

**PENGARUH VARIASI SUDUT *CHAMFER* DAN SUDUT  
*INTERSECTION* PADA PROSES *ECAP* TERHADAP  
DISTRIBUSI TEGANGAN GESER**

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**Disusun oleh :**

**DIAN KURNIA ARISMAWAN  
NIM. 0110620045**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN MESIN  
MALANG  
2007**

**PENGARUH VARIASI SUDUT *CHAMFER* DAN SUDUT  
*INTERSECTION* PADA PROSES *ECAP* TERHADAP  
DISTRIBUSI TEGANGAN GESER**

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK KONSTRUKSI**

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**Disusun oleh :**

**DIAN KURNIA ARISMAWAN  
NIM. 0110620045**

**Telah diperiksa dan disetujui oleh :**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Anindito Purnowidodo, ST., M. Eng., Dr. Eng**

**NIP. 132 206 466**

**M. Agus Choiron, ST., MT.**

**NIP. 132 259 661**



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis sadar bahwa banyak pihak yang telah membantu didalam pengerjaan karya tulis ilmiah ini. Untuk itu ucapan terima kasih yang tulus penulis haturkan kepada :

- Bapak Anindito Purnowidodo, ST., M. Eng., Dr. Eng., selaku dosen pembimbing I yang banyak memberikan bimbingan dan masukan pada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
- Bapak Moch. Agus Choiron, ST., MT, selaku dosen pembimbing II yang juga telah banyak memberikan sumbangan pemikiran, bimbingan dan masukan pada penulis.
- Orang tua dan keluarga di Ponorogo yang telah memberikan segalanya yang terbaik untuk penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
- Semua pihak yang secara langsung atau tidak langsung khususnya Arek LabKomp dan Etty Riana Y. yang telah membantu demi kelancaran pengerjaan skripsi ini.

Penyusun menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, karena itu kritik dan saran sangat kami harapkan untuk kesempurnaan skripsi ini.

Malang, 16 Mei 2007

Penyusun

DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	4
2.1 Konsep Tegangan dan Regangan.....	4
2.2 Hubungan Tegangan dan Regangan .....	5
2.2.1 Deformasi Elastis .....	6
2.2.2 Deformasi Plastis .....	6
2.3 Kriteria Luluh Tresca atau Tegangan Geser Maksimum.....	7
2.4 Prinsip Kerja <i>ECAP</i> .....	7
2.5 Evolusi Mikrostruktur pada <i>ECAP</i> .....	8
2.6 Karakter Deformasi pada Proses <i>ECAP</i> .....	10
2.6.1 Pengaruh Sudut <i>Intersection</i> .....	10
2.6.2 Pengaruh Sudut <i>Fillet</i> .....	12
2.6.3 Pengaruh Gaya Gesek.....	14
2.7 Gaya Tekan <i>Plunger</i> .....	14
2.8 Konsep Dasar Elemen Hingga .....	14
2.9 Persoalan <i>non-linear</i> .....	15
2.10 Software ABAQUS .....	17

<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	19
3.1 Metode Penelitian .....	19
3.2 Diagram Alir Penelitian .....	19
3.3 Spesifikasi Material .....	20
3.4 Geometri <i>Billet</i> dan <i>Die</i> .....	21
3.5 Pemodelan Menggunaakn ABAQUS .....	23
3.5.1 Pemodelan Geometri .....	23
3.5.2 Pemodelan Pembebanan .....	24
3.6 Rancangan Percobaan .....	24
3.7 Variabel Penelitian .....	25
3.8 Validasi Simulasi .....	25
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	27
4.1 Hasil .....	27
4.1.1 Distribusi Tegangan pada Bidang Geser Daerah <i>Intersection</i> ..	27
4.1.1.1 Perbandingan Distribusi Tegangan Sepanjang Jalur Potong pada Variasi Sudut <i>Intersection</i> Tanpa Sudut <i>Chamfer</i> .....	29
4.1.1.2 Perbandingan Distribusi Tegangan Sepanjang Jalur Potong pada Variasi Sudut <i>Chamfer</i> Untuk Sudut <i>Intersection</i> 90° .....	30
4.1.1.3 Perbandingan Distribusi Tegangan Sepanjang Jalur Potong pada Variasi Sudut <i>Chamfer</i> Untuk Sudut <i>Intersection</i> 105° .....	31
4.1.1.4 Perbandingan Distribusi Tegangan Sepanjang Jalur Potong pada Variasi Sudut <i>Chamfer</i> Untuk Sudut <i>Intersection</i> 120° .....	32
4.1.1.5 Perbandingan Distribusi Tegangan Sepanjang Jalur Potong pada Variasi Sudut <i>Chamfer</i> Untuk Sudut <i>Intersection</i> 135° .....	33
4.1.2 Gaya Tekan <i>Punch</i> .....	34
4.2 Pembahasan .....	37
4.2.1 Distribusi Tegangan pada <i>Die</i> tanpa sudut <i>Chamfer</i> .....	38
4.2.2 Distribusi Tegangan pada <i>Die</i> dengan sudut <i>Chamfer</i> .....	42

4.2.3 Gaya Tekan *Punch* ..... 45

**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN** ..... 47

5.1 Kesimpulan ..... 47

5.2 Saran ..... 47

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**



## RINGKASAN

DIAN KURNIA ARISMAWAN, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2007, *Pengaruh Variasi Sudut Chamfer dan Sudut Intersection pada Proses ECAP terhadap Distribusi Tegangan Geser*, Dosen Pembimbing : Anindito Purnowidodo, SP., M. Eng., Dr. Eng. Dan M. Agus Choiron, ST., MT.

Salah satu cara baru untuk membentuk material *UFG* (Ultra-fine Grained) adalah dengan *ECAP* (*Equal Channel Angular Pressing*). Dengan cara tersebut, ukuran butir material dapat diperkecil sampai pada ukuran *submicrometer* dengan cara memanfaatkan tegangan geser yang dikondisikan pada material. Prinsip dari metode ini, benda kerja ditekan ke dalam *die* yang terdiri dari dua jalur (*channel*) dengan penampang sama yang berpotongan membentuk sudut. Perpotongan (*intersection*) kedua saluran tersebut membentuk bidang geser yang menyebabkan terjadinya gaya geser pada material. Distribusi tegangan geser sepanjang bidang geser tersebut menentukan dalam efektifitas proses *ECAP* karena dengan semakin meratanya distribusi tegangan geser pembentukan *UFG* dapat merata pada material. Dari hal tersebut perlu diteliti bagaimana distribusi tegangan geser pada variasi sudut *intersection* dan sudut *chamfer* pada *die ECAP*.

Metode penelitian yang digunakan adalah *experimental* semu dengan simulasi metode elemen hingga dengan bantuan komputer. Variasi sudut *intersection* yang digunakan adalah  $90^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $135^\circ$ . Untuk sudut *intersection*  $90^\circ$  dibuat variasi sudut *chamfer* yaitu  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ . Untuk sudut *intersection*  $105^\circ$  dibuat variasi sudut *chamfer* yaitu  $0^\circ, 19^\circ, 56^\circ, 37.5^\circ$ . Untuk sudut *intersection*  $120^\circ$  dibuat variasi sudut *chamfer* yaitu  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ . Untuk sudut *intersection*  $135^\circ$  dibuat variasi sudut *chamfer* yaitu  $0^\circ$ ,  $11^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $34^\circ$ . Masing-masing hasil simulasi dibandingkan untuk dilihat kecenderungan distribusi tegangan yang terjadi pada bidang geser.

Dari hasil simulasi didapatkan distribusi tegangan geser paling merata berada pada kasus sudut *intersection*  $90^\circ$ , tanpa sudut *chamfer*. Sedangkan konfigurasi bentuk *die* dimana dapat mengurangi gaya tekan *plunger* tanpa mengurangi secara signifikan efektifitas *die* dalam memberikan tegangan geser adalah *die* bersudut *intersection*  $90^\circ$  dengan sudut *chamfer*  $30^\circ$ .

Kata kunci: *ECAP*, distribusi tegangan geser, sudut *chamfer*, sudut *intersection*

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Banyak metode yang dilakukan untuk membentuk material *UFG* (*Ultra-fine Grained*), yaitu material dengan ukuran butiran antara 10 nm sampai 1000 nm (Olejnik L. *et. al.*, 2005). Metode-metode tersebut secara umum memperbaiki kualitas mikrostruktur material dengan jalan memperkecil ukuran butir. Sudah dibuktikan bahwa ukuran butir yang kecil dan keberadaan susunan *HAB* (*High Angle Boundary*) dapat memperbaiki sifat mekanis material (Meyers, 2005).

Salah satu cara baru untuk membentuk material *UFG* adalah dengan *ECAP* (*Equal Channel Angular Pressing*). Dengan cara tersebut, ukuran butir material dapat diperkecil sampai pada ukuran *submicrometer* dengan cara memanfaatkan tegangan geser yang dikondisikan pada material. Prinsip dari metode ini, benda kerja ditekan ke dalam *die* yang terdiri dari dua jalur (*channel*) dengan penampang sama yang berpotongan membentuk sudut. Perpotongan (*intersection*) kedua saluran tersebut membentuk bidang geser yang menyebabkan terjadinya gaya geser pada material. Proses *ECAP* dapat membentuk material *UFG* tanpa mengubah bentuk penampang dari material.

Proses penekanan melewati *die* dapat dilakukan berulang-ulang untuk membentuk susunan *HAB* (Iwahashi *et. al.*, 1997). Apabila pada proses penekanan berikutnya material diputar terlebih dahulu menurut sumbunya, maka akan didapatkan rute deformasi yang berbeda-beda (Segal, 1995). Rute deformasi tersebut nantinya akan berpengaruh terhadap efisiensi pembentukan *HAB* dan butir berukuran *submicron*. Rute deformasi paling efisien dalam pembentukan *HAB* dan butir *submicron* adalah rute A, yaitu dengan melakukan penekanan berulang tanpa memutar material terlebih dahulu (Prangnell *et. al.*, 2001).

Sudut *intersection* pada *ECAP* berpengaruh terhadap pembentukan *UFG*. Semakin kecil sudut *intersection* maka pembentukan *UFG* akan semakin efektif. Keberadaan sudut *fillet* ( $\psi$ ) (Gambar 2.4) pada sudut luar belokan menyebabkan deformasi pada material tidak homogen setelah melewati belokan (*intersection*) (Li *et. al.*, 2004). Selain itu keberadaan sudut *fillet* juga menyebabkan material mengalami bending daripada geser (segal *et. al.*, 1981 dalam Pei-Ling, 2001). Meskipun begitu

dengan adanya sudut *fillet* akan dapat mengurangi gaya awal yang dibutuhkan untuk menekan *billet*.

Dari hal tersebut, untuk menambah efektifitas dan efisiensi pada proses *ECAP* diperlukan sebuah *die* yang dapat melakukan deformasi plastis yang tinggi pada material dengan sekali penekan sekaligus mengurangi gaya awal yang dibutuhkan untuk menekan *billet*. Dengan membuat *chamfer* pada sudut luar daerah *intersection*, diharapkan dapat memenuhi kriteria di atas. Tegangan geser memegang peranan penting dalam proses *ECAP*, maka dari itu distribusi tegangan geser pada material ketika melewati *intersection channel* pada masing-masing konfigurasi *die* penting untuk diteliti sehingga nantinya dapat diketahui bentuk *die* yang dapat memberikan distribusi tegangan geser yang merata pada material.

Dalam studi ini akan dievaluasi distribusi tegangan geser antara sudut  $90^\circ$  sampai  $135^\circ$ , masing-masing dengan sudut *chamfer* yang bervariasi menggunakan simulasi metode elemen hingga menggunakan bantuan komputer. Dari penelitian ini diharapkan dapat diketahui kondisi optimal mengenai desain *die* yang memanfaatkan *chamfer* pada sudut *intersection* tersebut.

### 1.2 Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka permasalahan yang akan diteliti adalah besar dan distribusi tegangan geser pada daerah belokan yang terjadi akibat variasi sudut *chamfer* dan sudut *intersection*.

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang dipakai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Material yang digunakan adalah *Aluminum 1060-O* dengan penampang melintang berbentuk bujur sangkar.
2. Perubahan temperatur material akibat deformasi diabaikan.
3. material dianggap *isotropis* dan *continum*.
4. Sistem dianggap *quasi static*.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui distribusi tegangan geser pada daerah geseran pada masing-masing variasi sudut *chamfer* dan *intersection*. Hal ini sangat penting karena baik tidaknya material hasil dari proses *ECAP* salah satunya dipengaruhi oleh distribusi tegangan yang merata yang dikenakan pada material.

### 1.5 Manfaat penelitian

Penelitian ini menghasilkan data yaitu berupa grafik distribusi tegangan geser pada berbagai variasi sudut *intersection* dan sudut *chamfer* dan besar gaya tekan *punch* di dalam proses *ECAP*. Data tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk mendesain cetakan pada proses ini. Untuk industri, penelitian ini dapat dipakai sebagai dasar untuk membuat dan mengembangkan proses peningkatan kekuatan suatu material logam.

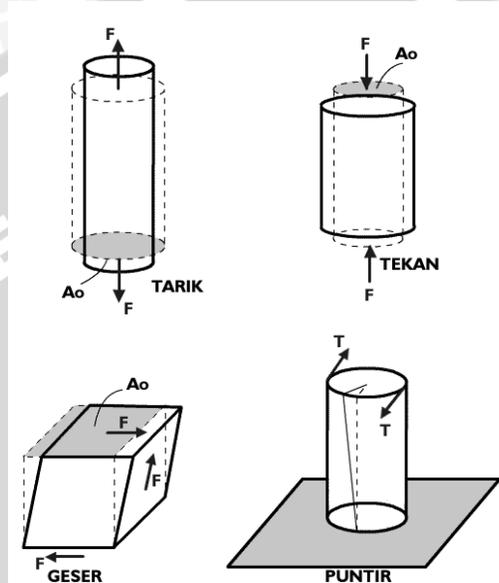
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



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

**2.1. Konsep Tegangan dan Regangan**

Tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) berhubungan dengan jenis pembebanan yang dilakukan pada material. Terdapat empat jenis pembebanan dasar pada material, yaitu tarik (*tensile*), tekan (*compressive*), geser (*shear*), dan puntir (*Torsion*).



Gambar 2.1. Jenis pembebanan dasar pada material  
(sumber: [Http://www.people.virginia.edu/~lz2n/mse209/Chapter6.pdf](http://www.people.virginia.edu/~lz2n/mse209/Chapter6.pdf))

Pada jenis pembebanan tarik dan tekan, tegangan rata-rata yang terjadi dapat dirumuskan sebagai berikut (Sriati Djaprie, 1993):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \tag{2-1}$$

Dengan  $F$  adalah gaya yang dikenakan tegak lurus pada penampang melintang benda kerja, dan  $A_0$  adalah luasan penampang melintang benda kerja (tegak lurus dengan gaya) sebelum benda kerja dikenai gaya yang pada Gambar 2.1 ditunjukkan dengan daerah yang diarsir.

Regangan rata-rata yang terjadi pada material dengan beban tarik dan puntir adalah (Sriati Djaprie, 1993):

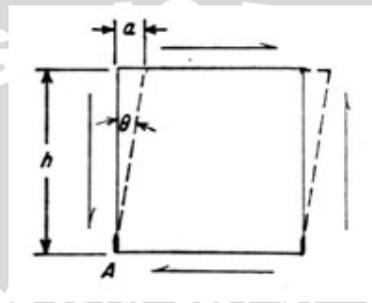
$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \text{ (x 100\%)} \tag{2-2}$$

Dengan  $l$  adalah panjang material setelah dikenai beban dan  $l_0$  adalah panjang mula-mula material ketika tidak dikenai beban. Pada beban tarik, tegangan dan regangan

bernilai positif, sedangkan pada pembebanan tekan nilai tegangan dan regangan adalah negatif.

Tegangan pada pembebanan geser mempunyai persamaan yang sama dengan pada beban tarik atau tekan, namun  $F$  disini adalah gaya yang sejajar dengan sisi atas dan bawah. Sedangkan regangannya adalah sama dengan perpindahan (*displacement*)  $a$  dibagi dengan jarak antara bidang  $h$  (Sriati Djaprie, 1993). Untuk memperjelas notasi-notasi yang dipakai dalam rumus tersebut, dapat dilihat di Gambar 2.2:

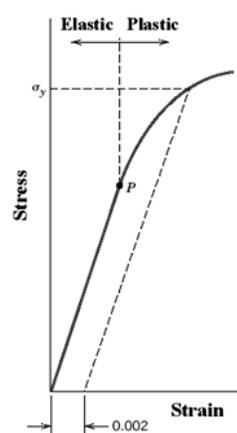
$$\gamma = \frac{a}{h} = \tan \theta \quad (2-3)$$



Gambar 2.2. Regangan Geser  
(sumber: Sriati Djaprie, 1993)

## 2.2. Hubungan Tegangan dan Regangan

Apabila diberi beban tarik, masing-masing material akan menunjukkan hubungan tegangan dan regangan yang berbeda-beda. Hubungan ini direpresentasikan menjadi grafik tegangan regangan. Dari grafik tegangan-regangan sebuah material dapat diketahui beberapa sifat mekanik dari logam seperti plastisitas, elastisitas, tegangan luluh, dan lain-lain.



Gambar 2.3. Grafik hubungan tegangan-regangan  
(sumber: [Http://www.people.virginia.edu/~lz2n/mse209/Chapter6.pdf](http://www.people.virginia.edu/~lz2n/mse209/Chapter6.pdf))

Grafik tegangan regangan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3 mempunyai daerah plastis dan elastis yang mana pada gambar tersebut ditunjukkan oleh arah panah. Titik P dalam gambar tersebut adalah batas antara daerah elastis dengan daerah plastis yang disebut titik luluh atau titik *yield*.

### 2.2.1. Deformasi Elastis

Deformasi yang terjadi pada daerah elastis bersifat *reversible*. Maksudnya ketika tegangan dihilangkan, maka dimensi benda kerja akan kembali ke dimensi semula sebelum dikenai pembebanan. Pada deformasi elastis, adanya tegangan akan menggeser atom-atom ke tempat kedudukan yang baru dan atom-atom tersebut akan kembali ke tempat semula apabila tegangan tersebut ditiadakan. Jarak pergeserannya relatif kecil, yaitu kurang dari 0.5%.

Pada uji tarik peningkatan tegangan akan sebanding dengan peningkatan regangan ketika deformasi masih bersifat elastis. Hubungan ini disebut hukum *Hooke*, yang dirumuskan sebagai:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-5)$$

Dengan  $E$  adalah *Young Modulus* atau 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.

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 sebagai *Poisson's ratio*.

Jika benda mengalami gaya geser, maka hubungan antara gaya geser dan regangan geser pada daerah elastis adalah:

$$\tau = G\gamma \quad (2-6)$$

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

### 2.2.2. Deformasi Plastis

Deformasi pada daerah plastis bersifat *irreversible* tak murni, yang artinya ketika tegangan pada benda kerja dihilangkan, maka dimensi benda kerja tidak akan persis kembali ke keadaan semula. Ketika beban dihilangkan, regangan yang terjadi akan mengecil namun tidak kembali ke panjang awal material ketika belum dikenai beban. Atom-atom yang bergeser menempati kedudukan baru yang stabil dengan begitu, apabila beban dihilangkan maka atom-atom akan tetap berada pada kedudukan

yang stabil, disebabkan karena memang tempat tersebut adalah posisi atom pada sel satuannya. Adapun bentuk sel satuan yang telah mengalami *slip* adalah tetap, baik bentuk maupun ukuran kisinya. Dengan kata lain mekanisme *slip* tidak mengubah sel satuan. Pada daerah plastis hubungan antara tegangan dan regangan tidak proporsional.

Ketika benda kerja dikenakan beban tarik, terdapat batas antara daerah plastis dan daerah elastis. Batas ini disebut titik luluh yang pada Gambar 2.3 ditunjukkan oleh notasi  $P$ . ketika melewati luluh, material mulai mengalami deformasi plastis.

### 2.3. Kriteria Luluh Tresca atau Kriteria Tegangan Geser Maksimum

Kriteria luluh Tresca dapat digunakan untuk meramal kondisi dimana luluh plastik mulai terjadi. Kriteria luluh Tresca pada dasarnya merupakan hubungan empiris, namun kriteria luluh juga harus taat azas dengan sejumlah observasi eksperimental. Menurut teorema ini, pada kondisi tegangan multidimensional, material akan mengalami luluh ketika tegangan geser maksimal yang terjadi sama dengan atau melebihi tegangan luluh geser. Luluh pada logam ulet sering disebabkan karena terjadi *slip* pada bidang kristal sepanjang tegangan geser maksimum. Maka dari itu, sebuah titik pada material dianggap belum mengalami deformasi plastis selama tegangan geser maksimum berada di bawah tegangan luluh geser yang didapat 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:

Pada kasus beban uniaksial, maka  $\sigma_{\min} = 0$  sehingga :

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

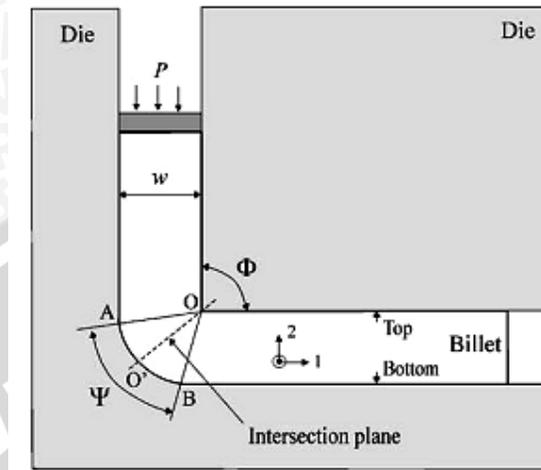
Dari persamaan tersebut didapat tegangan luluh geser yang terjadi adalah  $k = \frac{Y}{2}$  sehingga dapat disimpulkan bahwa pada kasus beban multiaksial, luluh akan terjadi bilamana:

$$\tau_{\max} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = Y \quad (2-7)$$

### 2.4. Prinsip Kerja ECAP

Secara umum prinsip kerja ECAP dapat dilihat pada Gambar 2.4. Pada gambar tersebut  $\Phi$  adalah sudut *intersection*, sedangkan  $\psi$  adalah sudut *fillet*. cetakkannya terdiri dari dua buah saluran dengan luas penampang yang sama yang berpotongan. Benda

kerja yang sudah dilubrikasi dengan ukuran penampang ( $w$ ) yang hampir sama dengan saluran tersebut, dimasukkan ke dalam saluran bagian atas, kemudian ditekan dengan tekanan sebesar  $P$  sampai benda kerja berada di saluran kedua.



Gambar 2.4. Proses *ECAP* secara umum  
(sumber: S. Li *et. al.*, 2004)

Setelah proses penekanan, *punch* kemudian kembali mundur kemudian benda kerja diambil dari saluran kedua. Karena ukuran penampang material tidak berubah, maka proses ini dapat diulang-ulang untuk mendapatkan regangan yang besar sehingga memungkinkan perbaikan butir sampai ukuran *submicrometer*.

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, sehingga material akan mengalami deformasi plastis. Deformasi plastis menyebabkan terjadinya slip pada butiran sehingga butiran akan terbagi-bagi menjadi ukuran yang lebih kecil.

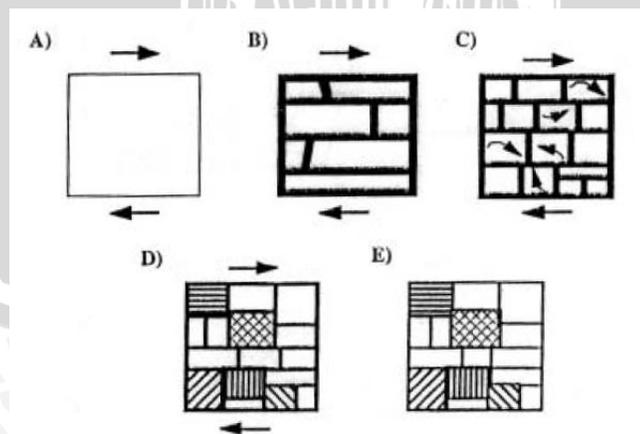
Proses penekanan *billet* dapat dilakukan berulang-ulang untuk mendapatkan regangan yang besar. Apabila setiap kali setelah penekanan benda kerja dirotasi dengan menggunakan sudut putar tertentu, maka akan didapatkan karakteristik deformasi yang berbeda-beda yang berpengaruh terhadap kecepatan pembentukan butir *submicrometer* (Iwahashi *et. al.*, 1997).

## 2.5 Evolusi Mikrostruktur Pada Proses *ECAP*

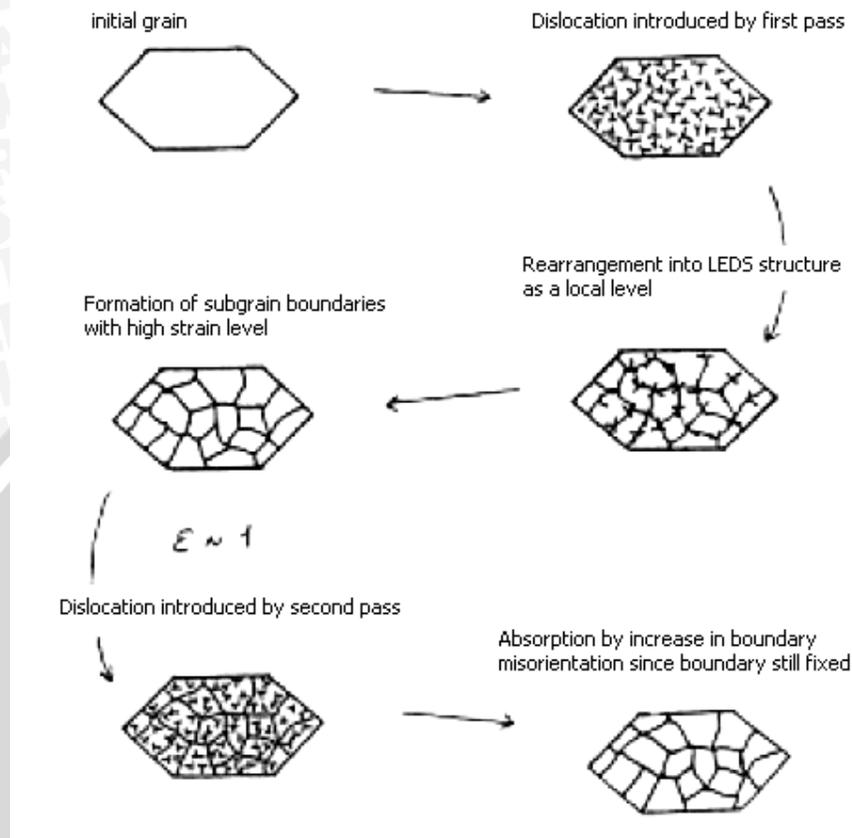
Proses evolusi mikrostruktur sebagai akibat dari regangan geser sangat kompleks. Menurut Hines *et. al.* (1998) dalam Pei Ling (2001) pada awal pembentukan, sub butir yang memanjang terbentuk pada arah *shearing*/gaya geser (Gambar 2.5). Selanjutnya butir tersebut mulai terbagi menjadi banyak sub butir akibat

dari banyaknya dislokasi yang terjadi (pada saat ini sudut orientasi yang terjadi antar sub butir masih kecil) (Gambar 2.5 B). Dengan semakin besarnya regangan yang terjadi, maka sub butir yang memanjang tersebut semakin terbagi-bagi menjadi sel-sel yang membulat akibat dari bertambahnya dislokasi yang membentuk batas butir baru (Gambar 2.5 C). Semakin bertambahnya regangan ukuran sub butir akan sampai pada batasnya dimana dislokasi yang terjadi hanya akan diserap oleh batas butir yang terbentuk sebelumnya. Deformasi yang terjadi kemudian hanya akan menyebabkan perubahan orientasi sub butir tersebut (Gambar 2.5 D). Akhirnya butir membulat dengan misorientasi yang tinggi terbentuk. Apabila dikenakan regangan lagi maka hanya akan memperjelas batas butirnya saja.

Berbon *et. al.* memberikan model evolusi mikrostruktur pada proses *ECAP* seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.6. Pada penekanan pertama, banyak terdapat dislokasi pada butir sebagai akibat dari regangan. Dislokasi yang terjadi tersebut kemudian menyusun kembali menjadi Struktur Dislokasi Berenergi rendah. Dislokasi yang dihasilkan dari penekanan berikutnya kemudian mengubah butir menjadi sub butir. Dengan semakin banyaknya penekanan berulang pada proses *ECAP*, dislokasi yang terjadi pada subgrain tersebut semakin banyak. Dislokasi yang terjadi ini kemudian membentuk batas butir baru dengan misorientasi tinggi sehingga menyebabkan terbentuknya *High Angle Boundary (HAB)* yaitu batas butir dimana misorientasi antara butir yang bersinggungan membentuk sudut yang lebih besar dari  $15^\circ$ . Namun model tersebut hanya merupakan gambaran kasar pada pembentukan butir halus dengan menggunakan regangan yang tinggi.



Gambar 2.5. Model evolusi mikrostruktur . (A) Butir dikenai gaya geser. (B) Subbutir yang memanjang terbentuk. (C) Pembentukan batas butir baru. (D) Perubahan orientasi butir. (sumber: Hine *et. al.* dalam Pei Ling, 2001)



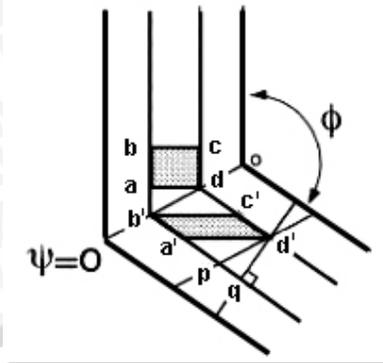
Gambar 2.6. Model evolusi mikrostruktur ketika deformasi pada proses ECAP (sumber: Berbon *et. al.*, 2000 dalam Pei Ling, 2001)

## 2.6 Karakter deformasi pada proses ECAP

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

### 2.6.1. Pengaruh sudut *intersection* ( $\phi$ )

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 dijabarkan sebagai berikut:



Gambar 2.7. Prinsip kerja ECAP tanpa sudut *fillet*  
(Sumber: Pei Ling, 2001)

Diasumsikan bahwa dua saluran tersebut berpotongan dengan sudut miring sebesar  $\phi$ , sebuah elemen kecil dari benda kerja diperlihatkan dalam Gambar 2.7 dengan dimensi  $abcd$ , setelah melewati perpotongan (*intersection*), akan terdeformasi menjadi dimensi  $a'b'c'd'$ . Dengan notasi yang terdapat dalam Gambar 2.7, 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:

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

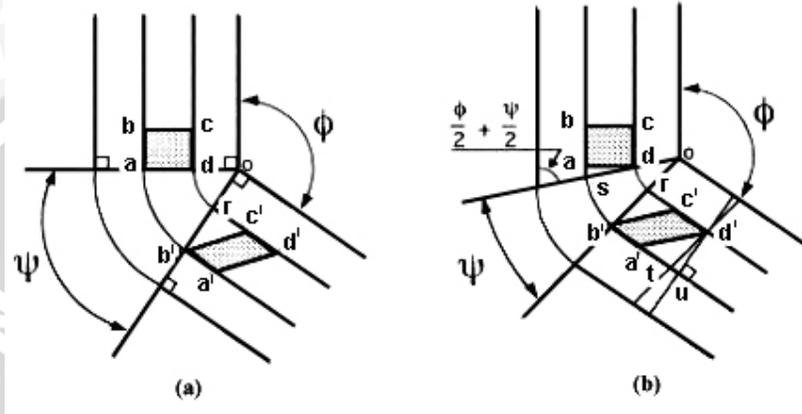
Menurut persamaan 2-8 tersebut (Iwahashi *et. al.*, 1996), semakin kecil sudut  $\phi$ , maka akan semakin besar regangan geser yang terjadi.

Pengaruh sudut *intersection* terhadap pembentukan material *UFG* (*Ultrafine Grained*) pada proses ECAP telah diteliti oleh Nakashima *et. al.* (dalam Pei-Ling, 2001) secara eksperimental. Mereka menggunakan Aluminium murni sebagai *billet*-nya, dan melakukan penekanan dengan rute *Bc* (material diputar  $90^\circ$  terlebih dahulu sebelum dimasukkan pada penekanan berikutnya) pada *die* dengan sudut *intersection*  $\phi = 90-157.5^\circ$ . Hasilnya adalah pemakaian sudut *intersection* yang besar dapat menghasilkan regangan geser yang besar jika dilakukan beberapa kali proses *pressing*, namun cara ini belum mampu untuk membentuk susunan *UFG*. Sebaliknya, Struktur *UFG* dengan *HAB* (*High Angle Boundary*) dapat dibentuk dengan memberikan gaya geser yang sangat besar terhadap *billet* setiap kali penekanan. Gaya geser yang sangat besar tersebut didapatkan pada sudut *intersection*  $90^\circ$ , namun semakin kecil sudut belok, maka akan semakin besar gaya yang diperlukan untuk menekan *billet* (dalam Pei-Ling, 2001).

Nakashima *et. al.* kemudian menyimpulkan bahwa sudut *die* paling baik untuk membentuk *UFG* adalah  $90^\circ$ .

**2.6.2. Pengaruh sudut fillet ( $\psi$ )**

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh besar kecilnya sudut *fillet* pada sudut luar daerah *intersection* terhadap keseragaman regangan yang terjadi. Secara teoritis, pengaruh dari sudut *fillet* dapat dijabarkan sebagai berikut:



Gambar 2.8. 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 2-8(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)

$$\gamma = \psi \tag{2-9}$$

Pada Gambar 2-8(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

$$\begin{aligned} as &= ad \cot(\phi/2 + \psi/2) \\ ab' = dc' &= (as + od\psi) = rc' + od\psi \\ (os - od) &= ad \cdot \csc(\phi/2 + \psi/2) \end{aligned}$$

, sehingga

$$a'u = 2ad \cot(\phi/2 + \psi/2) + ad\psi \csc(\phi/2 + \psi/2)$$

Didapatkan regangan geser untuk kondisi tengah sebagai berikut

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \csc\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \quad (2-10)$$

Berdasarkan pada persamaan di atas, dengan penambahan sudut *fillet* justru akan mengurangi besarnya regangan yang terjadi.

Segal menambahkan, ketika *billet* tidak secara sempurna mengisi *die*, atau jika sudut yang melingkar digunakan, maka *billet* cenderung mengalami bending daripada geser (segal *et. al.*, 1981 dalam Pei-Ling, 2001), yang menyebabkan bagian permukaan luar meregang karena tensile (gaya tarik) ketika melewati busur, dan kemudian akan kembali tertekan ketika menjauh dari daerah deformasi. Hal ini menyebabkan *die* dengan sudut *fillet* justru kurang efektif dalam pembentukan *UFG*.

Selain itu, dengan menggunakan *fillet* pada sudut luar *die*, maka distribusi regangan pada material juga tidak *uniform* (Wu, 1997). Pada bagian bawah *billet*, setelah melewati *intersection*, deformasi yang terjadi berbeda dengan bagian atas, sehingga distribusi regangan plastis berbeda jika dibandingkan secara vertikal pada *billet* setelah melewati daerah deformasi.

### 2.6.3 Pengaruh gaya gesek

Li *et. al.*, dengan menggunakan pendekatan *Finite Element Analysis*, menyimpulkan beberapa pengaruh gesekan pada proses *ECAP*. Dengan bertambahnya gaya gesek maka celah antara material dengan sudut luar pada belokan *die* akan berkurang (Li *et. al.*, 2004). Apabila celah ini terisi oleh material, yang disebabkan oleh gaya gesek dengan *die*, maka bagian sekitar permukaan bagian luar tetap akan mengalami gaya geser, namun material akan semakin tidak homogen. Sedangkan apabila gaya geseknya rendah, maka akan terdapat celah pada sudut luar *die*. Hal ini menyebabkan bagian permukaan tersebut lebih mengalami bending daripada geser yang lebih jauh lagi dapat menimbulkan retak pada permukaan tersebut (Pei-Ling, 2001). deformasi plastis akan meningkat pada daerah tertentu (lokal) seiring meningkatnya gesekan, yaitu pada daerah atas dan bawah, bukannya 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 yang dilakukan oleh Segal dan Lee (dalam *Li et. al.*, 2004), Tekanan ( $P$ ) yang dibutuhkan untuk menekan *billet* adalah sebagai berikut:

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

Dengan  $k$  adalah tegangan luluh geser dari material. Tekanan adalah gaya per satuan luas, dirumuskan dengan  $P = F/A$ , maka untuk mencari gaya *punch* didapatkan:

$$F = A \cdot 2k \cot\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2-12)$$

## 2.8 Konsep Dasar Elemen Hingga

Pendekatan dengan elemen hingga merupakan suatu analitis pendekatan yang berdasarkan asumsi peralihan atau asumsi tegangan, bahkan dapat juga merupakan kombinasi dari kedua hal tersebut. Dengan menggunakan metode elemen hingga, kita dapat mengubah suatu masalah yang memiliki jumlah derajat kebebasan tak berhingga menjadi suatu masalah dengan derajat kebebasan tertentu sehingga proses pemecahannya akan lebih sederhana. Tujuan utama analitis dengan metode elemen hingga adalah untuk memperoleh nilai pendekatan (bukan eksak) tegangan dan peralihan yang terjadi dalam suatu struktur. Pendekatan berdasarkan fungsi peralihan merupakan teknik yang sering kali dipakai. Berikut ini adalah langkah-langkah pendekatan berdasarkan asumsi tersebut (Weaver, 1993):

1. Membagi kontinum menjadi sejumlah elemen (subregion) yang berhingga dengan bentuk geometri yang sederhana (segitiga, segiempat, dsb.). Elemen-elemen kecil tersebut dinamakan *elemen hingga*, sedangkan proses pembagiannya disebut sebagai proses diskretisasi (pembagian).
2. Memilih titik-titik pada elemen yang diperlukan sebagai titik nodal dimana syarat keseimbangan dan kompatibilitas harus dipenuhi.
3. Membuat asumsi fungsi peralihan pada setiap elemen sedemikian rupa sehingga peralihan pada setiap titik sembarang dipengaruhi oleh peralihan titik nodalnya.
4. Pada setiap elemen khusus tadi harus dipenuhi persyaratan hubungan regangan peralihan dan hubungan tegangan-regangannya.
5. Menentukan kekakuan dan titik beban nodal ekuivalen untuk setiap elemen dengan menggunakan prinsip usaha atau prinsip energi.

6. Menurunkan persamaan keseimbangan untuk setiap titik nodal dari diskretisasi kontinum ini sesuai dengan kontribusi elemennya.
7. Menyelesaikan persamaan kesetimbangan untuk mencari peralihan titik nodal
8. Menghitung tegangan pada titik-titik tertentu dalam elemen tadi
9. Menentukan reaksi perletakan pada titik nodal yang tertahan bila diperlukan.

## 2.9 Persoalan *Non-Linear*

Salah satu pertimbangan dalam melakukan analisis pada kasus mekanika benda pejal menggunakan pendekatan *finite element method* adalah apakah struktur berada dalam keadaan linear ataukah nonlinear. Hal tersebut akan tergantung terhadap kondisi struktur dan property material yang dipakai. Pada kondisi linear, kompatibilitas dan hubungan kesetimbangan adalah linear serta perpindahan dan regangannya kecil. Pada kondisi tersebut terdapat hubungan yang proporsional antara beban dengan respon sistem. Apabila dalam analisis nantinya terdapat hal-hal yang membuat hubungan tersebut tidak berbanding lurus, maka perlu dipertimbangkan untuk memakai analisis *nonlinear*. Nonlinearitas dikarenakan banyak hal seperti keberadaan kondisi batas, sifat plastis dari material, dan perubahan bentuk geometri.

Deformasi yang terjadi pada proses *ECAP* sangat besar (*large deformation*). Beban yang diperlukan untuk menekan benda kerja sampai pada saluran dua tidak berbanding lurus dengan deformasi yang terjadi pada material. Hal tersebut dikarenakan banyak hal seperti keberadaan kondisi batas, material telah memasuki daerah plastis, dan geometri sudah berubah sehingga pada kasus *ECAP*, persoalan yang dihadapi adalah persoalan *nonlinear*.

Prinsip dasar persoalan *non-linear* adalah persamaan kesetimbangan harus ditulis dengan mengacu pada geometri yang sudah terdeformasi dan pada kondisi elastis plastis persamaan kesetimbangan harus ditulis dengan menggunakan sifat material yang tergantung pada tegangan sebelumnya, bukan oleh suatu konstanta.

Sistem *nonlinear* bisa diubah menjadi permasalahan *linear* dengan:

1. Sistem koordinat *Update Lagrangian* (koordinat material)
2. Metode Newton Raphson

### 1. Sistem koordinat *update* Langrangian

Pada sistem ini sumbu koordinat akan berubah mengikuti deformasi dari material.

Prinsip sistem ini adalah:

sebuah sistem koordinat lokal dikenakan pada tiap elemen, sistem lokal bergerak bersama dengan gerakan elemen.

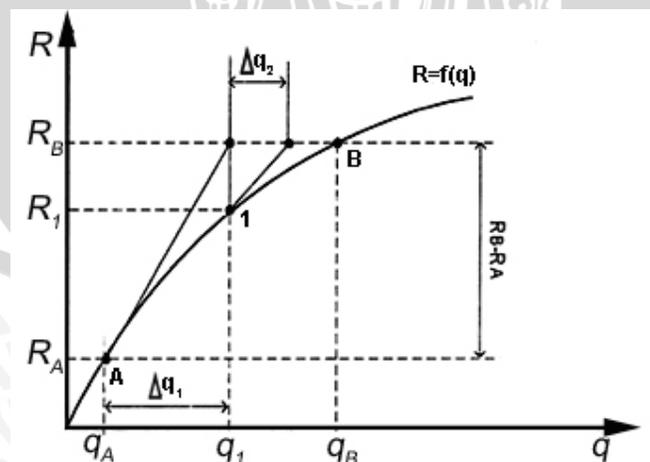
Diferensiasi dan integrasi dilakukan dengan mengacu pada koordinat lokal.

Keadaan deformasi sekarang digunakan sebagai acuan sebelum tahap solusi incremental berikutnya.

Koordinat lokal disesuaikan untuk menghasilkan keadaan acuan yang baru

### 2. Metode *Newton Raphson*

Metode umum yang dipakai adalah dengan mengubah matrik kekakuan selama solusi. Konsep metode yang paling sederhana dalam mengubah matrix kekakuan adalah metode *Newton-Raphson* yaitu dengan mengubah (*update*) matrik kekakuan pada tiap solusi iterasi. Sedangkan dengan metode *Modified Newton-Raphson*, dilakukan dengan mengasumsikan harga yang konstan dari matrik kekakuan untuk jumlah iterasi yang ditentukan. Matrik kekakuan hanya dapat berubah secara periodik, tidak pada setiap iterasi. Sebagai pertimbangan, metode *Newton-Raphson* dipakai bila matrik kekakuan selalu diupdate. Sedangkan pada *Modified Newton-Raphson* dilakukan hanyalah iterasi dan tidak diperlukan update matrik kekakuan, sehingga masing-masing memakai strategi yang berbeda dalam komputasinya.



Gambar 2.9. Metode *Newton-Raphson*

Prosedur dari metode tersebut dapat diterangkan sebagai berikut: Misalkan terdapat sebuah fungsi beban terhadap peralihan  $R = f(q)$  untuk sistem kebebasan derajat tunggal (Gambar 2.9). Bayangkan kita telah memperoleh perpindahan  $q_A$  yang berkenaan dengan  $R_A$ . Beban kemudian dinaikan menjadi  $R_B$  dan peralihan yang berkaitan  $q_B$  dicari. Dengan ekspansi deret Taylor  $R = f(q)$  pada titik  $q_A$  digeser hingga turunan pertama adalah :

$$f(q_A + \Delta q_1) = f(q_A) + (dR/dq)_A (\Delta q_1) \quad (2-13)$$

dengan  $f(q_A) = R_A$ ,  $[dR/dq]_A = K_A$  (kekakuan pada  $A$ ), dan  $f(q_A + \Delta q_1) = R_B$ , sehingga

$$K_A (\Delta q_1) = R_B - R_A \quad (2-14)$$

$R_B - R_A$  diinterpretasikan sebagai selisih antara beban yang dikenakan dengan gaya tahanan pada struktur. Langkah berikutnya :

1. Ubah peralihan  $q_1 = q_A + \Delta q_1$
2. Gunakan  $q_1$  untuk memperoleh kekakuan  $K_1$  dan tahanan  $R_1$
3. Hitung inkremen peralihan  $\Delta q_2$  berikutnya dari  $K_1 (\Delta q_2) = R_B - R_1$

Jadi  $R_B - R_1$  ialah kesetimbangan gaya saat itu. Akhirnya  $q_B = q_A + \Delta q_1 + \Delta q_2 + \dots$  untuk pendekatan yang cukup dekat. Dengan prosedur semacam ini maka pada kondisi elastis plastis matrik konstitutif bisa dievaluasi tiap-tiap iterasi berdasar tegangan sebelumnya.

## 2.10 Software ABAQUS

ABAQUS adalah *software* pemodelan metode elemen hingga dengan penyelesaian numerik yang digunakan pada berbagai kasus *engineering*. Kasus-kasus yang mampu diselesaikan meliputi :

1. Analisis struktur statis/dinamis baik linier maupun bukan.
2. Perpindahan panas dan mekanika fluida.
3. Fenomena elektro magnetik

Secara umum solusi metode elemen hingga dapat 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 pembuatan model fisik dari masalah yang akan diselesaikan dan membuat *input file* yang akan digunakan dalam proses simulasi nantinya. Dalam tahap ini ditentukan berbagai hal seperti di bawah :

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

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

## 2. *Simulation*

Adalah tahap dilakukannya perhitungan masalah numeris yang sudah didefinisikan dalam tahap *preprocessor*. Hasil perhitungan disimpan dalam *file biner* yang siap diolah dalam tahap *postprocessor*.

## 3. *Postprocessing*

Adalah tahap akhir dimana hasil dari *solving (running program)* bisa dilihat.

Pada tahap ini ada beberapa hal yang bisa kita amati atau tampilkan yaitu :

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

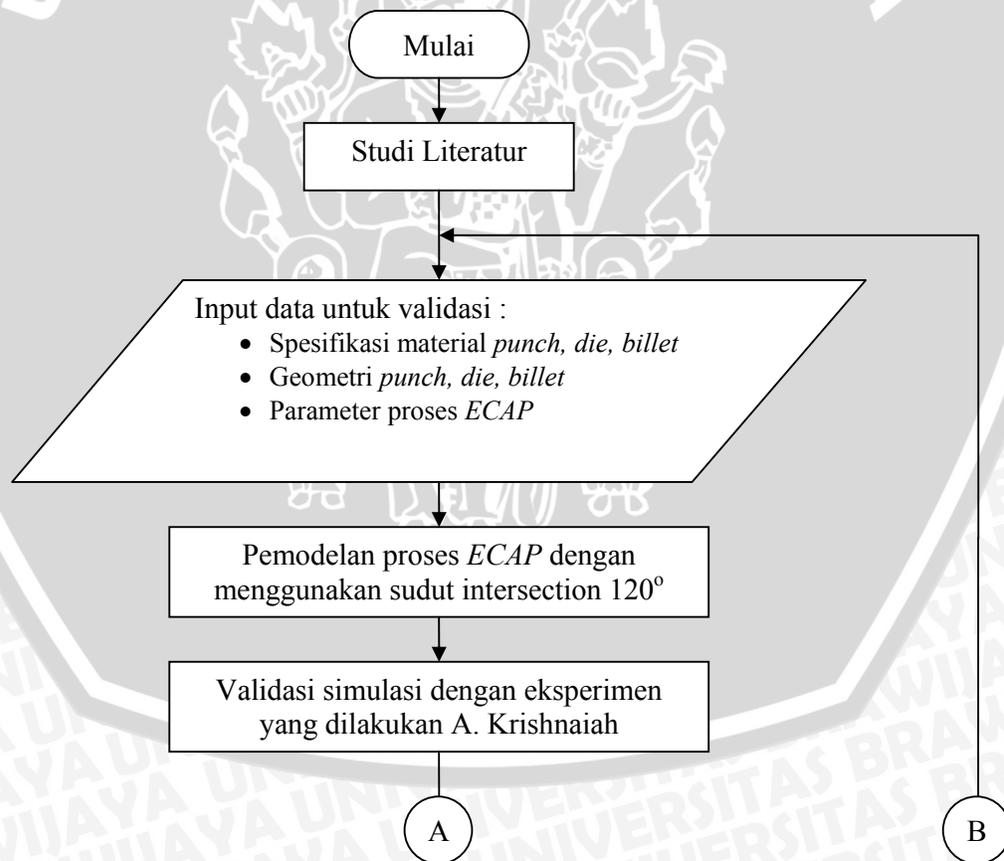
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimental semu (*quasi experimental research*) menggunakan simulasi elemen hingga dengan bantuan komputer, metode ini bertujuan untuk mendapatkan informasi yang dapat digunakan sebagai acuan atau perkiraan dalam melaksanakan eksperimen nyata. Dalam hal ini peneliti berusaha sedekat mungkin pada prosedur dan tata cara dalam eksperimen nyata.

### 3.2 Diagram Alir Penelitian

Pemodelan 2 dimensi proses *ECAP* dilakukan dengan menggunakan bantuan komputer. Diharapkan dari pemodelan ini dapat memberikan suatu pendekatan terhadap eksperimen yang ada. Langkah-langkah yang dilakukan dijelaskan dalam Diagram 3.1.



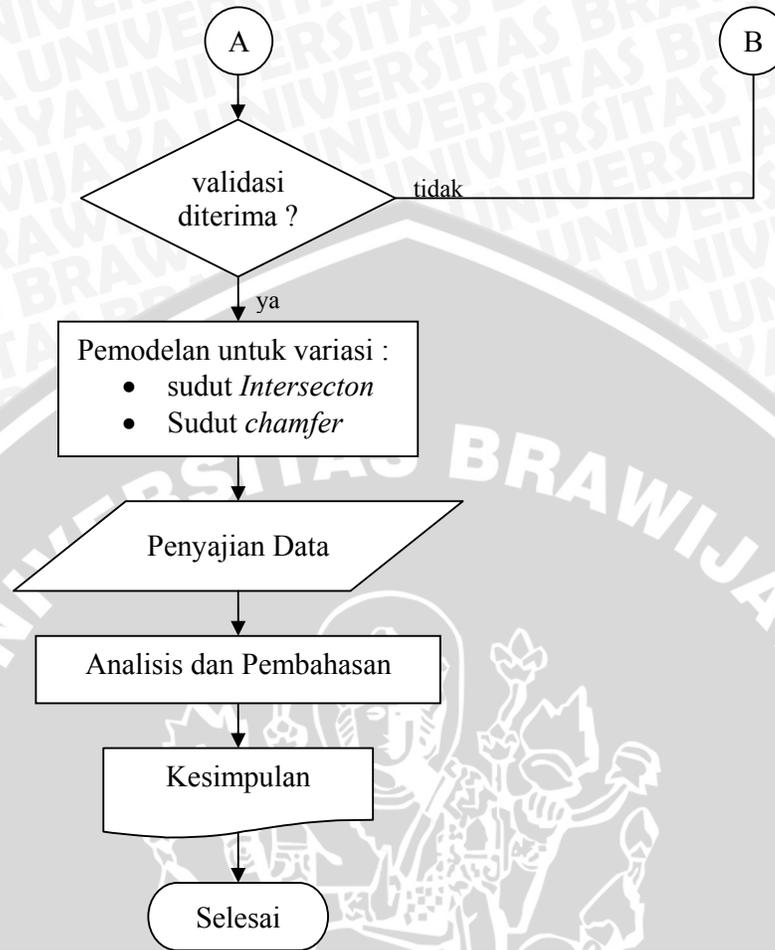


Diagram 3.1. Diagram alir penelitian.

### 3.3 Spesifikasi Material *Billet, Punch, dan Die*

Sifat mekanik material *billet Aluminum 1060-O* yang digunakan adalah:

- *Nominal tensile strength* = 67.2 MPa
- *True tensile strength* = 86.5 MPa
- Tegangan *Yield* ( $\sigma_y$ ) = 21 MPa
- *Young Modulus* = 68.9 GPa

Sifat plastis dari material dapat dilihat pada tabel di bawah :

Tabel 3.1. Properti plastis *Aluminium 1060-O*

true stress (MPa)	True Strain
21	0
28	0.00593
42	0.0154
54.8	0.034
66	0.0728
72.5	0.112
77.8	0.151
82.1	0.191
86.5	0.231

(sumber: *Atlas of Stress-Strain Curves, 2nd Edition*)

Sifat mekanis material tersebut dimasukkan pada tahap *preprocessing* dari simulasi yang dilakukan.

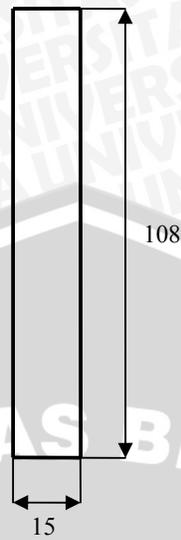
Komposisi unsur penyusun material *Aluminium 1060-O* adalah:

- *Aluminum* minimal 99,6%
- *Cu* maksimal 0,05 %
- *Fe* maksimal 0,35 %
- *Mg* maksimal 0,03 %
- *Mn* maksimal 0,03 %
- *Si* maksimal 0,25 %
- *Ti* maksimal 0,03 %
- *V* maksimal 0,05 %
- *Zn* maksimal 0,05 %
- *Zn* maksimal 0,05 %
- Unsur lainnya masing-masing maksimal 0,03%

Sedangkan *punch* dan *die* dianggap *rigid body* karena kedua material ini tidak terdeformasi.

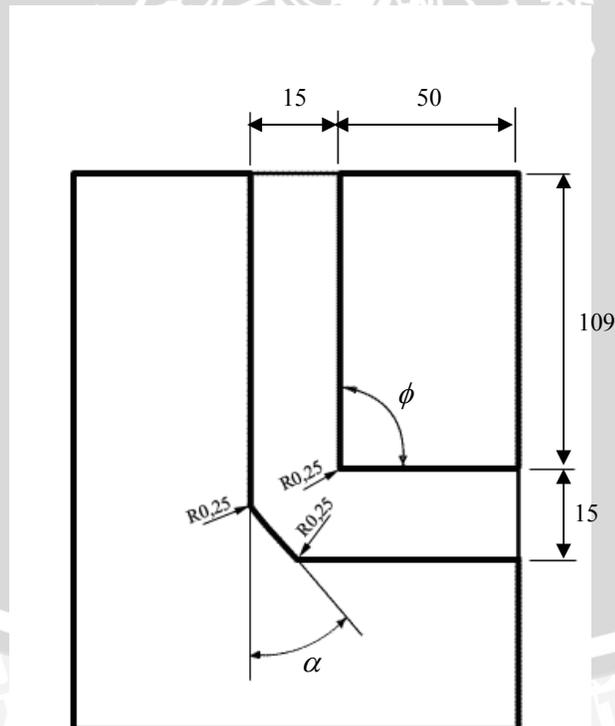
### 3.4 Geometri *Billet* dan *Die*

*Billet* yang digunakan berbentuk balok dengan ukuran melintang 10 mm x 10 mm sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 3.1. tinggi *billet* dipilih sebesar 50 mm agar nantinya diperoleh daerah dengan deformasi yang beraturan setelah melewati *intersection*.



Gambar 3.1 Spesifikasi geometri *billet* yang digunakan.

Sedang untuk *die* yang digunakan mempunyai dimensi seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Spesifikasi geometri *die*.

### 3.5 Pemodelan Menggunakan Abaqus

Pemodelan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pemodelan 2 dimensi. Hal ini dipilih karena geometri dari *Billet*, *die*, dan *punch* memiliki kesamaan ukuran pada salah satu sumbu (dalam hal ini adalah sumbu z). Pemilihan pemodelan 2 dimensi juga dikarenakan dalam proses *ECAP* tidak terdapat rotasi benda kerja, sehingga dapat dianggap defleksi terhadap sumbu z adalah sama (*Plane strain*) (*Abaqus 6.5 user manual*). Dengan pemodelan 2 dimensi juga dapat meningkatkan efisiensi perhitungan yang dilakukan komputer.

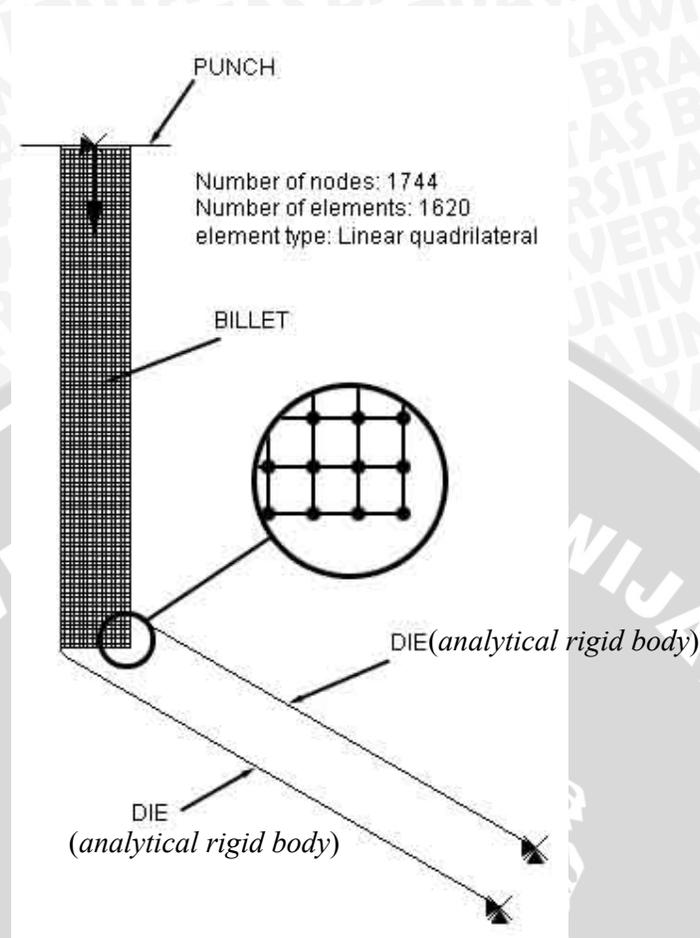
#### 3.5.1. Pemodelan Geometri

Proses *Equal Channel Angular Pressing* melibatkan 3 bagian utama, yaitu *die*/cetakan yang berbentuk saluran, *billet*, dan *punch* untuk menekan *billet*. Pada pemodelan menggunakan abaqus, bagian *billet* dimodelkan sebagai rigid body karena diasumsikan tidak terjadi deformasi ketika proses simulasi berlangsung. Pada program abaqus, terdapat dua jenis *rigid body* yang dapat dipakai, yaitu *analytical rigid* dan *discrete rigid*. *Analytical rigid* memerlukan *resource* komputer yang lebih sedikit dibandingkan dengan *discrete rigid*. Pada jenis *rigid body* tersebut bagian dari model 2 dimensi dapat diwakili dengan garis saja. Namun kekurangan dari *analytical rigid* adalah tidak dapat memodelkan geometri yang kompleks dibandingkan dengan jenis *discrete rigid*. Pada pemodelan *die* dipilih jenis *analytical rigid* karena mempunyai geometri yang sederhana dan bagian yang berinteraksi dengan *billet* hanyalah bagian dalam saja.

Untuk memodelkan *die* dua dimensi diperlukan dua buah *analytical rigid body* yaitu untuk permukaan bagian kanan dan permukaan bagian kiri seperti pada Gambar 3.3.

#### 3.5.2 Pemodelan Pembebanan

Pada simulasi *ECAP*, pembebanan pada proses penekanan dilakukan dengan memberikan *displacement* pada part *punch* yang berupa *Analytical rigid body* ke bawah sebesar 80 mm. Gerakan dari *punch* ini akan menyebabkan *billet* tertekan sampai saluran kedua.



Gambar 3.3. Pemodelan *die ECAP* dengan sudut *intersection*  $120^\circ$  dan sudut *chamfer*  $0^\circ$  menggunakan *Analytical rigid body*

### 3.6 Rancangan Percobaan

Dilakukan penelitian dengan sudut *intersection* yaitu  $135^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $90^\circ$ . Masing-masing variasi sudut *intersection* tersebut diteliti untuk variasi sudut *chamfer* yang berbeda sebagai berikut:

- Untuk sudut *intersection*  $90^\circ$  dibuat variasi sudut *chamfer* yaitu  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ .
- Untuk sudut *intersection*  $105^\circ$  dibuat variasi sudut *chamfer* yaitu  $0^\circ$ ,  $19^\circ$ ,  $56^\circ$ ,  $37.5^\circ$
- Untuk sudut *intersection*  $120^\circ$  dibuat variasi sudut *chamfer* yaitu  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$
- Untuk sudut *intersection*  $135^\circ$  dibuat variasi sudut *chamfer* yaitu  $0^\circ$ ,  $11^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $34^\circ$

Pemilihan Sudut *intersection* berdasarkan pada sudut umum yang dipakai dalam proses *ECAP* (Khrisnaiah A. *et. al.*, 2004). Sedangkan pemilihan sudut *chamfer* diambil dari besar sudut yang mungkin dalam geometri *die*.

### 3.7 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian adalah :

1. Variabel Bebas (*independent variable*)
  - Sudut *chamfer* ( $\alpha$ )
  - sudut *Intersecton* ( $\phi$ )
2. Variabel Terikat (*dependent variable*)
  - Distribusi tegangan geser pada daerah *intersection*.
3. Konstanta
  - Koefisien gesek ( $k$ ) = 0,05.

Harga  $k$  diambil dari koefisien gesek pelumas  $MoS_2$  yang umum digunakan dalam proses *ECAP*.

Masukan data pada material meliputi massa jenis, modulus elastisitas, *poison's ratio*, tegangan luluh, dan data plastis material pada grafik tegangan regangan dapat dilihat pada bab 3.3. Sedangkan data geometri adalah bentuk dan ukuran dari *punch*, *die*, dan *billet*. Dengan masukan ini maka komputer akan memprosesnya dan menghasilkan keluaran yang berupa *node* perpindahan dari pelat yang kemudian digunakan untuk mengetahui deformasi akhir yang terjadi.

### 3.8 Validasi Simulasi

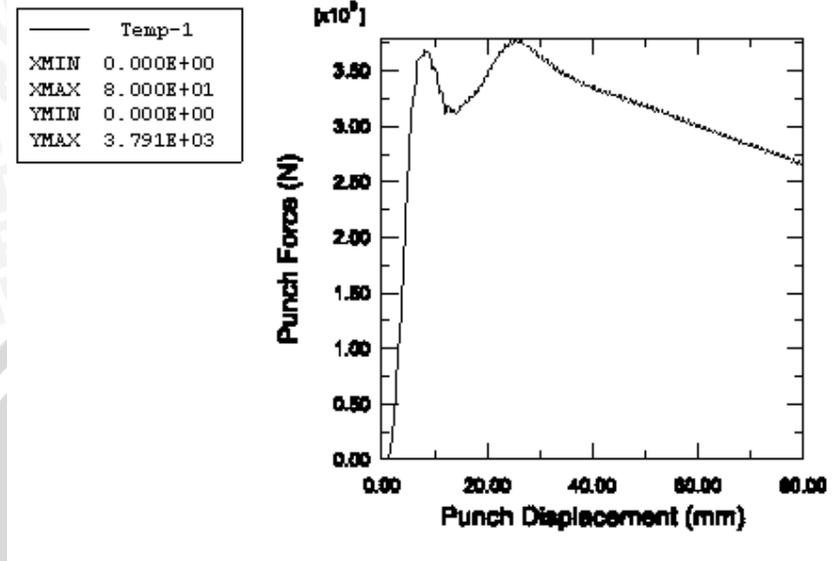
Untuk memvalidasi simulasi yang dilakukan, maka dibuat simulasi untuk kasus *ECAP* pada penelitian experimental yang dilakukan oleh A. Krishnaiah, *et. al.* Data eksperimental dari penelitian A. Krishnaiah yang berupa tekanan maksimum *punch* kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi tersebut.

Dalam penelitiannya A. Krisnaiah menggunakan *die* dengan sudut *intersection* sebesar  $120^\circ$  tanpa *fillet*/lengkungan pada sudut *die*. Panjang *billet* sebesar 108 mm dengan luas penampang sebesar 15x15 mm. Material *billet* yang digunakan adalah tembaga murni. Proses *ECAP* menggunakan pelumas  $MoS_2$ .

Simulasi yang digunakan menggunakan dimensi *billet* yang persis sama dengan experimental. Material ditekan sejauh 80 mm dari posisi awal. *Billet* di-mesh dengan menggunakan elemen 4 *node quadrilateral plane strain* (CPE4R) (ABAQUS User Manual). Digunakan jenis simulasi 2 Dimensi karena kasus tersebut memenuhi kondisi *plane strain*. Koefisien gesek yang digunakan adalah sebesar 0,05. Hubungan tegangan regangan dari tembaga adalah  $\sigma = 359\varepsilon^{0.3144}$ , Young Modulus bahan sebesar 69 GPa,

tegangan luluh bahan sebesar 40 MPa dan *poissons ratio* sebesar 0.34 (A. Krishnaiah *et. al.*, 2004).

Hasil simulasi yang berupa *punch force* dapat dilihat pada gambar 3.4 di bawah



Gambar 3.4. Grafik *history* gaya tekan *punch* untuk validasi

Berdasarkan simulasi tersebut gaya tekan *punch* maksimum adalah sebesar 3791 N. Tekanan adalah gaya per satuan luas, sehingga *punch* menurut simulasi adalah sebesar:

$$P_{punch} = F/A = 3791 \text{ N} / 15 \text{ mm} = 252,73 \text{ MPa}$$

Tabel 3.2 Perbandingan tekanan *punch* antara hasil experimental dengan hasil simulasi

EXPERIMENTAL A. KRISHNAIAH	SIMULASI ( $\mu = 0.05$ )
258 MPa	252,73 MPa

Simulasi dikatakan valid apabila galat yang terjadi kurang dari atau sama dengan 5%. Pada hasil simulasi di atas, galat yang terjadi adalah:

$$\frac{(258.000 - 252.73)}{258.000} \times 100\% = 2.04\%$$

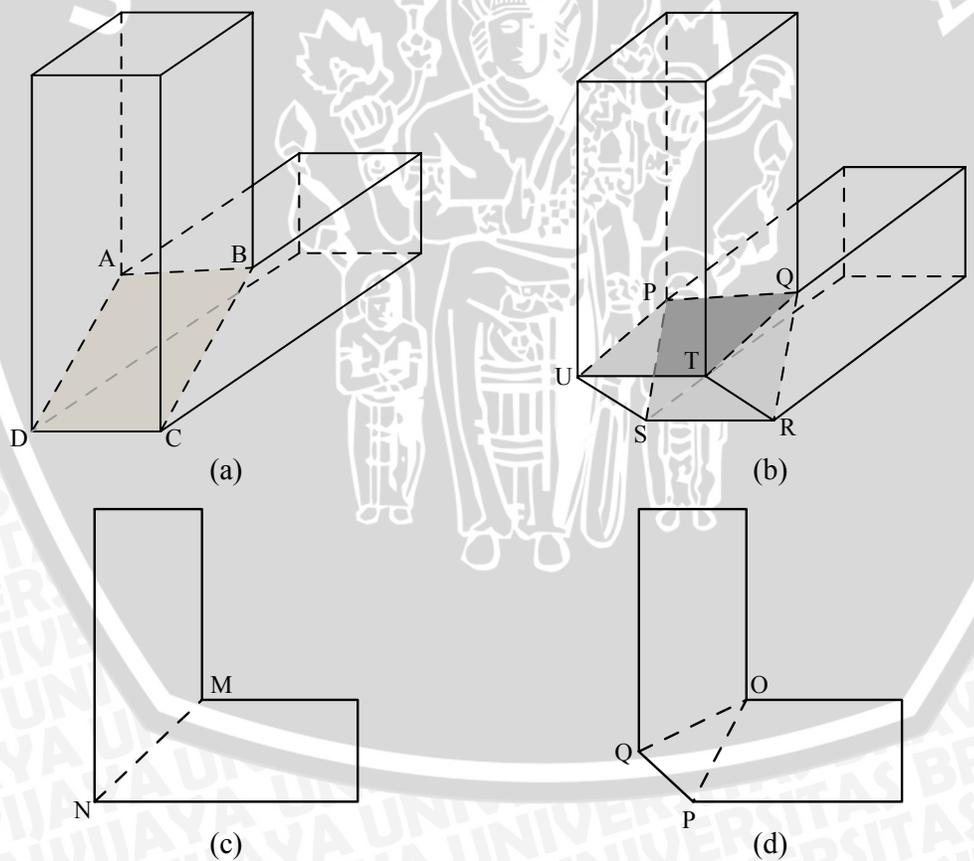
Dari perhitungan di atas dapat dilihat bahwa hasil perhitungan dengan simulasi metode elemen hingga tersebut valid karena galatnya kurang dari 5%.

**BAB IV**  
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**4.1 HASIL**

**4.1.1 Distribusi Tegangan pada Bidang Geser Daerah *Intersection***

*Die* dalam proses *ECAP* mempunyai bidang geser dimana gaya geser terjadi pada material ketika melewati *intersection*. Distribusi tegangan geser pada bidang geser ini dapat dijadikan parameter efektifitas konfigurasi sebuah *die*. Pada kasus *die* tanpa sudut *chamfer*, dilihat dari geometri *die* terdapat sebuah bidang geser ABCD seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.1 (a), sedangkan untuk kasus *die* dengan *chamfer* terdapat dua bidang geser PQTU dan PQRS apabila dilihat dari geometrinya (Gambar 4.1 (b)). Apabila dilihat secara 2 dimensi sebagaimana pada simulasi metode elemen hingga yang dilakukan, bidang geser tersebut dapat diwakili oleh garis MN pada kasus *die* tanpa sudut *chamfer* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1 (c) sedangkan untuk kasus dengan *chamfer* ditunjukkan oleh garis OP dan OQ pada Gambar 4.1(d).

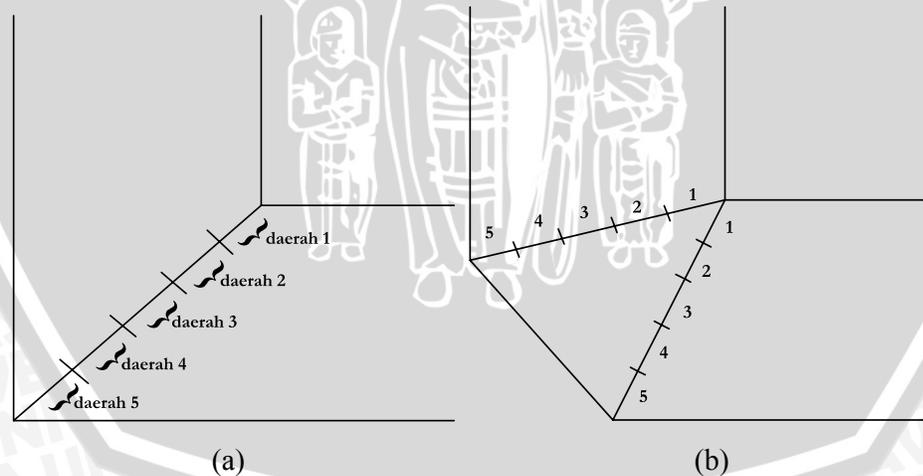


Gambar 4.1. Bidang geser pada *die*. (a) Kasus tanpa sudut *chamfer*. (b) Kasus dengan sudut *chamfer*. (c) Tampilan 2D Kasus tanpa sudut *chamfer*. (d) Tampilan 2D Kasus dengan sudut *chamfer*.

Distribusi tegangan yang ditampilkan adalah berupa distribusi tegangan geser maksimum. Hal ini dipilih karena dalam proses *ECAP* tegangan yang menyebabkan slip pada kristal adalah tegangan geser. Pada proses ini, karena material mengalami *pure stress*, maka material akan mengalami luluh apabila tegangan geser yang dikenakan pada material melebihi atau sama dengan tegangan luluh geser material.

Untuk mengetahui pengaruh sudut *intersection* dan sudut *chamfer* terhadap distribusi tegangan geser pada daerah *intersection*, maka data besar tegangan diambil pada jalur geser channel yang ditunjukkan pada Gambar 4.1(c) dan (d). Pada gambar tersebut, MN, OP, dan OQ merupakan jalur pengambilan data untuk mengetahui distribusi tegangan pada bidang geser *channel*. Pada *die* dengan sudut *chamfer*, terdapat dua buah jalur pengambilan data, yaitu OQ dan OP. Untuk mempermudah, Jalur OQ disebut sebagai jalur 1, sedangkan jalur OP disebut sebagai jalur 2.

Untuk mempermudah dalam menganalisa, maka jalur pengambilan data tersebut dibuat 5 interval. Tegangan yang terdapat pada masing-masing interval dirata-rata sehingga didapatkan hasil tertentu. Hasil inilah yang kemudian digrafikkan untuk mengetahui trend atau kecenderungan distribusi tegangan sepanjang jalur pada masing-masing kasus. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.2.

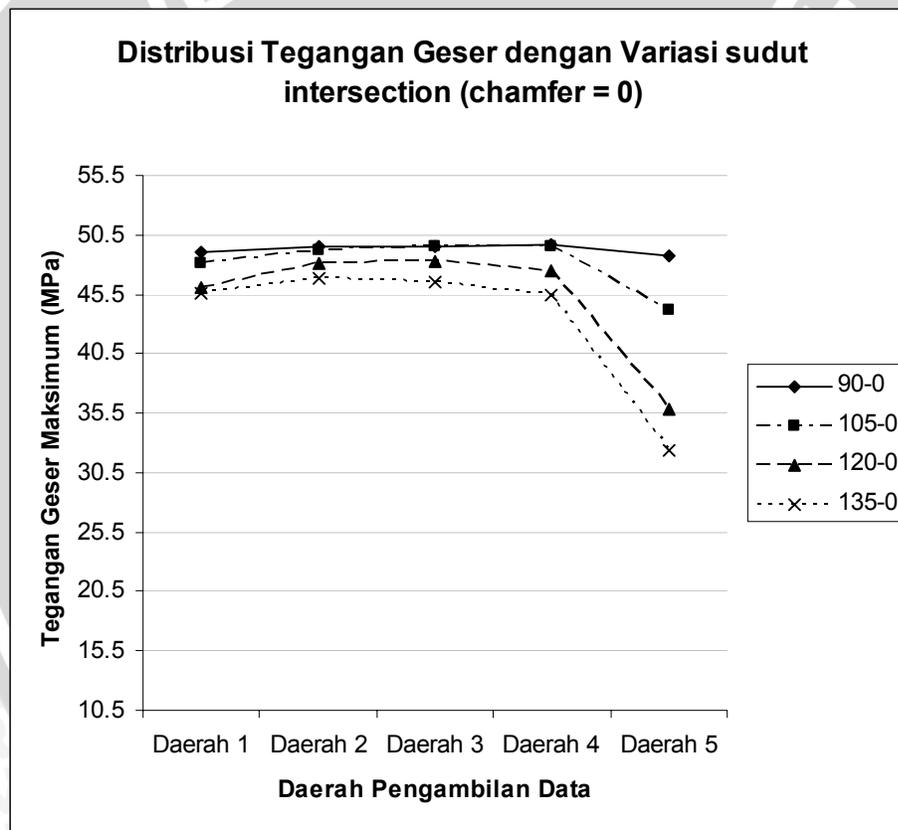


Gambar 4.2. Interval pengambilan data pada jalur. (a) Kasus tanpa sudut *chamfer*.  
(b) Kasus dengan sudut *chamfer*

Tegangan dikatakan terdistribusi secara merata apabila pada setiap titik sepanjang jalur mempunyai nilai tegangan yang sama. Pada grafik di atas, kurva yang lurus sejajar dengan sumbu x berarti pada jalur tersebut mempunyai distribusi tegangan yang merata.

**4.1.1.1. Perbandingan Distribusi Tegangan Sepanjang Jalur Geser pada Variasi Sudut *Intersection* Tanpa Sudut *Chamfer***

Untuk mengetahui pengaruh variasi sudut *intersection* terhadap distribusi tegangan sepanjang jalur geser maka data ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara daerah pengambilan data terhadap besar tegangan geser maksimum untuk masing-masing variasi sudut *intersection*.



Gambar 4.3. Grafik distribusi tegangan pada jalur geser *channel* masing-masing variasi sudut *intersection*

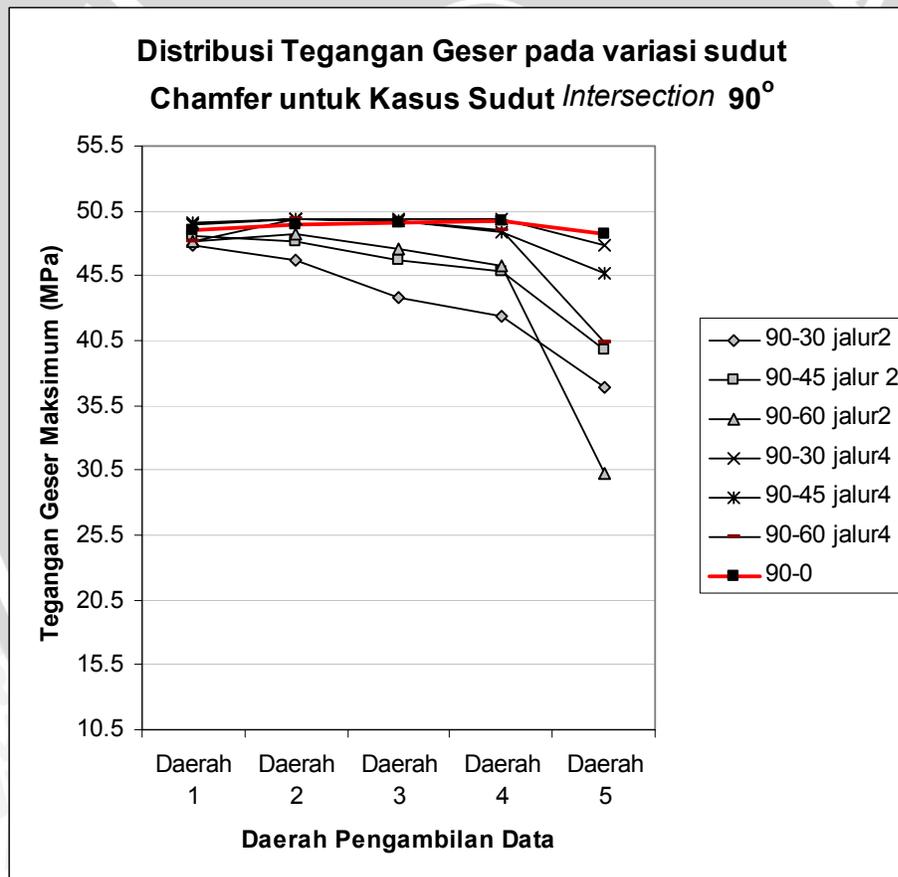
Gambar 4.3 menampilkan perbandingan distribusi tegangan untuk masing-masing variasi sudut *intersection*. Legenda dalam grafik tersebut ditulis dengan susunan ”sudut *intersection*-sudut *chamfer*”. Sebagai contoh ”90-0” berarti kasus *ECAP* dengan

sudut *intersection*  $90^\circ$  dan sudut *chamfer*  $0^\circ$ . Hal ini juga berlaku untuk grafik-grafik berikutnya.

Pada Gambar 4.3 terlihat bahwa semakin besar sudut *intersection* menyebabkan tegangan geser yang dihasilkan perpotongan *channel* rata-rata cenderung menurun. Distribusi tegangan sepanjang jalur paling merata terlihat pada kasus sudut *intersection*  $90^\circ$  kemudian semakin tidak merata seiring dengan semakin besarnya sudut *intersection*.

#### 4.1.1.2. Perbandingan Distribusi Tegangan Sepanjang Jalur Geser pada Variasi Sudut *chamfer* Untuk Sudut *Intersection* $90^\circ$ .

Sebagaimana pada penjelasan sebelumnya, pada kasus *die* menggunakan sudut *chamfer*, terdapat dua jalur geser. Sedangkan pada kasus *die* tanpa sudut *chamfer*, hanya terdapat satu buah jalur geser sehingga terlihat dalam grafik terdapat 7 buah legenda.

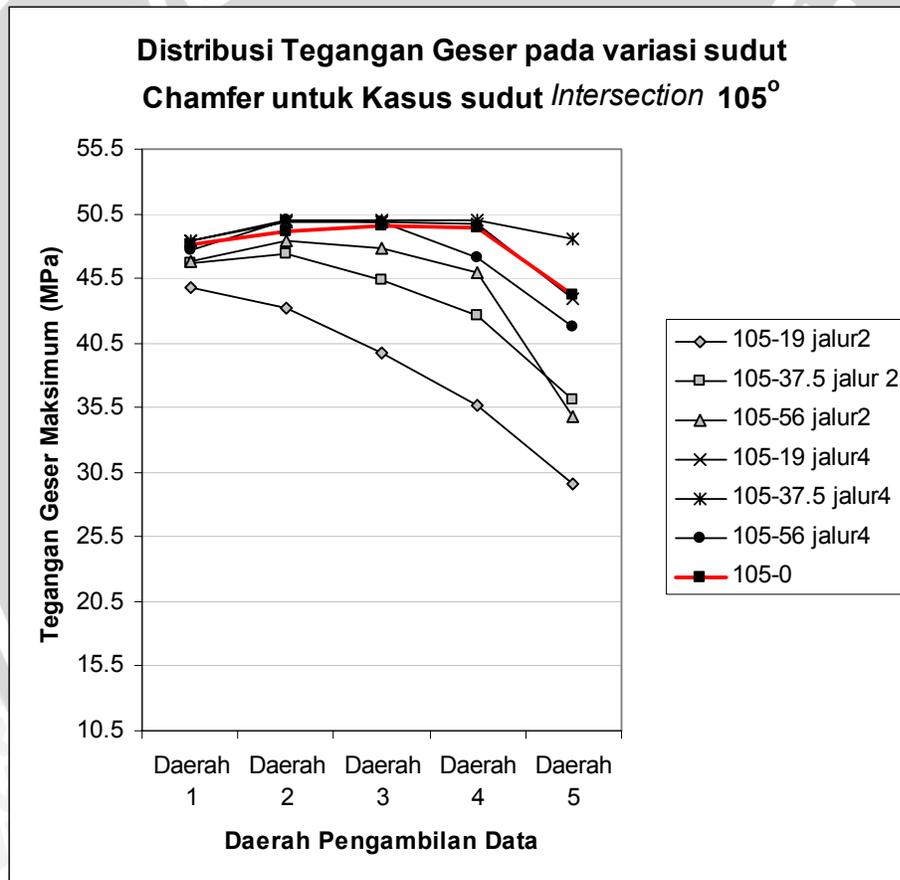


Gambar 4.4. Grafik distribusi tegangan variasi sudut *chamfer* untuk kasus ECAP dengan sudut *intersection*  $90^\circ$ .

Dapat dilihat pada Gambar 4.4 bahwa distribusi tegangan paling merata terlihat kasus sudut *chamfer*  $0^\circ$ . Semakin besar sudut *chamfer* maka distribusi tegangan

sepanjang jalur 2 semakin tidak merata dan besar tegangan rata-rata pada jalur tersebut semakin menurun. Penurunan tegangan yang signifikan terlihat pada daerah 5. Hal tersebut berlaku sebaliknya untuk jalur 1 dimana dengan semakin membesarnya sudut *chamfer* maka rata-rata tegangan geser akan naik kecuali pada daerah 5 jalur 1 pada kasus sudut *chamfer* 60° yang mana tegangan geser pada daerah tersebut justru lebih kecil daripada daerah yang sama pada kasus sudut *chamfer* 45°. Dapat dilihat juga bahwa tegangan yang terjadi pada jalur 2 rata-rata semuanya lebih besar daripada tegangan pada jalur 1.

**4.1.1.3. Perbandingan Distribusi Tegangan Sepanjang Jalur Geser pada Variasi Sudut *chamfer* Sudut *Intersection* 105°.**



Gambar 4.5. Grafik distribusi tegangan variasi sudut *chamfer* untuk kasus ECAP dengan sudut *intersection* 105°.

Dapat dilihat pada Gambar 4.5, kecenderungan grafik tidak jauh berbeda dengan pada kasus sebelumnya dimana semakin besar sudut *chamfer*, maka besar tegangan rata-rata pada jalur tersebut cenderung menurun dan tegangan semakin tidak terdistribusi

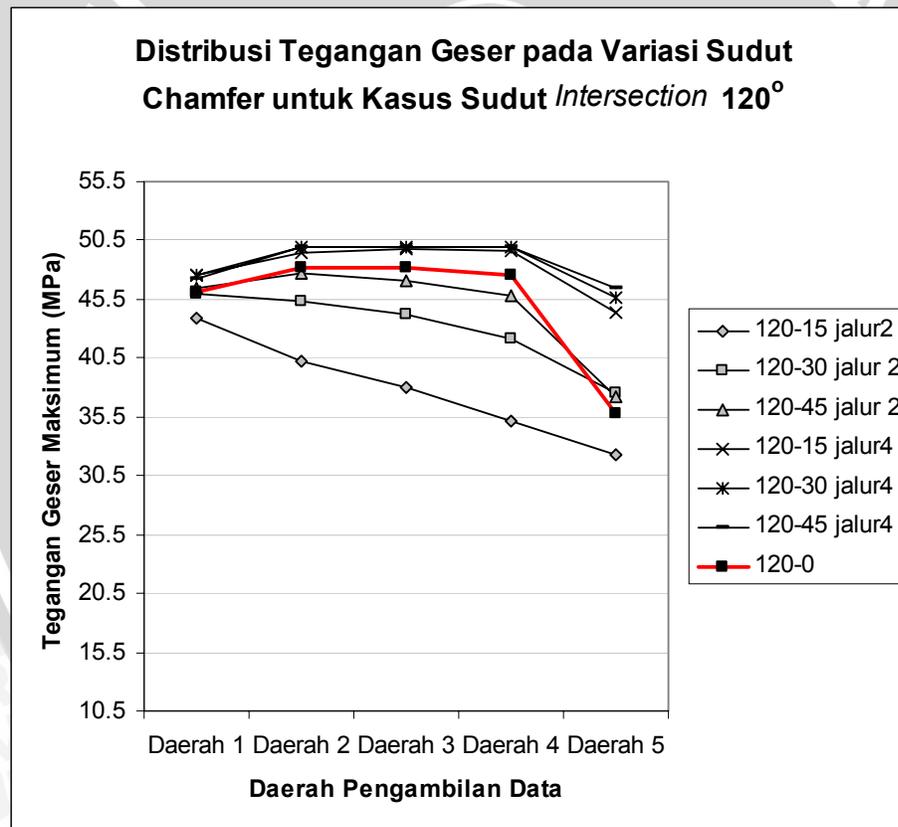
merata.. Namun pada jalur 1 kasus sudut *chamfer*  $19^\circ$  dan  $37.5^\circ$ , semakin menjauhi titik acuan pengambilan data tegangan terlihat menurun secara signifikan apabila dibandingkan pada kasus sebelumnya.

Pada kasus sudut *intersection*  $105^\circ$  juga terlihat bahwa distribusi tegangan yang paling merata terdapat pada jalur 2 kasus sudut *chamfer*  $37.5^\circ$ . Hal ini berbeda pada kasus sebelumnya yang mana distribusi tegangan geser paling merata terdapat pada jalur geser kasus *ECAP* tanpa sudut *chamfer*.

#### 4.1.1.4. Perbandingan Distribusi Tegangan Sepanjang Jalur Geser pada Variasi

##### Sudut *chamfer* Sudut *Intersection* $120^\circ$ .

Pada kasus sudut *intersection*  $120^\circ$ , penurunan tegangan di sepanjang jalur 2 akibat dari semakin besarnya sudut *chamfer* tidak begitu signifikan apabila dibandingkan dengan pada kasus sebelumnya.



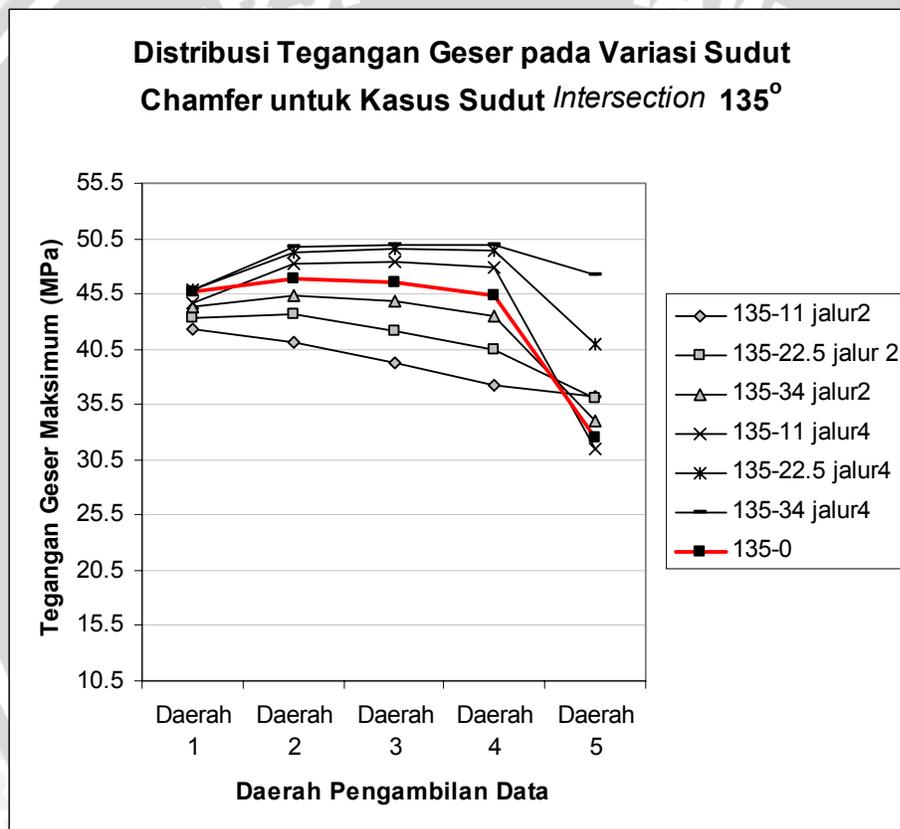
Gambar 4.6. Grafik distribusi tegangan variasi sudut *chamfer* untuk kasus *ECAP* dengan sudut *intersection*  $120^\circ$ .

Kecenderungan grafik berbeda dengan kasus sebelumnya, dimana dengan semakin membesarnya sudut *chamfer*, maka pada jalur 2, besar tegangan akan semakin meningkat dan juga distribusinya semakin merata. Sedangkan pada jalur 1

yang terjadi masih sama dengan pada kasus sebelumnya dimana semakin besar sudut *chamfer* maka distribusi tegangan geser akan semakin merata dengan besar rata-rata tegangan di sepanjang jalur semakin meningkat.

Pada kasus sudut *intersection* 120°, tegangan yang merata dan besar justru terdapat pada jalur 2 sudut *intersection* 45°, dan tidak seperti pada kasus-kasus sebelumnya, distribusi tegangan pada kasus *ECAP* tanpa sudut *chamfer* justru sangat tidak merata.

**4.1.1.5. Perbandingan Distribusi Tegangan Sepanjang Jalur Geser pada Variasi Sudut *chamfer* Sudut *Intersection* 135°**



Gambar 4.7. Grafik distribusi tegangan variasi sudut *chamfer* untuk kasus *ECAP* dengan sudut *intersection* 135°.

Pada kasus sudut *intersection* 135°, kecenderungan grafik sama dengan pada kasus sudut *intersection* 120° dimana dengan semakin besarnya sudut *chamfer*, maka distribusi tegangan juga akan semakin merata, dan besar tegangan rata-rata akan semakin naik pada jalur 2. Sedangkan untuk jalur 1 masih sama dengan kasus

sebelumnya, hanya saja pada daerah 5 kasus sudut *chamfer* 11 besar tegangan daerah tersebut lebih besar dari yang lain pada daerah yang sama.

Dari penjabaran hasil simulasi di atas terdapat beberapa poin penting dalam hubungannya dengan distribusi tegangan pada bidang geser *die*. Beberapa poin tersebut adalah sebagai berikut:

- Semakin besar sudut *intersection*, maka distribusi tegangan geser pada bidang geser *die* tanpa *chamfer* semakin tidak merata. Daerah kurva horisontal yang merupakan indikasi bahwa distribusi tegangan geser merata sepanjang jalur semakin pendek seiring dengan semakin besarnya sudut *intersection*. Semakin besar sudut *intersection*, kurva distribusi tegangan dalam grafik semakin menurun, hal tersebut menandakan bahwa semakin jauh dengan titik acuan, besar tegangan geser akan semakin kecil. Penurunan yang signifikan terjadi pada beberapa daerah 5.
- Untuk kasus *die* dengan sudut *chamfer*, terdapat dua bidang geser pada daerah *intersection*.
- Kecenderungan distribusi tegangan pada jalur 2 sudut *intersection* yang kecil, yaitu diwakili dengan sudut *intersection*  $90^\circ$  dan  $105^\circ$ , semakin besar sudut *chamfer* maka rata-rata tegangan pada jalur geser akan semakin menurun dan distribusi tegangannya semakin tidak merata. Sedangkan pada kasus sudut *intersection* yang besar, yang diwakili oleh  $120^\circ$  dan  $135^\circ$  berlaku sebaliknya, yaitu semakin besar sudut *chamfer*, maka distribusi tegangan semakin merata dan rata-rata tegangan semakin besar.
- Pada jalur 1 kecenderungan untuk semua kasus sama, yaitu dengan semakin besarnya sudut *chamfer* maka distribusi tegangan akan semakin merata dan rata-rata distribusi tegangan akan semakin meningkat meskipun semuanya masih di bawah jalur 2.

#### 4.1.2 Gaya tekan *punch*

Besar gaya tekan *punch* maksimum pada masing-masing kasus dapat diperlihatkan dalam tabel-tabel di bawah:

- Kasus dengan sudut *intersection*  $90^\circ$

Sudut Chamfer	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$
Gaya Tekan Max. (N)	2548	1937	1813	1822

- Kasus dengan sudut *intersection*  $105^\circ$

Sudut Chamfer	$0^\circ$	$19^\circ$	$56^\circ$	$37.5^\circ$
Gaya Tekan Max. (N)	1928	1535	1460	1442

- Kasus dengan sudut *intersection*  $120^\circ$

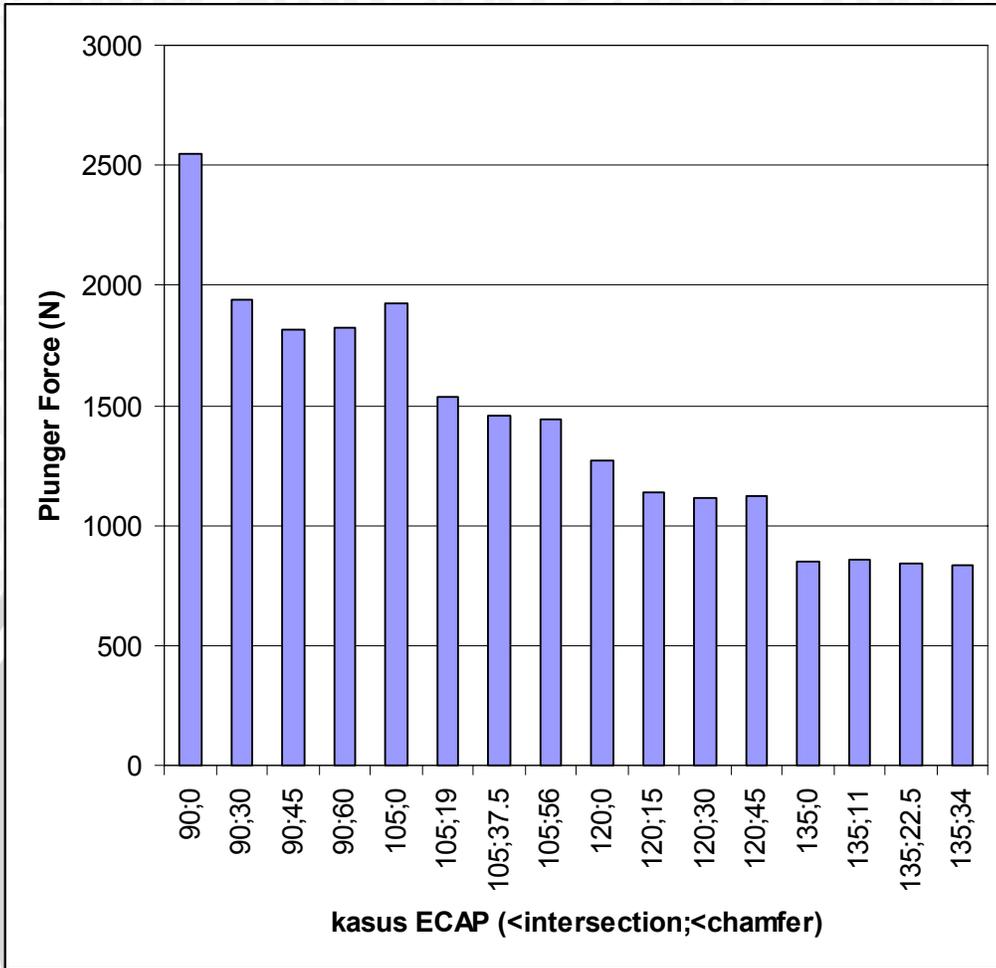
Sudut Chamfer	$0^\circ$	15	30	45
Gaya Tekan Max. (N)	1271	1134	1112	1119

- Kasus dengan sudut *intersection*  $135^\circ$

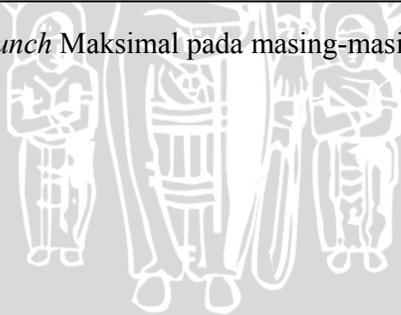
Sudut Chamfer	$0^\circ$	$11^\circ$	$22.5^\circ$	$34^\circ$
Gaya Tekan Max. (N)	848	858.5	842.9	831.3

Untuk memperjelas data pada tabel di atas, maka data-data tersebut direpresentasikan dalam bentuk grafik. Dapat dilihat pada Gambar 4.8 bahwa pada sudut *intersection* yang kecil, penambahan sudut *chamfer* akan mengurangi gaya tekan *punch* secara signifikan. Hal tersebut dapat dilihat pada kasus *die* dengan sudut *intersection*  $105^\circ$  dan  $90^\circ$ . Semakin besar sudut *intersection*, maka pengaruh keberadaan sudut *chamfer* terhadap gaya tekan *punch* semakin tidak tampak. Hal tersebut dapat dilihat pada kasus *die* dengan sudut *intersection*  $135^\circ$ .





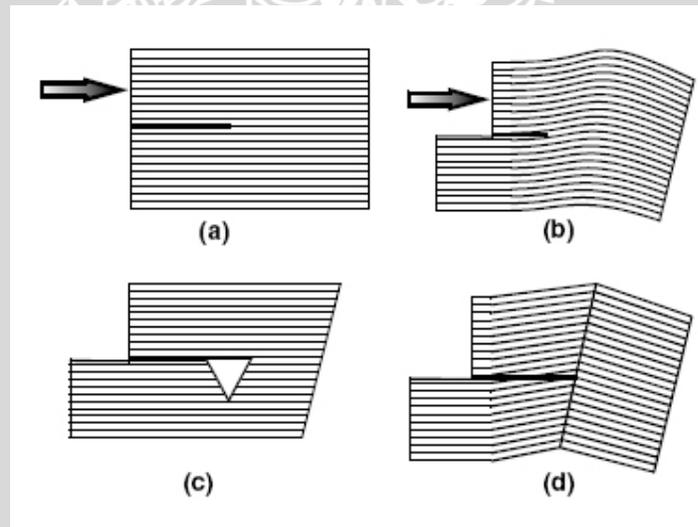
Gambar 4.8. Gaya *Punch* Maksimal pada masing-masing kasus *ECAP*



## 4.2 Pembahasan

Dari data pada sub bab 4.1 dapat dilihat bahwa pada semua kasus *ECAP* material telah dikenai tegangan yang melebihi tegangan luluh, yang artinya material telah terdeformasi plastis (Tegangan luluh material sebesar 21MPa). Namun pada semua kasus juga terlihat adanya daerah yang mempunyai tegangan melebihi tegangan ultimate material. Apabila didasarkan pada teori kegagalan, material tersebut telah mengalami kerusakan, namun dalam proses *cold forming* menggunakan metode *ECAP*, hal tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

Ketika material terdeformasi, maka akan terjadi relaksasi tegangan (*stress relaxation*). Relaksasi tegangan tersebut bisa berupa perputaran relatif kristal lattice, atau pembentukan *micropores* dengan dimensi melintang sekitar 100 nm (Gambar 4.9). Kemungkinan pertama dapat menyebabkan perbaikan butir dan penguatan material, sedangkan kemungkinan kedua dapat menyebabkan kerusakan struktural dan penurunan duktilitas (Beygelzeimer, Y. 2004).



Gambar 4.9. Pembentukan zona akumulatif akibat gaya geser (a,b), relaksasi tegangan dengan *micropore* (c), relaksasi tegangan dengan pembentukan *HAB*(d).

(Sumber: Beygelzeimer, Y. 2004)

Dalam proses *Severe Plastic Deformation* pada material *polycrystalline*, perbaikan butiran (*Grain Refinement*) berkebalikan dengan akumulasi *voids*, yang artinya apabila perbaikan butiran semakin banyak terjadi, maka

kemungkinan akan terjadinya *micropores* dalam material akan semakin berkurang (Beygelzeimer, Y. 2004). Hal tersebut juga berlaku sebaliknya. *Micropores* pada prakteknya tidak berubah ukuran ketika terjadi deformasi, namun akumulasi dari *micropores* tersebut dapat menyebabkan *fracture*. Jika akumulasi *micropores* tersebut melewati batas tertentu (mendekati 0,01 dari material volume) maka *crack* makroskopik mulai terbentuk (Cheremskoj dalam isiBeygelzeimer, 2004).

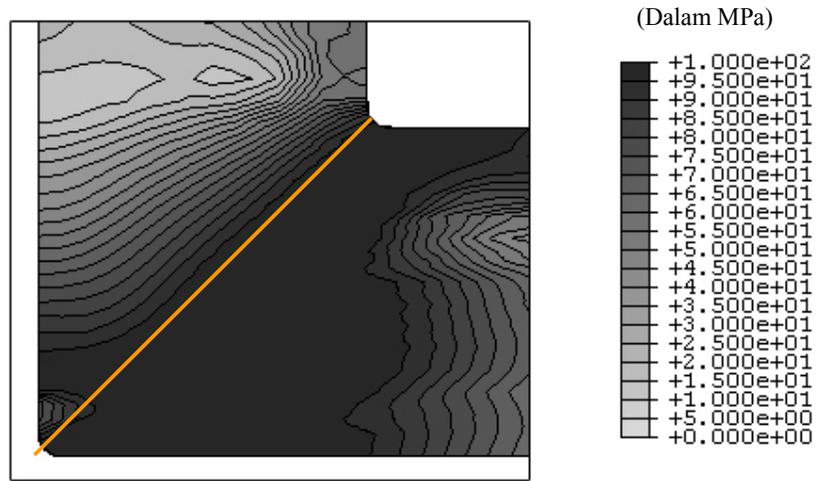
Pada proses *ECAP*, kemungkinan perbaikan butir dengan susunan *HAB* (*High Angle Boundary*) lebih besar (Prangnell *et. al.*, 2001). Berdasarkan pernyataan pada paragraf sebelumnya berarti kemungkinan untuk terjadi akumulasi *micropores* akan semakin kecil, sehingga meskipun dalam prediksi simulasi Metode Elemen Hingga material telah mengalami kerusakan akibat melebihi tegangan ultimate, namun dalam kenyataannya material belum tentu menalami kegagalan karena pada saat itu juga terjadi perbaikan butiran yang bisa mencapai ukuran *submicrometer*. Namun untuk mengurangi sesedikit mungkin kemungkinan terjadinya *micropores*, dapat dilakukan *back pressure* pada *ECAP* (Beygelzeimer, Y., 2004).

#### 4.2.1 Distribusi Tegangan pada *die* tanpa sudut *chamfer*

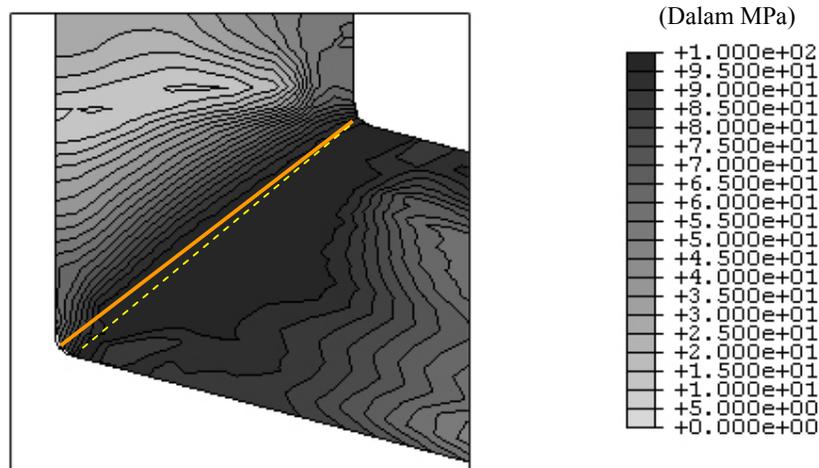
Dari hasil simulasi didapatkan bahwa semakin besar sudut *intersection*, distribusi tegangan pada bidang geser yang ditunjukkan oleh jalur 3 semakin tidak merata. Untuk memperjelas distribusi tegangan pada material, maka pada Gambar 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 ditampilkan kontur plot tegangan *tresca* pada keempat variasi sudut *intersection* tanpa sudut *chamfer*. Dari keempat gambar tersebut besar tegangan pada material dikelompokkan menurut besarnya. Semakin gelap area berarti tegangan pada daerah tersebut semakin besar. Bidang geser pada *die* ditunjukkan oleh garis berwarna kuning.

Dapat dilihat pada Gambar 4.10 daerah dengan tegangan sekitar 95 MPa merata pada sepanjang jalur bidang geser *die*. Pada Gambar 4.3 jalur tersebut terlihat mempunyai kurva yang mendatar. Gambar 4.11 memperlihatkan distribusi tegangan pada kasus sudut *intersection* 105°. Apabila dibandingkan sebelumnya daerah dengan tegangan tinggi lebih menyempit. Dapat dilihat juga bahwa daerah dengan tegangan lebih dari 95 MPa masih tersebar sepanjang

material, namun tidak persis pada jalur geser. Hal inilah yang menyebabkan pada daerah 5 tegangannya cenderung menurun dari kasus sebelumnya.

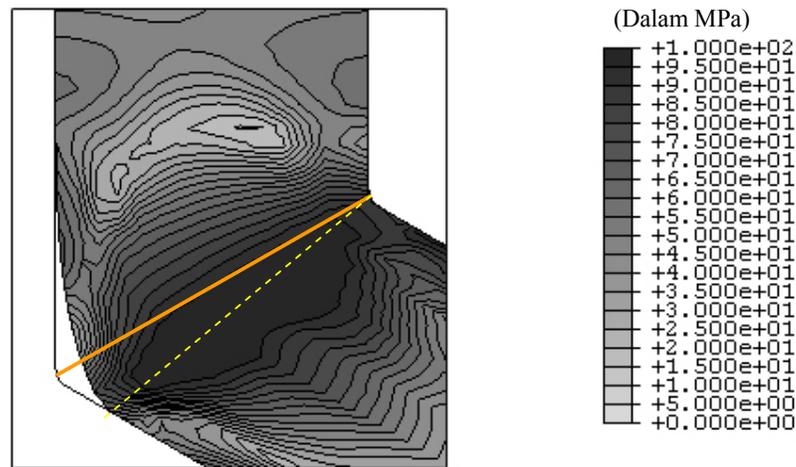


Gambar 4.10. Distribusi tegangan geser pada daerah *intersection* kasus sudut *intersection 90°*.



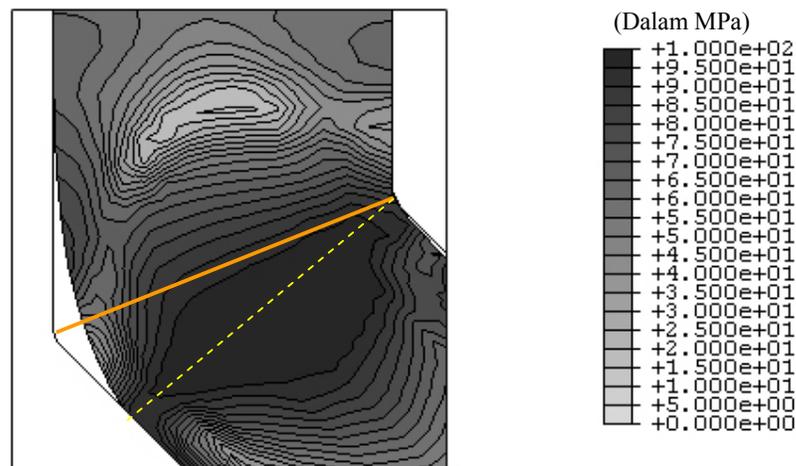
Gambar 4.11. Distribusi tegangan geser pada daerah *intersection* kasus sudut *intersection 105°*.

Pada kasus sudut *intersection 120°* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 distribusi tegangan dengan besar diatas 95 MPa tidak terdistribusi merata pada arah melintang material.. Tegangan geser sebagian besar tidak terjadi pada jalur geser. Hal tersebut ditandai dengan sedikitnya dari daerah tegangan dengan besar lebih dari 95 MPa yang menyentuh jalur geser *die*.



Gambar 4.12. Distribusi tegangan geser pada daerah *intersection* kasus sudut *intersection* 120°.

Pada kasus sudut *intersection* 135° yang ditunjukkan oleh Gambar 4.13 terlihat bahwa tegangan geser yang terjadi pada material tidak berada pada jalur geser *die*. Hal tersebut ditandai dengan distribusi tegangan antara 95-100 MPa yang tidak berada pada jalur geser.



Gambar 4.13. Distribusi tegangan geser pada daerah *intersection* kasus sudut *intersection* 135°.

Keterangan pada beberapa paragraf sebelumnya menjelaskan mengapa pada grafik distribusi tegangan pada sub bab 4.1 cenderung menurun seiring dengan semakin besarnya sudut *intersection*. Semakin menurunnya grafik

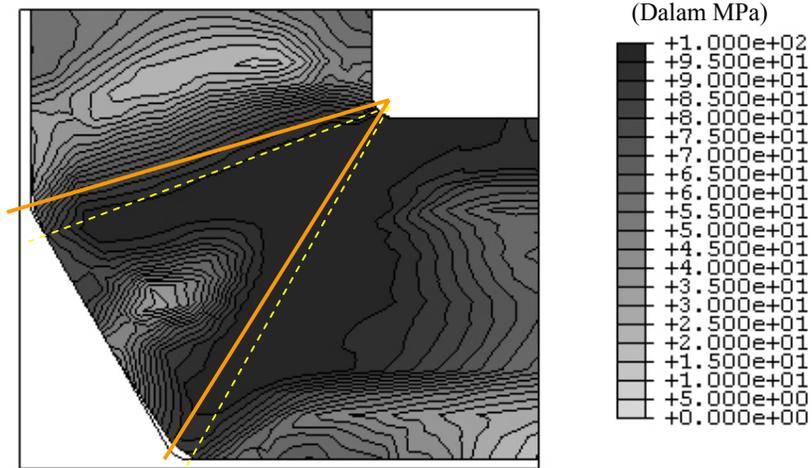
tersebut bukan dikarenakan tegangan maksimum yang terjadi pada benda kerja semakin menurun, namun lebih disebabkan karena bergesernya daerah dengan nilai tegangan paling besar tersebut dari jalur geser. Semakin besar sudut *intersection*, tegangan geser maksimal yang terjadi pada material semakin bergeser ke kanan menjauhi jalur geser *die*.

Pada keempat gambar di atas terlihat juga bahwa semakin besar sudut *intersection*, rongga yang terjadi antara *die* dengan dinding bagian kiri semakin besar. Semakin besar rongga tersebut menyebabkan kurang efektifnya tegangan geser yang diberikan pada material. Material pada daerah rongga tersebut cenderung mengalami bending daripada gaya geser. Hal ini dapat dilihat dari lengkungan yang terjadi pada daerah tersebut.

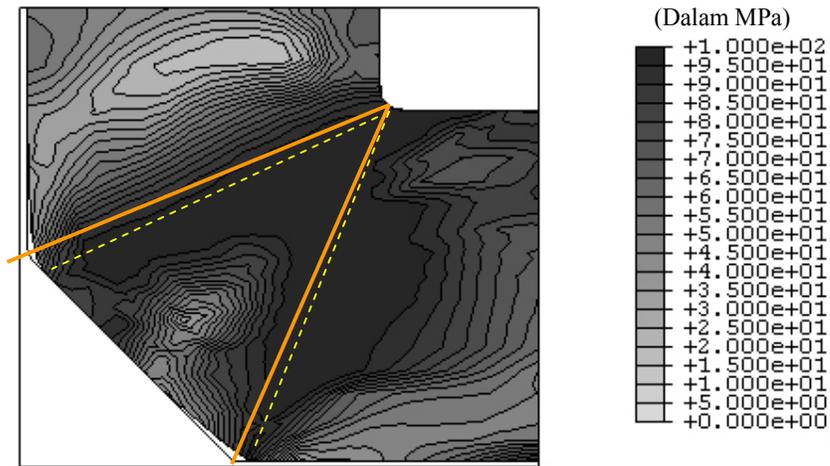
Pada keempat gambar di atas terlihat bahwa bidang geser yang terjadi pada material tidak berada pada pergeseran *intersection* pada sudut *intersection* lebih dari  $90^\circ$  (ditandai dengan garis putus-putus pada Gambar 4.10, 4.11, 4.12, 4.13). Pergeseran bidang geser yang semestinya berada pada garis perpotongan tersebut dikarenakan adanya rongga yang dijelaskan pada paragraf sebelumnya. Dengan semakin besarnya rongga, maka pada *billet* bagian kiri akan cenderung terjadi bending, sehingga bidang geser akan bergeser ke kanan dimana material bagian kiri tersebut menyentuh dinding *die*. Bidang geser berubah menjadi antara titik acuan dengan titik dimana material mulai bertemu dengan dinding bawah. Hal ini menyebabkan bidang geser yang terjadi pada material lebih pendek daripada seharusnya, yaitu pada garis geser *intersection*. Dengan semakin pendeknya bidang geser, regangan yang terjadi juga akan berkurang. Hal ini sangat merugikan dalam proses *ECAP* karena seharusnya material mengisi sempurna *die* sehingga bidang geser berada sepanjang garis perpotongan *die* dan *intersection* dalam *die* tersebut dapat berfungsi maksimal.

Terjadinya rongga pada daerah *intersection* tersebut disebabkan material menalami pengerasan regang, sehingga daerah elastis pada sebelah kiri *billet* masih lebih tinggi daripada bagian kanan *billet*, sehingga material pada daerah bagian kiri cenderung melengkung.

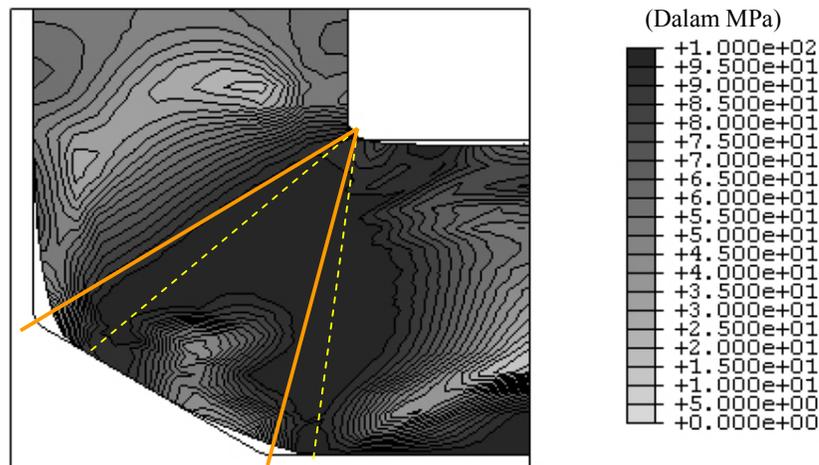
4.2.2 Distribusi Tegangan pada *die* dengan sudut *chamfer*



Gambar 4.14. Distribusi tegangan geser pada daerah *intersection* kasus sudut *intersection* 90° dengan sudut *chamfer* 30°.



Gambar 4.15. Distribusi tegangan geser pada daerah *intersection* kasus sudut *intersection* 90° dengan sudut *chamfer* 45°.

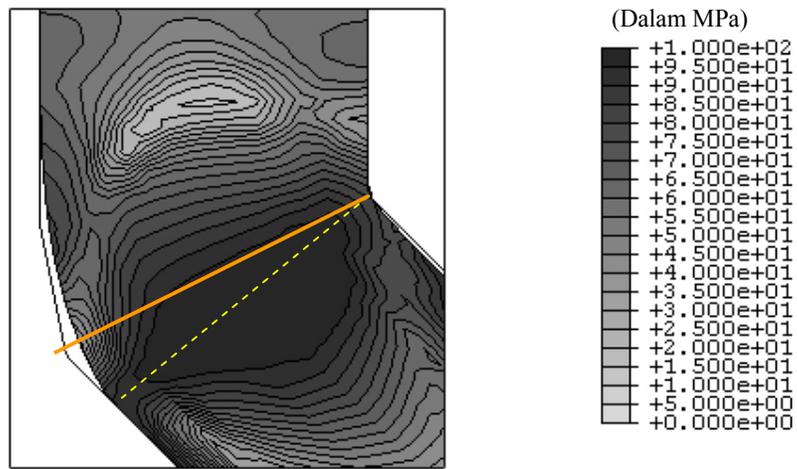


Gambar 4.16. Distribusi tegangan geser pada daerah *intersection* kasus sudut *intersection*  $90^\circ$  dengan sudut *chamfer*  $60^\circ$ .

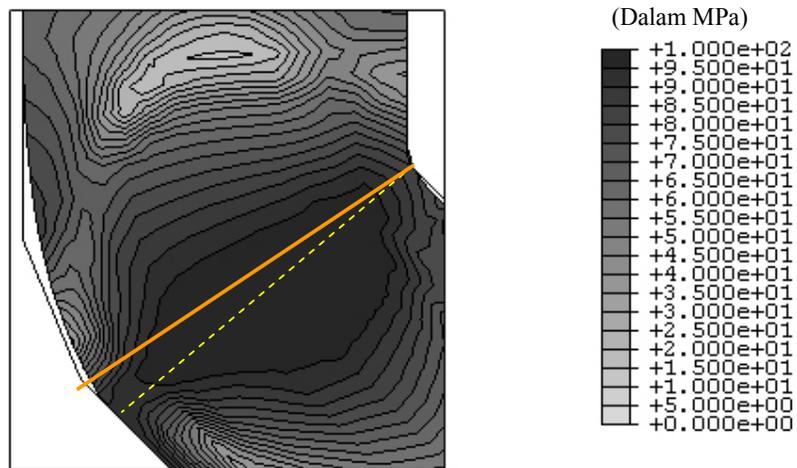
Pada kasus *die*  $90^\circ$  dengan sudut *chamfer*, semakin besar sudut *chamfer* juga menyebabkan rongga antara *die* dan *billet* semakin besar. Sebagaimana penjelasan sebelumnya, semakin besar rongga terjadi, maka konfigurasi bentuk *die* untuk memberikan tegangan geser semakin tidak efektif. Pada kasus ini terlihat material mengalami dua kali tegangan geser pada daerah yang mendekati dinding sebelah kiri. Hal tersebut ditandai dengan bercabangnya daerah dengan tegangan di atas 95 MPa.

Hal tersebut di atas juga berlaku untuk kasus sudut *intersection*  $105^\circ$ . Semakin besar sudut *chamfer*, maka distribusi tegangan dengan besar di atas 95 MPa akan semakin jauh dengan jalur perpotongan *channel*. Namun pada sudut yang lebar, yaitu  $120^\circ$  dan  $135^\circ$ , penambahan sudut *chamfer* tidak mempunyai banyak perbedaan dengan *die* tanpa sudut *chamfer*. Hal ini sangat terlihat pada kasus sudut *intersection*  $135^\circ$ .

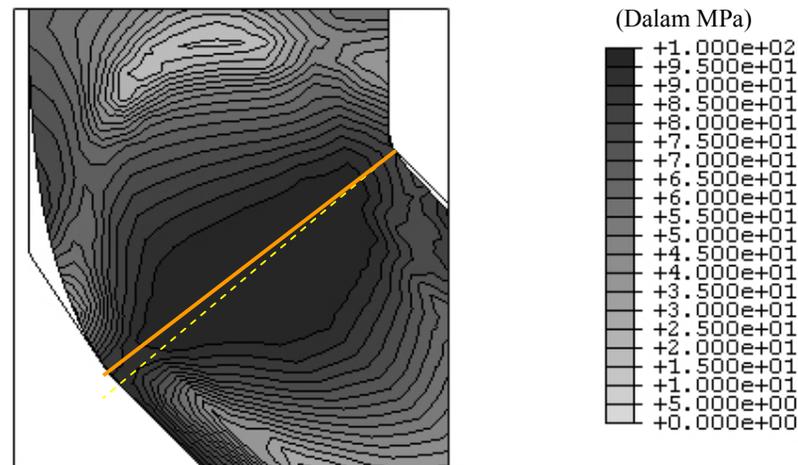
Pada subbab 4.1 hasil dari distribusi tegangan pada kasus  $135^\circ$  berbeda dengan kasus-kasus yang lain. Hal tersebut dapat dijelaskan pada gambar kontur plot tegangan tersebut di bawah:



Gambar 4.17. Distribusi tegangan geser pada daerah *intersection* kasus sudut *intersection* 135° dengan sudut *chamfer* 11°.



Gambar 4.18. Distribusi tegangan geser pada daerah *intersection* kasus sudut *intersection* 135° dengan sudut *chamfer* 22,5°.



Gambar 4.19. Distribusi tegangan geser pada daerah *intersection* kasus sudut *intersection* 135° dengan sudut *chamfer* 34°.

Pada ketiga gambar di atas terlihat bahwa distribusi tegangan pada masing-masing variasi *chamfer* tetap sama karena *billet* tidak menyentuh sama sekali sisi *chamfer*. Terlihat juga bahwa bidang geser yang terjadi pada material posisinya masih tetap. Semakin bertambahnya besar sudut *chamfer*, maka jalur 2 akan semakin mendekati bidang geser material. Hal inilah yang menyebabkan pada grafik jalur 2 kasus sudut *intersection* 135°, semakin besar sudut *chamfer* distribusinya semakin merata.

#### 4.2.3 Gaya tekan *punch*

Gaya tekan *punch* berkaitan erat dengan sudut *intersection*. Semakin kecil sudut *intersection* maka dibutuhkan gaya yang lebih besar untuk bisa menekan *billet* melewati *intersection*. Secara matematis, besar gaya *punch* yang dibutuhkan dapat dihitung menggunakan persamaan (2-12). Besar gaya *punch* yang dibutuhkan untuk kasus sudut *intersection* 120° adalah sebagai berikut:

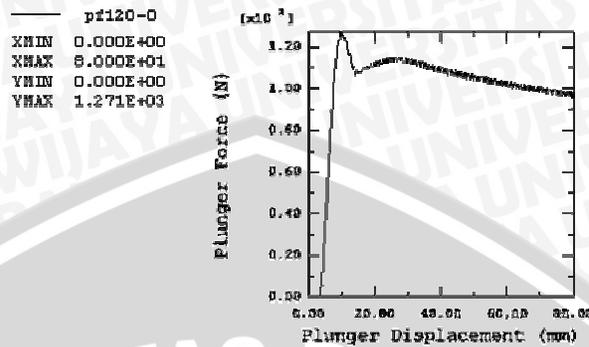
$$F = A \cdot 2 \cdot k \cdot \cot\left(\frac{\Phi}{2}\right)$$

$$F = A \cdot \sigma_y \cdot \cot\left(\frac{\Phi}{2}\right)$$

$$F = 15 \text{mm}^2 \cdot 21 \text{MPa} \cdot \cot\left(\frac{120}{2}\right)$$

$$F = 181,86 \text{Newton}$$

Sedangkan dari hasil simulasi metode elemen hingga didapatkan data sebagai berikut:



Gambar 4.20. history gaya tekan *punch*

Dapat dilihat bahwa perbedaan hasil antara metode matematis dan simulasi metode elemen hingga (Gambar 4.20) tersebut sangat besar. Hal tersebut dikarenakan pada perhitungan matematis, material dianggap plastis sempurna dan tanpa gaya gesek. Material Aluminium 1060 mempunyai daerah plastis yang besar namun mempunyai luluh yang kecil, yaitu sebesar 21MPa. Sedangkan perhitungan dengan menggunakan persamaan (2-13) didasarkan pada besar luluh geser yang besarnya setengah kali luluh pada uji tensile. Pada kenyataannya pada proses ini, setelah melewati luluh material mengalami penguatan regang dan terdapat gaya gesek antara *die* dengan *billet*. Hal inilah yang menyebabkan tingginya perbedaan antara kedua metode tersebut.

Dapat dilihat pada Gambar 4.8 keberadaan sudut *chamfer* sangat efektif dalam mengurangi gaya tekan maksimum *punch* pada sudut *intersection* yang kecil. Hal tersebut dikarenakan pada *die* dengan sudut *chamfer* material ketika melewati *intersection* dibelokkan terlebih dahulu, sehingga gaya awal berkurang. Sedangkan pada sudut *intersection* yang besar keberadaan sudut *chamfer* tidak mempunyai pengaruh pada penurunan gaya tekan *punch*.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi komputer menggunakan *software ABAQUS* untuk memodelkan proses *ECAP* didapatkan kesimpulan sebagai berikut

- Semakin besar sudut *intersection* pada *die* tanpa *chamfer* maka rongga yang terjadi antara *die* dengan *billet* pada daerah *intersection* akan semakin besar. Yang berarti terjadinya bending pada bagian *billet* di dekat rongga akan semakin besar.
- Bidang geser yang seharusnya berada pada garis geser *chamfer* bergeser sehingga garis geser pada material tersebut lebih pendek daripada seharusnya. Hal ini menyebabkan proses *ECAP* kurang efektif.
- Sedangkan pada *die* dengan sudut *chamfer*, semakin besar sudut *chamfer* juga akan menyebabkan rongga antara *die* dengan *billet* semakin besar pada daerah sekitar *intersection*. Pengaruh yang ditimbulkan juga akan sama seperti yang telah dijelaskan di atas.
- Keberadaan sudut *chamfer* pada sudut *intersection* yang kecil akan menurunkan dengan signifikan gaya tekan *punch*, sedangkan pada sudut *intersection* yang besar, pengaruh sudut *chamfer* tidak tampak baik dalam hal distribusi tegangan pada *billet* ataupun gaya tekan *punch*.
- Distribusi tegangan geser paling merata terdapat pada *die* dengan sudut *intersection*  $90^\circ$  tanpa sudut *chamfer*.
- Konfigurasi bentuk *die* dimana dapat mengurangi gaya tekan *punch* tanpa mengurangi secara signifikan efektifitas *die* dalam memberikan tegangan geser adalah *die* bersudut *intersection*  $90^\circ$  dengan sudut *chamfer*  $30^\circ$ .

#### 5.2 Saran

1. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut mengenai pemilihan model material lain untuk mensimulasikan kasus *ECAP* ini sehingga didapatkan prediksi yang lebih akurat.

2. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut pada kasus *ECAP* ber-*chamfer* dengan bentuk geometri *billet* yang berbeda-beda untuk mengurangi distribusi regangan geser yang tidak merata.
3. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut pada kasus *ECAP* ber-*chamfer* dengan menggunakan *back-pressure* untuk mengurangi kemungkinan timbulnya rongga antara *die* dengan *billet*.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## DAFTAR PUSTAKA

- ABAQUS Release 6.6 Documentation*
- Atlas of Stress Strain Curve, 2nd Edition, ASM International*
- Beygelzeimer, Y., 2005. *Grain Refinement versus Void Accumulation During Severe Plastic Deformation of Polycrystal: Mathematical Simulation*. Elsevier. *Mechanics of Material* 37. p753-767.
- Cmcarservice, 2004. *FAQ-Mr. Moly MoS2 Lubricants*, [Http://www.cmcarservice.com](http://www.cmcarservice.com)
- Djaprie, Sriati, 1993. *Metalurgi Mekanik*. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Furukawa, Minoru, et al. 1998. *The Shearing Characteristics Associated With Equal Channel Angular Pressing*. *Material Science and Engineering*. A257. p328-332
- Li, S. et al., 2004. *Finite Element Analysis of the Plastic Deformation Zone and Working Load in Equal Channel Extrusion*. *Material Science and Engineering*. A 382. 217-236
- Nizovtsev, P.N., Smolyakov, A.A., Korshunov, A.I., Solovyev, V.P. 2005. *3d Numerical Simulation of the Ecap Process*. *RAMS e-journal*, Vol. 10, No.5
- Olejnik, L., Rosochowski A., 2005, *Methods of fabricating metals for nano-technology*. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. Vol.53. No. 4.
- Pei-Ling Sun, 2001. *Deformation Structure in Aluminium Processed by Equal Channel Angular Extrusion*. *Material Science and Engineering*, <http://etd.lib.nsysu.edu.tw>.
- Prangnell, P. B., 2001. *The Formation of Submicron and Nanocrystalline Grain Structure by Severe Deformation*. *International Symposium on Material Science*, Denmark.
- Stolyarov, V. V., 2000. *Influence of ECAP routes on the microstructure and properties of pure Ti*. *Materials Science and Engineering* A299. P59-67.
- Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V.. *Bulk Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation Under High Pressure*. *Institute of Physics of Advanced Materials*, Ufa State Aviation Technical University.
- Segal, V.M. 1995, *Mater. Sci. Eng.* A197 (1995) 157
- Weaver, William, Jr, 1993. *Elemen Hingga untuk Analisis Struktur*. Eresco, Bandung

Wen-Hsien Huang. *Microstructural Evolution in Copper Deformed by Equal Channel Angular Extrusion*. Material Science and Engineering, <http://etd.lib.nsysu.edu.tw>.

Wu, Y., Baker, I., 1997. *An Experimental Study of Equal Channel Angular Extrusion*.

Scripta Materialia, Vol. 37, No. 4

Zhernakov, V.S., Budilov, I.N., Raab, G.I., Alexandrov, I.V., Valiev, R.Z. 2005. *A*

*Numerical Modelling and Investigations of Flow Stress and Grain Refinement during ECAP*. Scripta Mater, Vol. 44.

