billet* setelah melewati satu *stage* dan distribusi tegangan geser pada *billet* semakin merata.

