

repository.ub.ac.id

**SIMULASI TIGA DIMENSI TERHADAP ANALISA  
KEKUATAN *ADVANCED CERAMIC DIE* DAN KARAKTERISTIK  
TRIBOLOGINYA DALAM PROSES *DRY DEEP DRAWING***

**SKRIPSI**

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



**Disusun oleh:**

**AGUNG PUTRO UTOMO  
NIM. 0001060103-62**

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



repository.ub.ac.id

**SIMULASI TIGA DIMENSI TERHADAP ANALISA  
KEKUATAN *ADVANCED CERAMIC DIE* DAN KARAKTERISTIK  
TRIBOLOGINYA DALAM PROSES *DRY DEEP DRAWING***

**SKRIPSI**

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



**Disusun oleh:**

**AGUNG PUTRO UTOMO  
NIM. 0001060103-62**

**DOSEN PEMBIMBING**

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

**NIP. 132 206 466**

**Ir. Tjuk Oerbandono, M.ScE**

**NIP. 132 048 543**



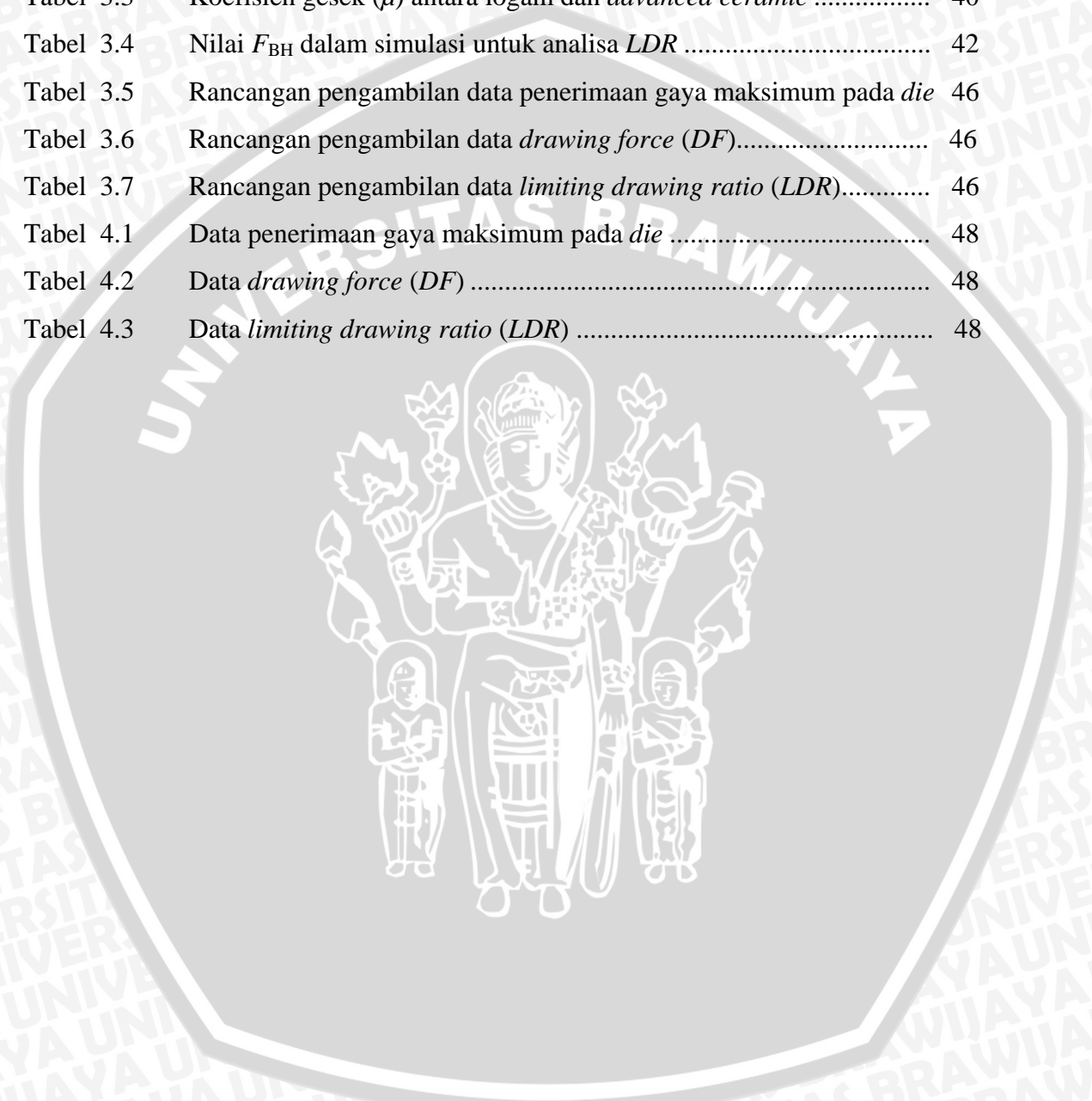
## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	iii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	iv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	v
<b>RINGKASAN</b> .....	vi
 <b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Tujuan Penelitian.....	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
 <b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Penelitian Sebelumnya.....	6
2.2. Proses Pembentukan Logam.....	7
2.3. <i>Deep Drawing</i> .....	10
2.3.1. Definisi <i>Deep Drawing</i> .....	10
2.3.2. Tahapan dan Kondisi Proses <i>Deep Drawing</i> .....	12
2.3.3. Variabel Deformasi dalam <i>Deep Drawing</i> .....	16
2.3.3.1. <i>Drawing Force (DF)</i> .....	17
2.3.3.2. <i>Blankholder Force (F<sub>BH</sub>)</i> .....	19
2.3.3.3. <i>Limiting Drawing Ratio (LDR)</i> .....	19
2.4. <i>Dry Deep Drawing</i> .....	61
2.4.1. Pertimbangan Desain Tribologi.....	10
2.4.1.1. Gesekan.....	22
2.4.1.2. Keausan.....	23
2.4.1.3. Pelumasan.....	25
2.4.2. <i>Dry Deep Drawing</i> dengan <i>Advance Ceramic Die</i> .....	26
2.5. Keramik.....	66
2.5.1. Ikatan Atom Keramik.....	67

2.5.2. Jenis-jenis Keramik.....	67
2.5.2.1. Keramik Tradisional ( <i>Clay Based Ceramics</i> ).....	67
2.5.2.2. Gelas .....	69
2.5.2.3. Bahan Tahan Api ( <i>Refractories</i> ).....	70
2.5.2.4. Keramik Oksida ( <i>Oxide Ceramics</i> ).....	70
2.5.2.5. Keramik Oksida Paduan .....	70
2.5.2.6. Karbida, Nitrida, Borida dan Silika .....	71
2.5.2.7. Karbida, Nitrida, Borida dan Silika .....	71
2.5.3. Pengujian Keramik .....	72
2.6. Hipotesis .....	74
<b>BAB III. METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1. Metode Penelitian .....	75
3.2. Variabel Penelitian.....	75
3.3. Waktu dan Tempat Penelitian.....	76
3.4. Peralatan yang Digunakan .....	76
3.5. Bahan yang Digunakan.....	76
3.6. Bentuk dan Dimensi Benda Uji .....	77
3.7. Skema Instalasi Mesin <i>Drawing</i> .....	79
3.8. Prosedur Penelitian .....	79
3.8.1. Prosedur Umum .....	79
3.8.2. Prosedur Percobaan.....	81
3.8.2.1. Prosedur Persiapan.....	81
3.8.2.2. Prosedur <i>Dry Deep Drawing</i> Kontinyu .....	81
3.8.2.3. Prosedur Pembersihan <i>Die</i> Keramik.....	81
3.9. Rancangan Penelitian.....	82
3.9.1. Pengambilan Data.....	82
3.9.2. Analisa Data Statistik.....	83
3.10. Diagram Alir Penelitian.....	85

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Komposisi baja SPCC.....	36
Tabel 3.2	Variasi diameter <i>blank</i> dalam analisa <i>LDR</i> .....	38
Tabel 3.3	Koefisien gesek ( $\mu$ ) antara logam dan <i>advanced ceramic</i> .....	40
Tabel 3.4	Nilai $F_{BH}$ dalam simulasi untuk analisa <i>LDR</i> .....	42
Tabel 3.5	Rancangan pengambilan data penerimaan gaya maksimum pada <i>die</i>	46
Tabel 3.6	Rancangan pengambilan data <i>drawing force (DF)</i> .....	46
Tabel 3.7	Rancangan pengambilan data <i>limiting drawing ratio (LDR)</i> .....	46
Tabel 4.1	Data penerimaan gaya maksimum pada <i>die</i> .....	48
Tabel 4.2	Data <i>drawing force (DF)</i> .....	48
Tabel 4.3	Data <i>limiting drawing ratio (LDR)</i> .....	48



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Ilustrasi proses <i>deep drawing</i> dan koordinat aksisnya.....	10
Gambar 2.2.	<i>Deep drawing</i> dengan <i>punch</i> , <i>die</i> dan <i>blankholder</i> .....	11
Gambar 2.3.	Kontak awal dalam <i>deep drawing</i> .....	12
Gambar 2.4.	<i>Bending</i> pada permulaan proses <i>deep drawing</i> .....	13
Gambar 2.5.	Langkah pelurusan dalam <i>deep drawing</i> .....	13
Gambar 2.6.	Variasi tegangan kompresi dalam <i>deep drawing</i> .....	15
Gambar 2.7.	Tahap akhir proses <i>drawing</i> .....	15
Gambar 2.8.	Tarikan pada dinding dan bentuk deformasi lainnya pada <i>cup</i> .....	16
Gambar 2.9.	Zona deformasi selama <i>deep drawing</i> .....	16
Gambar 2.10.	Tahapan timbulnya tegangan dalam <i>deep drawing</i> .....	17
Gambar 2.11.	Penentuan <i>LDR</i> dengan metode <i>peak punch force</i> .....	21
Gambar 2.12.	Sifat material yang relevan dengan tribologi.....	22
Gambar 2.13.	Hubungan antara koefisien gesek dan koefisien geser elemen - elemen logam dengan berbagai jenis keramik dalam <i>sliding test</i> didalam vakum.....	26
Gambar 2.14.	Proses analisis elemen hingga.....	32
Gambar 2.15.	Visualisasi program DEFORM <sup>TM</sup> 3D service pack 5.....	33
Gambar 3.1.	Spesifikasi geometri perkakas <i>deep drawing</i> dan <i>blank</i> .....	39
Gambar 3.2.	Perkakas <i>deep drawing</i> dan <i>blank</i> dalam bentuk tiga dimensi .....	39
Gambar 3.3.	Luas area kontak <i>blankholder</i> dan <i>blank</i> (arsir) .....	41
Gambar 3.4.	Visualisasi pemodelan dalam DEFORM <sup>TM</sup> 3D .....	45
Gambar 3.5.	Diagram alir penelitian .....	47
Gambar 4.1.	Grafik penerimaan gaya maksimum pada <i>die</i> .....	49
Gambar 4.2.	Grafik <i>drawing force (DF)</i> .....	51
Gambar 4.3.	Grafik <i>limiting drawing ratio (LDR)</i> .....	52

## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Hal
1.	Visualisasi hasil pemodelan <i>dry deep drawing</i> baja dan <i>alumina</i> dalam analisa kekuatan <i>die</i> dan <i>drawing force (DF)</i> .....	56
2.	Visualisasi hasil pemodelan <i>dry deep drawing</i> baja dan <i>silicon nitride</i> dalam analisa kekuatan <i>die</i> dan <i>drawing force (DF)</i>	57
3.	Visualisasi hasil pemodelan <i>dry deep drawing</i> baja dan <i>silicon carbide</i> dalam analisa kekuatan <i>die</i> dan <i>drawing force (DF)</i>	58
4.	Visualisasi hasil pemodelan <i>dry deep drawing</i> titanium dan <i>alumina</i> dalam analisa kekuatan <i>die</i> dan <i>drawing force (DF)</i>	59
5.	Visualisasi hasil pemodelan <i>dry deep drawing</i> titanium dan <i>silicon nitride</i> dalam analisa kekuatan <i>die</i> dan <i>drawing force (DF)</i>	60
6.	Visualisasi hasil pemodelan <i>dry deep drawing</i> titanium dan <i>silicon carbide</i> dalam analisa kekuatan <i>die</i> dan <i>drawing force (DF)</i>	61

## RINGKASAN

**Agung Putro Utomo, Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2007, *Simulasi Tiga Dimensi Terhadap Analisa Kekuatan Advanced Ceramic Die dan Karakteristik Tribologinya Dalam Proses Dry Deep Drawing*, Dosen Pembimbing : DR Eng. Anindito Purnowidodo, ST, M. Eng dan Ir. Tjuk Oerbandono, M.ScE.**

Kata kunci : Tribologi, *Advanced Ceramic*, *Dry Deep Drawing*, Simulasi.

Pelumas memiliki peran penting dalam proses pembentukan logam guna mengurangi koefisien gesek secara signifikan antara benda kerja dengan *die* atau *punch*. Namun demikian, pembuangan pelumas yang mengandung bahan berbahaya dapat menimbulkan masalah pada lingkungan hidup. Oleh karena itu *dry deep drawing* menjadi salah satu pilihan yang perlu dipertimbangkan untuk mengembangkan proses produksi ramah lingkungan. Akan tetapi proses tersebut sulit diaplikasikan apabila tidak disertai dengan desain *die* yang memenuhi prinsip-prinsip *tribologi* dengan baik. Salah satu metode menjanjikan untuk mewujudkan hal itu adalah menggunakan *advanced ceramic die*. Dan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh S. Kataoka dan rekannya menunjukkan bahwa metode tersebut dapat menjadi alternatif pilihan yang menjanjikan.

Berawal dari eksperimen nyata yang dilakukan oleh S. Kataoka itu, maka dilakukan penelitian dalam sebuah program simulasi tiga dimensi untuk menganalisa kekuatan *advanced ceramic die* dan karakteristik tribologinya. Dalam penelitian ini dipilih tiga jenis *advanced ceramic* sebagai material *die* yang dibandingkan, yaitu *alumina* ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), *silicon nitride* ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) dan *silicon carbide* ( $\text{SiC}$ ). Sedangkan yang digunakan sebagai material logam pembanding adalah baja *cold roll SPCC* dan titanium TYPE-2. Dari simulasi proses *dry deep drawing* yang dilakukan, kekuatan *advanced ceramic die* dianalisa melalui pengamatan terhadap gaya yang diterimanya. Adapun analisa terhadap karakteristik tribologi dilakukan dengan mengamati perbedaan nilai *drawing force* (*DF*) dan nilai *limiting drawing ratio* (*LDR*).

Dari penelitian ini diperoleh hasil bahwa kekuatan *advanced ceramic die* mengalami peningkatan dengan urutan  $\text{Al}_2\text{O}_3 < \text{Si}_3\text{N}_4 < \text{SiC}$ . Dan dalam setiap proses yang dilakukan, *dry deep drawing* terhadap baja memungkinkan untuk diperolehnya kekuatan *die* yang lebih tinggi karena gaya yang diterima cenderung lebih rendah daripada *dry deep drawing* terhadap titanium. Adapun karakteristik tribologi yang dianalisa dari nilai *drawing force* (*DF*) dan *limiting drawing ratio* (*LDR*) mengalami peningkatan dengan urutan  $\text{Al}_2\text{O}_3 < \text{Si}_3\text{N}_4 < \text{SiC}$ . Dan proses *dry deep drawing* terhadap baja memiliki karakteristik tribologi yang lebih baik daripada *dry deep drawing* terhadap titanium karena dibutuhkan *drawing force* (*DF*) yang lebih kecil serta dihasilkan nilai *limiting drawing ratio* (*LDR*) yang lebih tinggi.



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Pelumas memiliki peran penting dalam proses pembentukan logam guna mengurangi koefisien gesek secara signifikan antara benda kerja dengan *die* atau *punch*. Sehingga pelumas dapat berfungsi untuk mengurangi gaya pembentukan, meningkatkan limit pembentukan, mempersingkat proses pembentukan, memperpanjang umur *die* dan *punch* serta menghindari penggoresan dan keausan yang berpengaruh terhadap *finishing* permukaan produk (S. Kataoka, 2004). Namun demikian, pembuangan pelumas yang mengandung bahan berbahaya dapat menimbulkan masalah pada lingkungan hidup. Oleh karena itu pembentukan logam dalam keadaan kering (*dry forming*) menjadi salah satu pilihan yang perlu dipertimbangkan untuk mengembangkan proses produksi ramah lingkungan atau '*green manufacturing technology*' (T. Aizawa, et al, 2006). Akan tetapi proses tersebut sulit diaplikasikan apabila tidak disertai dengan desain *die* yang memenuhi prinsip-prinsip *tribologi* dengan baik, dimana terjadinya gesekan, keausan serta mekanisme pelumasan sesuai dengan yang disyaratkan. Dan salah satu metode menjanjikan untuk mewujudkan hal itu adalah menggunakan *advanced ceramic die*.

Penelitian terhadap penggunaan *advanced ceramic die* pernah dilakukan pada aplikasi *dry deep drawing* oleh S. Kataoka, M. Murakawa, T. Aizawa, dan H. Ike (2004). Mereka mengamati karakteristik tribologi pada penggunaan beberapa jenis *advanced ceramic die* untuk proses *dry deep drawing* terhadap beberapa tipe *sheet* logam yang kemudian dibandingkan dengan penggunaan *die* baja perkakas paduan. Material *advanced ceramic* yang digunakan sebagai *die* antara lain adalah *alumina*, *zirconia*, *silicon nitride* dan *silicon carbide*. Sedangkan *sheet* logam yang digunakan dibagi dalam dua kelompok, yaitu *sheet* logam murni yang bernilai komersil (titanium, tembaga, baja lunak dan aluminium) serta *sheet* logam paduan (*stainless steel* dan baja galvanis).

Pada penelitian tersebut, perilaku gesek antara *die* dan *blank* dievaluasi melalui nilai *limiting draw ratio* (*LDR*), yaitu rasio diameter maksimum *blank* yang dapat dilakukan *deep drawing* terhadap diameter *punch* tanpa mengalami kegagalan. Selain itu, efek terjadinya gesekan juga dievaluasi dengan pengamatan terhadap perubahan *drawing force* (*DF*) dalam percobaan *dry deep drawing* secara terus-menerus pada 100 *blank*.

Dari penelitian dengan material *sheet* logam murni diperoleh kesimpulan bahwa setiap material keramik memiliki kesesuaian tersendiri dengan material *sheet*. Dalam hal ini *die* keramik sangat baik digunakan pada *dry deep drawing sheet* baja lunak dan tembaga murni, serta tidak ada atau sedikit saja peningkatan pada *dry deep drawing sheet* titanium dan aluminium. Disimpulkan pula bahwa *dry deep drawability sheet* logam yang dievaluasi dengan nilai *LDR* berkurang dengan bertambahnya kovalensi material *die* keramik dengan urutan  $LDR(\text{SiC}) > LDR(\text{Si}_3\text{N}_4) > LDR(\text{ZrO}_2) > LDR(\text{Al}_2\text{O}_3)$ . Sedangkan pada penelitian dengan *sheet* logam paduan, dapat diketahui bahwa *dry deep drawing* secara kontinyu sehingga membentuk lapisan adesif oksida pada permukaan *die* sangatlah efektif dalam meningkatkan *dry deep drawability sheet* logam karena mampu menurunkan koefisien geseknya. Terutama ketika digunakan *die alumina* pada *stainless steel* dan *die zirconia* pada baja galvanis (S. Kataoka, et al, 2004).

Hasil penelitian tersebut pada dasarnya dapat membantu kita dalam merumuskan pengetahuan awal mengenai aplikasi *dry deep drawing*. Metode eksperimental nyata yang digunakan dalam penelitian itu pun sangat mendukung diperolehnya hasil memadai dengan tingkat ketelitian tinggi. Hal tersebut dikarenakan proses pembuatan *advanced ceramic* sebagai material *die* dan proses pengujian *dry deep drawing* yang dilakukan mampu memenuhi standar yang disyaratkan sehingga pengamatan terhadap adanya reaksi antar permukaan material dapat teridentifikasi dengan baik. Dan bermula dari ketertarikan terhadap penelitian itu, maka penulis bermaksud untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai aplikasi *dry deep drawing* dengan menggunakan *advanced ceramic die* dalam sebuah program komputer simulasi tiga dimensi.

Material *advanced ceramic die* yang akan digunakan dalam hal ini adalah *alumina* ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), *silicon nitride* ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) dan *silicon carbide* ( $\text{SiC}$ ). Adapun titanium tipe-2 dan baja lunak *cold roll SPCC* yang merupakan logam murni bernilai komersial dipilih sebagai material *blank* karena ketersediaan data koefisien geser dan koefisien geseknya dengan permukaan ketiga *advanced ceramic* diatas. Dikarenakan pula oleh adanya keterbatasan program simulasi yang hanya mampu melakukan analisa terhadap perubahan mekanis dan tidak mampu mengamati terjadinya reaksi kimia, maka penulis akan mengamati adanya perbedaan penerimaan beban yang dialami *advanced ceramic die* dalam proses tersebut. Pada akhirnya diharapkan hasil penelitian itu dapat digunakan untuk memperkirakan sejauh mana kekuatan *advanced ceramic die* dalam aplikasi proses *dry deep drawing* yang dimaksud.

Bahan analisa lain yang juga menjadi perhatian penulis adalah pengamatan terhadap nilai *drawing force* ( $DF$ ) dan *limiting drawing ratio* ( $LDR$ ) yang diperoleh dari program simulasi tiga dimensi proses *dry deep drawing* dengan beberapa material tersebut diatas. Pengamatan terhadap nilai  $DF$  dilakukan untuk mengetahui perbedaan jumlah gaya yang dibutuhkan dalam setiap proses. Sedangkan pengamatan terhadap nilai  $LDR$  dilakukan untuk membandingkan tingkat *deep drawability* material logam dalam proses *dry deep drawing* dengan ketiga *advanced ceramic die*. Pada pembahasan selanjutnya, nilai  $DF$  dan  $LDR$  memiliki peranan besar dalam menentukan karakteristik tribologi proses *dry deep drawing*.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, permasalahan yang akan diteliti dalam skripsi ini antara lain adalah :

1. Bagaimana pengaruh dilakukannya proses *dry deep drawing* terhadap *sheet* logam titanium dan baja terhadap kekuatan *advanced ceramic die alumina*, *silicon nitride*, dan *silicon carbide* serta *drawing force* ( $DF$ ) yang dibutuhkan dalam program simulasi tiga dimensi ?

2. Bagaimana pengaruh dilakukannya proses *dry deep drawing* dengan menggunakan *advanced ceramic die alumina*, *silicon nitride*, dan *silicon carbide* terhadap nilai *limiting drawing ratio (LDR) sheet* logam titanium dan baja dalam program simulasi tiga dimensi ?

### 1.3. Batasan Masalah

Dengan tujuan agar penelitian ini lebih terarah, maka perlu ditetapkan terlebih dahulu batasan-batasan masalah yang meliputi beberapa hal berikut ini :

1. *Software* yang digunakan untuk penggambaran benda kerja dalam penelitian ini adalah AutoCAD 2007.
2. *Software* simulasi tiga dimensi yang digunakan untuk melakukan pemodelan proses *dry deep drawing* adalah DEFORM<sup>TM</sup>3D version 5.0 (service pack 3).
3. Proses *deep drawing* yang dipilih adalah *dry deep drawing cylindrical shape*.
4. *Punch*, *blankholder* dan *advanced ceramic die* dimodelkan sebagai material *rigid*, sedangkan benda kerja dimodelkan sebagai material *plastis*.
5. Semua material pengujian diasumsikan homogen dan isotropis.
6. Kekuatan *advanced ceramic die* dievaluasi dari perbedaan nilai gaya yang diterima *die* dalam masing-masing proses.
7. Karakteristik tribologi *dry deep drawing* dievaluasi dari perbedaan nilai *drawing force (DF)* masing-masing proses dan nilai *limiting drawing ratio (LDR) sheet* logam.
8. Koefisien gesek dianggap konstan pada seluruh permukaan kontak.
9. Tidak membahas perpindahan panas yang mungkin terjadi.
10. Hanya membahas deformasi akhir yang dihasilkan.

### 1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian ini adalah agar diketahui sejauh mana kekuatan *advanced ceramic die alumina*, *silicon nitride*, dan *silicon carbide* dalam proses *dry deep drawing* terhadap *sheet* logam titanium dan baja murni serta karakteristik tribologi proses tersebut yang dievaluasi dari perbedaan *drawing force (DF)* dan nilai *limiting drawing ratio (LDR) sheet* logam.

### 1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat utama yang diharapkan dapat diperoleh dari hasil penelitian ini antara lain adalah :

1. Diperoleh gambaran mengenai proses *dry deep drawing* melalui simulasi program komputer.
2. Diketuainya kemampuan dan kesesuaian *advanced ceramic die* untuk proses *dry deep drawing* dengan metode alternatif yang lebih ekonomis.
3. Dapat menjadi referensi bagi penelitian berikutnya mengenai *dry deep drawing* dengan menggunakan *advanced ceramic die* dan program simulasi tiga dimensi.
4. Dapat memberi sumbangan hasil penelitian bagi teknologi ramah lingkungan.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Penelitian Sebelumnya

S. Kataoka, M. Murakawa, T. Aizawa, H. Ike; 2004; *Tribology of dry deep-drawing of various metal sheets with use of ceramics tools*, mengamati karakteristik tribologi pada penggunaan *die* keramik untuk *dry deep drawing* terhadap beberapa tipe *sheet* yang dibandingkan dengan penggunaan *die* baja perkakas paduan. Material keramik yang digunakan adalah *alumina* ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), *zirconia* ( $\text{ZrO}_2$ ), *silicon nitride* ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) dan *silicon carbide* ( $\text{SiC}$ ). *Sheet* logam yang digunakan pada kelompok pertama dipilih *sheet* logam murni komersil, yaitu titanium, aluminium lunak, baja lunak dan tembaga. Pada kelompok kedua dipilih *sheet* paduan yaitu *stainless steel* dan baja galvanis. Nilai *limiting draw ratio* (*LDR*) digunakan sebagai indikator perilaku gesek. Dan efek terjadinya gesekan juga dievaluasi melalui perubahan *drawing force* (*DF*) pada *dry deep drawing* secara terus menerus terhadap 100 *blank*.

Pada percobaan dengan *sheet* logam murni, disimpulkan bahwa material *die* keramik memiliki kecocokan tersendiri untuk setiap *sheet* logam murni tertentu. *Dry deep-drawability* tinggi dicapai pada baja lunak dan tembaga, dan tidak ada atau sedikit saja peningkatan pada titanium dan aluminium. Dalam hal ini,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  dan  $\text{SiC}$  masih lebih baik digunakan karena *DF*-nya lebih kecil. Setelah dilakukan percobaan dengan *sheet* logam paduan, disimpulkan bahwa efek terbaik *die* keramik ditemui pada percobaan dengan *sheet* galvanis karena mampu dihasilkan *LDR* yang tinggi. Dan efek terbaik *die alumina* ditemui setelah *dry deep drawing* terus menerus pada *sheet stainless steel*, karena dihasilkan nilai *LDR* yang hampir sama dengan menggunakan pelumas.

## 2.2. Pembentukan Logam (*Metal Forming*)

Pembentukan logam (*metal forming*) merupakan sebuah metode manufaktur dimana benda kerja yang ada diubah kedalam bentuk yang berbeda tanpa mengubah massa atau komposisi materialnya. Agar diperoleh pemahaman yang lebih jelas, pembentukan logam memiliki arti yang sama dengan proses *deformasi* atau *deforming* yang termasuk kelompok II dalam klasifikasi proses manufaktur. Dimana proses manufaktur itu sendiri dibedakan kedalam enam kelompok utama sebagaimana klasifikasi dibawah ini (Kurt Lange, 1996) :

**Kelompok I – *Primary Forming***, yaitu proses pembuatan sebuah bentuk awal dari keadaan cair atau gas maupun dari partikel padat yang belum berbentuk, yang berarti menciptakan ikatan antara partikel material.

**Kelompok II – *Deforming***, yaitu proses mengubah bentuk yang telah ada dari sebuah material padat kedalam bentuk yang berbeda tanpa mengubah massa maupun komposisinya, yang berarti mempertahankan ikatan antar partikel material.

**Kelompok III – *Separating***, yaitu proses permesinan terhadap material atau proses pembuangan material, yang berarti merusak ikatan antar partikel material.

**Kelompok IV – *Joining***, yaitu penyatuan benda kerja yang berdiri sendiri agar terpasang, tertutup, terjadi pengisian atau lainnya, yang berarti meningkatkan ikatan antara beberapa benda kerja.

**Kelompok V – *Coating***, yaitu memberikan lapisan tipis terhadap benda kerja, seperti pelapisan seng (*galvanizing*), pengecatan (*painting*), atau pelapisan dengan *foil* plastik, yang berarti menciptakan ikatan antara *substrate* dan *coating*.

**Kelompok VI – *Pengubahan sifat material***, yaitu perubahan sifat material secara sengaja terhadap benda kerja dilakukan untuk mendapatkan karakteristik optimal pada bagian yang diinginkan. Yang termasuk dalam metode ini adalah perubahan orientasi partikel mikro, yang berarti menyusun kembali (*rearranging*), penambahan (*adding*) atau pembuangan (*removing*) partikel.

Metode pembentukan logam sendiri dapat diklasifikasikan berdasarkan pada perbedaan tegangan efektif yang terjadi kedalam lima kelompok. Kemudian klasifikasi berbagai variasi proses yang termasuk didalamnya dibuat berdasarkan pertimbangan gerakan relatif, geometri, serta hubungan antara *tool* dan benda kerja yang digunakan. Kelima metode pembentukan logam tersebut adalah :

- 1. *Compressive forming*** (pembentukan pada kondisi tegangan kompresif)  
Meliputi semua proses deformasi pada material padat dimana keadaan plastisnya sebagian besar diperoleh dari pembebanan kompresi uniaksial atau multiksial (DIN 8583, 1970). Yang termasuk didalamnya antara lain adalah proses *rolling, forging, indenting* dan *extrusion*.
- 2. *Combination tensile & compressive forming*** (pembentukan pada kondisi tegangan kombinasi antara tarik dan kompresi)  
Meliputi semua proses deformasi pada material padat dimana keadaan plastisnya sebagian besar diperoleh dari kombinasi pembebanan tarik dan kompresi uniaksial atau multiaksial (DIN 8584, 1970). Yang termasuk didalamnya antara lain adalah proses *pulling through a die (bar, rod, wire, tube* dan *profile drawing), spinning, deep drawing, flange forming*, dan proses *upset bulging*.
- 3. *Tensile forming*** (pembentukan pada kondisi tegangan tarik)  
Meliputi semua proses deformasi pada material padat dimana keadaan plastisnya sebagian besar diperoleh melalui tegangan tarik uniaksial atau multiaksial (DIN 8585, 1971). Yang termasuk didalamnya antara lain adalah proses *stretching, expanding*, dan *recessing*.
- 4. *Forming by bending*** (pembentukan melalui terjadinya tegangan *bending*)  
Meliputi semua proses deformasi pada material padat dimana keadaan plastisnya sebagian besar diperoleh melalui pembebanan adanya *bending* (DIN 8586, 1970). Yang termasuk didalamnya antara lain adalah proses *bending* dengan gerakan *tool* linier dan *bending* dengan gerakan *tool* berputar seperti pada *roll bending*



##### 5. *Forming by shearing* (pembentukan pada kondisi tegangan geser)

Meliputi semua proses deformasi pada material padat dimana keadaan plastisnya sebagian besar diperoleh melalui adanya pembebanan geser (DIN 8587, 1969). Yang termasuk didalamnya antara lain adalah proses *joggling* dan *twisting*.

Dengan adanya perbedaan antara deformasi yang dilakukan pada temperatur ruangan dan deformasi yang dilakukan pada benda kerja yang diberi perlakuan panas, maka metode pembentukan logam pun dapat dibedakan dalam (DIN 8582, 1971) :

1. Pembentukan setelah perlakuan panas = *hot forming*
2. Pembentukan tanpa perlakuan panas = *cold forming*

Dari kedua metode tersebut, masing-masing dibagi lagi menjadi :

- a. Pembentukan tanpa perubahan terhadap sifat mekanis
- b. Pembentukan dengan perubahan sementara terhadap sifat mekanis
- c. Pembentukan dengan perubahan permanen terhadap sifat mekanis

Dalam industri pembentukan logam, klasifikasi yang dibuat umumnya terdiri dari dua kelompok, yaitu *bulk forming* atau *massive forming* dan *sheet forming*. Klasifikasi tersebut terlepas dari model klasifikasi yang dibuat pada pembahasan diatas. *Bulk forming* merupakan proses pembentukan yang dilakukan pada *bar* atau *casting*, dimana material benda kerja mengalami perpindahan terhadap semua arah dalam ruang dan seringkali terjadi perubahan besar pada potongan melintang serta ketebalan dindingnya. Sedangkan pada proses *sheet forming*, lembaran logam dibentuk menjadi *hollow* dengan ketebalan dinding yang hampir sama seperti ketebalan awalnya (Kurt Lange, 1996).

Berdasarkan informasi diatas, dapat disimpulkan bahwa proses *deep drawing* yang akan menjadi topik utama penelitian ini merupakan jenis proses *sheet metal forming* dengan metode *combination tensile & compressive forming* dan *cold forming* tanpa perubahan sifat mekanis. Oleh karena itu pula, tinjauan pustaka berikutnya akan mengkhhususkan pada permasalahan yang berhubungan dengan proses tersebut.

## 2.3. Deep Drawing

### 2.3.1. Definisi Deep Drawing

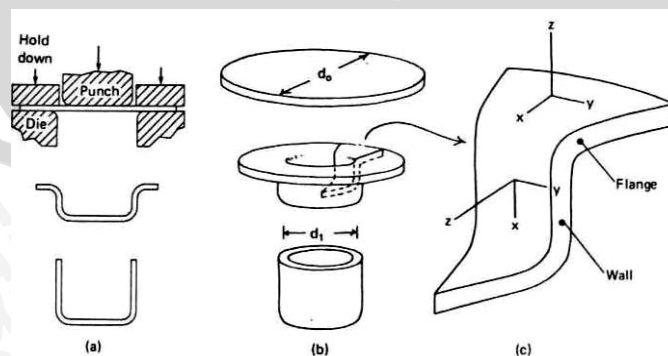
Berdasarkan standarisasi DIN 8584, *deep drawing* dapat didefinisikan sebagaimana dibawah ini (K. Siegert, 1994).

‘*Deep drawing*’ adalah proses pembentukan *sheet* secara tarik dan kompresi (*tensile-compressive sheet forming*) dimana sebuah *blank* dibentuk menjadi *hollow* yang terbuka pada salah sisi atau *hollow* terbuka dibentuk menjadi *hollow* dengan potongan melintang lebih kecil tanpa perubahan berarti pada ketebalan.

‘*Deep drawing in a single draw*’ atau ‘*deep drawing in one step*’ adalah pembentukan terhadap *blank* sehingga menjadi bentuk *hollow* terbuka.

‘*Redrawing*’ adalah pembentukan terhadap *hollow* terbuka sehingga menjadi *hollow* dengan potongan melintang yang lebih kecil.

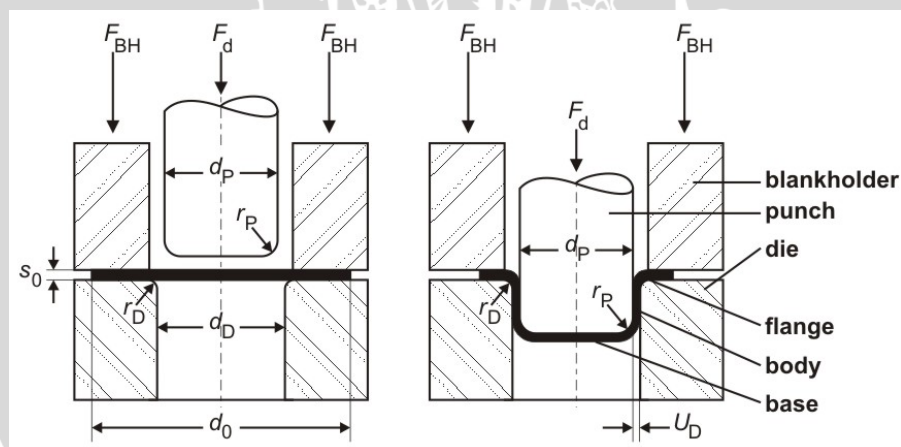
Material *sheet* yang digunakan dalam *deep drawing* disebut sebagai *blank* dan produk yang dihasilkan disebut sebagai *draw piece*. Bentuk akhir *draw piece* bisa berupa lingkaran (*cylindrical shape*), persegi (*box shape*) atau terdiri dari banyak sudut. Proses *deep drawing* merupakan dasar produksi masal dari komponen untuk berbagai aplikasi berbeda, seperti kaleng minuman, selongsong amunisi, *body* mobil, dan lainnya. Selanjutnya, pembahasan mengenai proses *deep drawing* dalam hal ini hanya terbatas pada proses dengan mekanisme *single draw* dimana bentuk *draw piece* yang dihasilkan adalah *cylindrical shape*, atau biasa disebut sebagai *cup*. Gambar dibawah menunjukkan bentuk *blank*, *draw piece* serta koordinat sumbunya.



Gambar 2.1 : Ilustrasi proses *deep drawing* dan koordinat aksisnya

Sumber : K. Lange, 1996 : 287

Menurut standarisasi DIN 8584, metode proses *deep drawing* dapat dibedakan menjadi *deep drawing with tools* dan *deep drawing with active medium*. Dalam hal ini, proses yang akan digunakan mengacu pada metode penggunaan perkakas (*tools*). *Deep drawing* dengan perkakas merupakan sebuah proses dimana *blank* yang ditahan dengan *blankholder* ditekan kedalam *die* menggunakan *punch* untuk membentuk komponen *hollow*. Dengan demikian terdapat tiga perkakas utama yang digunakan, yaitu *punch*, *die*, dan *blankholder*. *Punch* berfungsi meneruskan gaya dari sumber tenaga sehingga menghasilkan *drawing force (DF)* dan pembentukan *draw piece*. *Die* berfungsi sebagai cetakan yang dilalui *blank* dalam pembentukan *draw piece*. Sedangkan *blankholder* berfungsi memberi tekanan pada *flange* untuk mencegah terjadinya *wrinkling* (kerut) selama proses *deep drawing*. Skema bentuk, posisi dan parameter perkakas tersebut ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 : *Deep drawing* dengan *punch*, *die* dan *blankholder*

Sumber : K. Siegert, 1994 : 5

Keterangan gambar 2.2 :

$F_d$  = *drawing force (DF)*

$F_{BH}$  = *blankholder force (BHF)*

$d_p$  = *diameter punch*

$d_D$  = *diameter dalam die*

$d_0$  = *diameter awal blank*

$r_p$  = *radius punch*

$r_D$  = *radius die*

$s_0$  = *ketebalan blank*

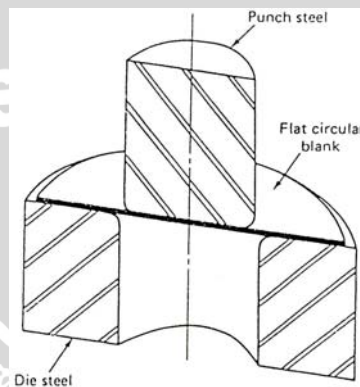
$U_D$  = *die clearence*

### 2.3.2. Tahapan dan Kondisi Proses *Deep Drawing*

Tahapan proses *deep drawing* dan kondisi yang terjadi didalamnya dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

#### 1. Kontak awal (*Initial contact*)

*Blank* ditekan oleh *blankholder* dan *punch* bergerak dari atas ke bawah hingga menyentuh permukaan *blank*, seperti pada gambar 2.3.



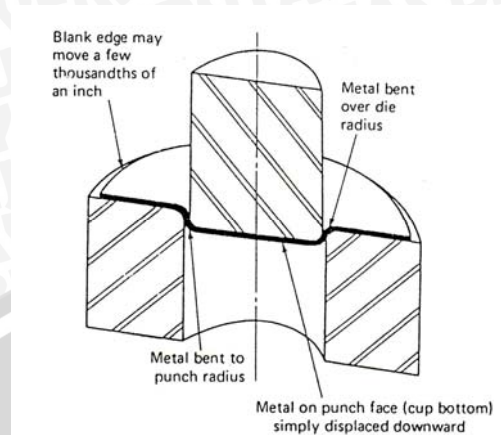
Gambar 2.3 : Kontak awal dalam *deep drawing*

Sumber : Donald F. Eary, 1974 : 101

#### 2. Pembengkokan (*Bending*)

Seiring gerakan awal turunnya *punch* kedalam *die*, *blank* akan dibengkokkan sepanjang radius *punch*, dan bagian yang berdekatan dengannya dibengkokkan melewati radius *die*, seperti oleh gambar 2.4. Permukaan *blank* yang bersentuhan dengan permukaan *punch* turun ke bawah dan menjadi bentuk akhirnya. Tepi *blank* akan bergerak sedikit ke arah *punch*, namun masih dapat diabaikan keberadaannya.

Pada langkah ini, proses yang terjadi hanya merupakan *bending* atau *forming* sederhana, dan proses *drawing* yang sesungguhnya belum berlangsung. Gerakan *punch* selanjutnya dapat menyebabkan *tearing* apabila logam tidak dapat mengalir sehingga kedalaman yang diperoleh pun sangat terbatas. Dan penambahan kedalaman hanya dapat diperoleh dengan melakukan *drawing* terhadap *blank* atau menarik *blank* kedalam sampai dengan daerah luarnya.

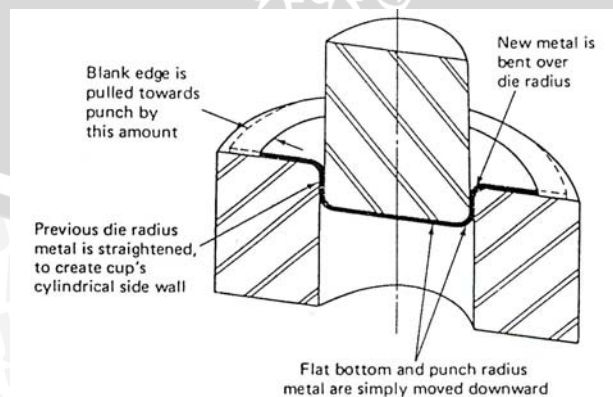


Gambar 2.4 : *Bending pada permulaan proses deep drawing*

Sumber : Donald F. Eary, 1974 : 1012

### 3. Pelurusan (*Straightening*)

Pada proses berikutnya, *punch* akan bergerak kebawah sedikit dari jarak total pergerakannya. Pada langkah ini, dasar *cup* akan bergerak lebih kebawah seperti terlihat pada gambar 2.5. Bagian yang telah dibengkokkan oleh *punch* pun akan bergerak seiring dengan pergerakan dasar *cup*. Kondisi yang terjadi selanjutnya adalah adanya pelurusan kembali bagian logam yang sebelumnya telah dibengkokkan diatas radius *die*. Dan bagian luar *blank* berikutnya mengalami proses pembengkokkan sepanjang radius *die*. Dalam hal ini kita dapat mengetahui fenomena yang tidak biasa terjadi, yaitu bahwa logam yang telah dibengkokkan sepanjang radius *die* harus diluruskan kembali untuk memperoleh dinding *cup* yang silindris.



Gambar 2.5 : Langkah pelurusan dalam *deep drawing*

Sumber : Donald F. Eary, 1974 : 103

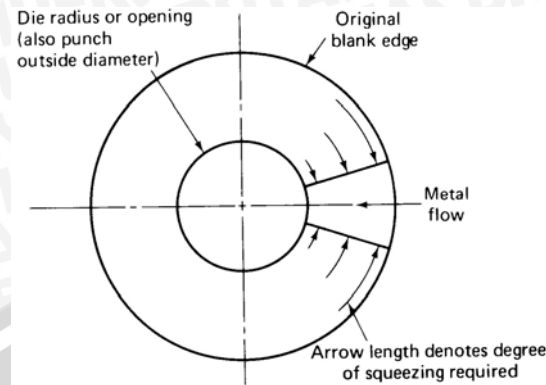
#### 4. Gesekan (*Friction*)

Pada saat yang sama dengan *straightening*, tepi *blank* tertarik ke arah *punch* dalam jumlah yang cukup banyak. Karena terjadinya *pulling* atau *drawing* ke arah *punch* itulah maka proses ini mendapat sebutan *drawing*. Dan selama tepi *blank* bergerak, akan kita temui beberapa kondisi yang berbeda dari sebelumnya. Kondisi pertama adalah adanya gaya gesek statis antara permukaan *blank* dan *die*. Kemudian terjadinya gesekan antara permukaan *blank* dan *blankholder*, dimana gaya normal yang ditimbulkan oleh tekanan *blankholder* menyebabkan adanya gaya gesek statis yang signifikan.

Setelah gesekan statis, yang terjadi kemudian adalah dimulainya gerakan *blank*, dimana keberadaan gaya kontinyu dibutuhkan untuk mengatasi terjadinya gesekan dinamis karena gerakan luncurnya. Gaya yang diperlukan untuk mengatasi gesekan dinamis ini harus lebih kecil dari gaya yang dibutuhkan pada gesekan statis. Gaya *blankholder* tidak boleh terlalu besar agar aliran logam tidak terganggu. Dan umumnya dibutuhkan pelumas atau *drawing compound* untuk mengurangi gesekan pada bagian-bagian tersebut.

#### 5. Kompresi (*Compression*)

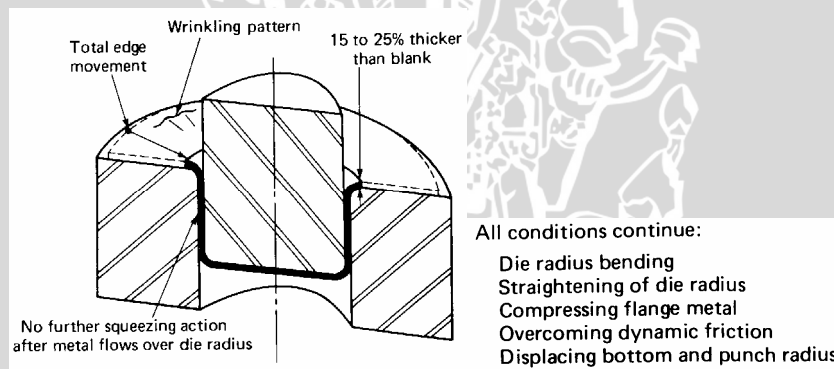
Kondisi lain yang dibutuhkan untuk menarik tepi *blank* kedalam adalah kompresi terhadap *sheet* logam. Selama tepi *blank* bergerak ketengah, maka tepi *blank* akan mengalami pengurangan di sepanjang keliling atau perimeternya. Sehingga semua bagian logam sepanjang tepi *blank* hingga radius *die* akan mengalami penekanan berbeda. Logam *blank* yang lebih dekat dengan radius *die* pada saat permulaan *drawing* akan mengalami penekanan sangat sedikit. Sedangkan jumlah penekanan yang dialami akan meningkat pada logam yang lebih dekat dengan tepi *blank*, seperti ilustrasi pada gambar 2.6. Kompresi yang terjadi pada *sheet* logam tipis biasanya mengakibatkan timbulnya formasi kerutan (*wrinkle*) selama proses *drawing*. Maka dari itu, ditambahkannya *blankholder* bertujuan untuk menekan adanya kerutan yang mungkin terjadi.



Gambar 2.6 : Variasi tegangan kompresi dalam *deep drawing*

Sumber : Donald F. Eary, 1974 : 105

Gerakan *punch* lebih lanjut menghasilkan kondisi yang sama seperti proses sebelumnya hingga *drawing* sampai pada *flange* sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 2.7.

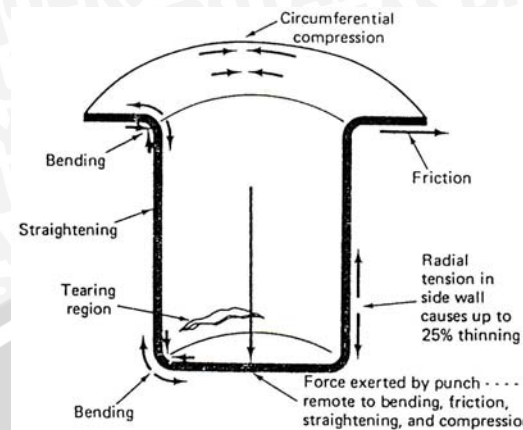


Gambar 2.7 : Tahap akhir proses *drawing*

Sumber : Donald F. Eary, 1974 : 105

## 6. Tarikan (*Tension*)

Semua kondisi pada proses *drawing* timbul karena adanya gaya atau dorongan yang dilakukan *punch* terhadap dasar *cup*. Karena gaya *punch* tersebut, dinding samping *cup* pun mengalami pembengkokan, pelurusan, gesekan serta kompresi. Hal itu menghasilkan tarikan pada bagian dinding seperti ditunjukkan gambar 2.8. Dinding samping yang berdekatan dengan radius *punch* mengalami tegangan tarik paling tinggi dan jauh lebih tipis dibandingkan dengan ketebalan awalnya sehingga sobekan (*tearing*) sangat mudah terjadi pada daerah ini.

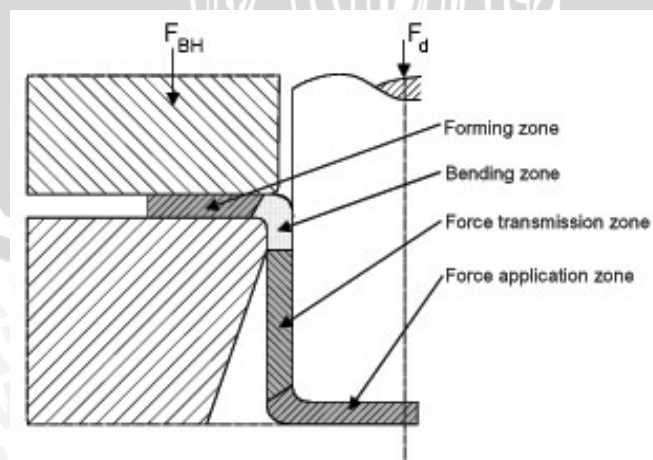


Gambar 2.8 : Tarikan pada dinding dan bentuk deformasi lainnya pada *cup*

Sumber : Donald F. Eary, 1974 : 106

### 2.3.3. Variabel Deformasi dalam *Deep Drawing*

Gaya yang diperlukan untuk menciptakan deformasi dalam proses *deep drawing* tidak secara langsung diaplikasikan terhadap zona deformasi, akan tetapi gaya tersebut diterima oleh *punch* yang kemudian akan mentransmisikannya kepada bagian dasar *cup*, lalu diteruskan oleh dinding *cup* terhadap zona deformasi. Hal inilah yang menjadi sebab terjadinya tegangan tarik yang tinggi pada dinding *cup* (K. Lange, 1996). Oleh karena itu, *cup* yang dibentuk dalam proses *deep drawing* dapat dibagi menjadi empat zona dengan karakteristik deformasi dan keadaan tegangan yang berbeda sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.9 berikut ini (K. Siegert, 1994).



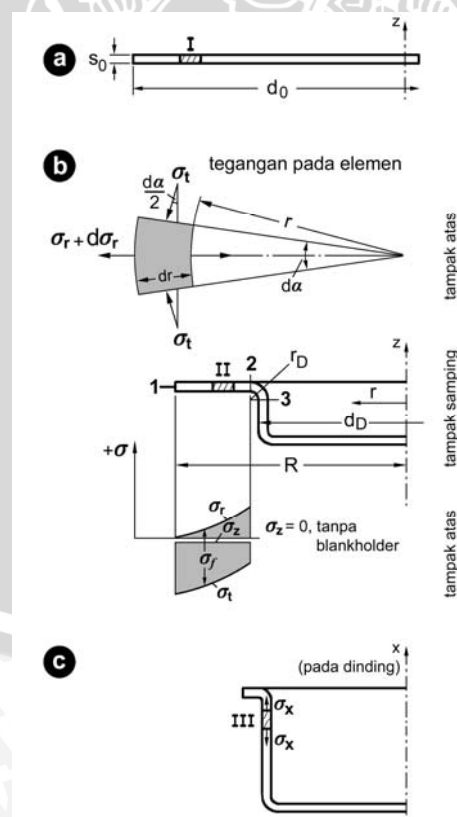
Gambar 2.9 : Zona deformasi selama *deep drawing*

Sumber : K. Siegert, 1994 : 5



### 2.3.3.1. Drawing Force (DF)

*Drawing force (DF)* yang dibutuhkan serta variasinya sepanjang penekanan *punch* dapat ditentukan melalui persamaan teoritis berdasarkan teori plastisitas atau persamaan empiris. Penentuan *DF* secara teoritis melibatkan pengamatan terhadap tegangan yang timbul sebagaimana ditunjukkan gambar 2.10 dimana sebuah elemen kecil bervolume pada posisi I berpindah ke posisi II ketika *punch* bergerak kebawah, dan mencapai posisi III pada dinding *cup*. Sepanjang pergerakan *flange*, elemen itu mengalami tegangan tarik arah radial dan kompresi arah tangensial. Pergerakan tersebut dipengaruhi pula oleh gesekan yang terjadi antara *flange*, *die* dan *blankholder*. Pada pergerakan selanjutnya, *bending* turut berperan ketika elemen berpindah dari *flange* diatas radius *die* menuju dinding *cup*. Dimana pergerakan itu pun dipengaruhi oleh gesekan yang terjadi antara *flange* dan radius *die*. Komponen pergerakan itulah yang pada akhirnya mempengaruhi nilai *DF* dalam *deep drawing*.



Gambar 2.10 : Tahapan timbulnya tegangan dalam *deep drawing*

Sumber : K. Lange, 1996 : 20.5 (edited)

*Drawing force (DF)* yang diperhitungkan adalah gaya maksimum dimana telah terjadi regangan maksimum material yang dapat diketahui melalui ukuran diameter luar *flange* saat pembebanan maksimum,  $d_{F,max}$ . Siebel dan Beiswänger menyatakan bahwa *DF* maksimum hampir tidak dipengaruhi oleh material *blank* dan *drawing ratio* serta terjadi ketika  $d_{F,max} \approx 0,77d_0$ . Dan persamaan berikut ini digunakan untuk menghitung *DF* maksimum,  $F_{d,max}$ , berdasarkan teori dasar yang dibuat Siebel dengan memperhatikan pengaruh dalam tiap tahapan *deep drawing* (K. Lange, 1996).

$$F_{d,max} = \pi \cdot d_m \cdot s_0 \left[ \underbrace{e^{\mu\pi/2}}_C \cdot \underbrace{1,1 \cdot \sigma_{f,m,I}}_A \cdot \ln \frac{d_{F,max}}{d_m} + \underbrace{\frac{2 \cdot \pi \cdot F_{BH}}{\pi \cdot d_{F,max} \cdot s_0}}_B + \underbrace{\sigma_{f,m,II} \cdot \frac{s_0}{2 \cdot r_D}}_D \right] \text{ N} \quad (2.1)$$

dengan :  $d_m$  = diameter rata-rata dinding *cup*  $= d_1 + s_0$

$\sigma_{f,m,I}$  = tegangan aliran rata-rata pada *flange* antara titik 1 dan 2

$\sigma_{f,m,II}$  = tegangan aliran rata-rata diatas radius *die* antara titik 2 dan 3

$F_{BH}$  = gaya *blankholder*

Persamaan tersebut terdiri dari beberapa bagian yang dapat dijabarkan dan dijelaskan sebagai berikut :

*A* : gaya deformasi ideal yang dibutuhkan untuk menarik *flange* ke tengah.

*B* : komponen gaya yang dihasilkan karena gesekan antara *die* dan *flange* serta antara *flange* dan *blankholder*.

*C* : menunjukkan peningkatan gaya karena gesekan pada radius *die*.

*D* : gaya yang dibutuhkan untuk *bending* disekitar radius *die*.

Selain persamaan diatas, terdapat pula beberapa persamaan yang disederhanakan untuk menghitung nilai maksimum *DF*. Dalam sebuah persamaan empiris yang dibuat oleh Siebel dan Beiswänger, *DF* dapat ditentukan dari efisiensi deformasi,  $\eta_{def}$ , dalam bentuk persamaan (K. Lange, 1996) :

$$F_{d,max} = \pi \cdot d_m \cdot s_0 \left[ 1,1 \frac{\sigma_{f,m,I}}{\eta_{def}} \left( \ln \frac{d_0}{d_1} - 0,25 \right) \right] \quad (2.2)$$

Efisiensi deformasi dalam persamaan tersebut ditentukan sebesar  $\eta_{\text{def}} = 0,5 - 0,7$ . Adapun tegangan alir rata-rata pada *flange*,  $\sigma_{f,m,l}$ , dapat diperkirakan dari nilai *ultimate tensile strength*,  $S_u$ , melalui persamaan :

$$\sigma_{f,m,l} = 1,3 S_u \quad (2.3)$$

dengan :  $S_u$  = *ultimate tensile strength (UTS) material blank*

### 2.3.3.2. *Blankholder Force (F<sub>BH</sub>)*

Karena pada *flange* terdapat tegangan kompresif tangensial yang dapat mengakibatkan kerutan (*wrinkle*), sehingga digunakan *blankholder* yang akan memberi tekanan,  $p_{BH}$ , terhadap *flange*. Apabila area kontak antara *blankholder* dan *blank* adalah  $A_{BH}$ , maka gaya yang digunakan oleh *blankholder* adalah :

$$F_{BH} = A_{BH} \cdot p_{BH} \quad (2.4)$$

Tekanan yang diperlukan untuk menekan kerut tergantung pada material *sheet*, ketebalan relatifnya, serta *drawing ratio*. Berdasarkan penelitian Siebel dan Beiswänger, tekanan *blankholder* dapat diperkirakan melalui persamaan berikut (K. Lange, 1996).

$$p_{BH} = 10^{-3} c \left[ (\beta - 1)^3 + \frac{0,005 \cdot d_0}{s_0} \right] S_u \quad (2.5)$$

dengan :  $c$  = faktor yang memiliki nilai antara 2 hingga 3

$\beta$  = *drawing ratio* material

### 2.3.3.3. *Limiting Drawing Ratio (LDR)*

Besarnya deformasi pada komponen hasil *deep drawing* biasanya ditunjukkan pula dengan *drawing ratio*,  $\beta$ , yang didefinisikan sebagai rasio diameter awal *blank*,  $d_0$ , terhadap diameter dalam *cup*  $d_1$  atau diameter *punch*  $d_p$  sebagaimana persamaan dibawah ini.

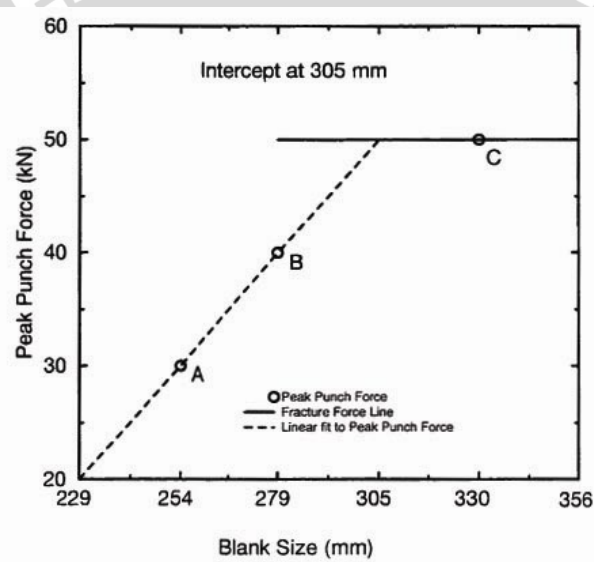
$$\beta = \frac{d_0}{d_1} = \frac{d_0}{d_p} \quad (2.6)$$

Semakin besar *drawing ratio* yang dikehendaki, maka semakin besar pula *DF* yang dibutuhkan. Dan karena *DF* tersebut harus diteruskan oleh dinding *cup*, maka nilai *drawing ratio* tidak boleh melebihi nilai maksimumnya yang disebut *limiting drawing ratio (LDR)*,  $\beta_{\max}$ . *Limiting drawing ratio (LDR)* dapat didefinisikan sebagai rasio diameter maksimum *blank* yang dapat di-*deep drawing* terhadap diameter *punch* tanpa mengalami kegagalan. *LDR* digunakan sebagai ukuran *deep drawability sheet* logam dimana apabila semakin tinggi nilainya maka *deep drawability sheet* itu pun semakin baik. Nilai *LDR* dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain pelumasan, ketebalan *sheet*, *blankholder force*, kecepatan *drawing*, serta radius *die* dan *punch* (E. T. Harpell, 1997).

Berdasarkan kesimpulan Panknin dan Grosch, saat digunakan material isotropis dan perkakas dengan dimensi yang sesuai, *LDR* sangat tergantung pada kondisi gesekan pada *punch* dan *die*. Semakin kecil gesekan pada *die* dan *blankholder* serta semakin besar koefisien gesek pada *punch*, maka lebih besar *LDR* yang dapat dicapai. Ketebalan *sheet* dan diameter *punch* juga mempengaruhi nilai *LDR*. Semakin kecil ketebalan relatif *sheet*, semakin besar loses geseknya dan *LDR* semakin rendah (K. Lange, 1996). Adapun metode eksperimental yang dapat digunakan untuk memprediksi *LDR* adalah dengan metode *peak punch force* (beban maksimum *punch*). Dalam metode tersebut, pada awalnya dilakukan *deep drawing* terhadap beberapa spesimen *blank* dengan diameter berbeda namun tidak menyimpang jauh dari *drawing ratio*-nya.

Kemudian beban maksimum *punch* pada proses tersebut dicatat dalam grafik hubungan antara beban maksimum *punch* dan diameter *blank* serta ditarik regresi liniernya. Selanjutnya dilakukan *deep drawing* terhadap *blank* dengan diameter yang jauh lebih besar dimana diperkirakan akan terjadi *tearing*. Beban maksimum *punch* yang diperoleh saat terjadinya *tearing* dianggap sebagai beban *cracking material* tersebut. Nilai beban maksimum itu dicatat dalam grafik dan ditarik garis lurus horisontal. Garis regresi linier dari spesimen pertama diperpanjang keatas dan dipotongkan dengan garis horisontal dari spesimen *tearing*, seperti ditunjukkan oleh gambar 2.11.

Dari perpotongan kedua garis tersebut akan diperoleh nilai diameter *blank* yang merupakan perkiraan diameter maksimum *blank* yang dapat di-*deep drawing*. Dan dari nilai tersebut dapat dihitung nilai *LDR* yang dihasilkan melalui rasio  $d_0 / d_p$  (E. T. Harpell, 1997). Metode ini pada dasarnya menggunakan metode uji *cup Swift* yang merupakan metode *trial and error*, namun hasilnya dapat dipercaya dan prosesnya dapat diperpendek dengan perkiraan yang tepat terhadap nilai *LDR* material yang pada umumnya mengalami penurunan pada interval 2 sampai 0,2. Dan biasanya, 6 sampai 10 *blank* dengan interval  $d_0 / d_p = 0,02$  dapat memberikan hasil pengujian yang diinginkan (T. Altan, 2005).



Gambar 2.11 : Penentuan *LDR* dengan metode *peak punch force*

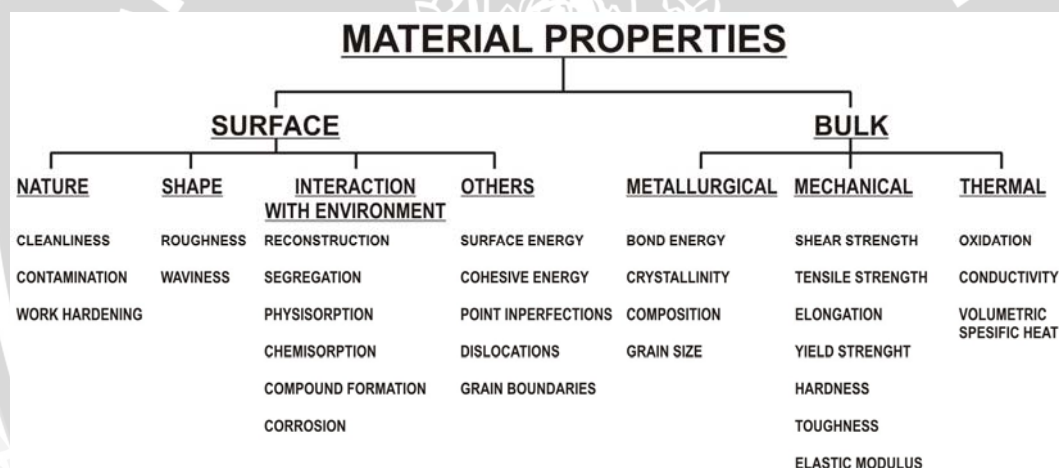
Sumber : E. T. Harpell, 1997 : 101

#### 2.4. Dry Deep Drawing

*Dry deep drawing* adalah proses *deep drawing* yang dilakukan dalam keadaan kering tanpa pelumasan. Proses ini merupakan alternatif pilihan yang dibuat karena banyaknya jumlah pembuangan pelumas yang mengandung bahan-bahan berbahaya sebagai residu dari dilakukannya proses pembentukan dan mengakibatkan gangguan serius terhadap lingkungan hidup. *Dry deep drawing* sendiri pada dasarnya sulit untuk dilakukan apabila tidak disertai desain tribologi yang baik. Oleh karena itu dibutuhkan pemahaman mendalam mengenai prinsip-prinsip tribologi dan aplikasinya.

### 2.4.1. Pertimbangan Desain Tribologi

Konsep tribologi pertama kali diperkenalkan tahun 1966 dalam laporan *United Kingdom Department of Education and Science* dan didefinisikan sebagai ilmu pengetahuan dan teknologi yang mempelajari interaksi permukaan pada gerakan relatif dalam subyek dan aplikasi berkaitan. Hal itu meliputi komponen fisik, kimia, mekanika material, mekanika fluida, transfer panas, metalurgi, pelumasan, serta ketahanan dan performanya dalam interaksi. Bahasa populer tribologi sama dengan pengetahuan mengenai gesekan, keausan serta pelumasan, karena sifat dan akibat dari interaksi yang terjadi diantara kedua permukaan akan mempengaruhi ketiga hal itu (B. Bhushan, 1999). Berikut ini adalah sifat-sifat material yang berperan penting dalam menentukan karakteristik tribologinya.



Gambar 2.12 : Sifat material yang relevan dengan tribologi

Sumber : B. Bhushan, 1996 : 3.2

#### 2.4.1.1. Gesekan

Gesekan adalah resistensi terhadap terjadinya gerakan relatif pada bidang yang bersentuhan. Derajat gesekan ditunjukkan dengan koefisien gesek  $\mu$ , yang merupakan rasio gaya  $F$  yang dibutuhkan untuk memulai atau mempertahankan gerakan relatif terhadap gaya normal  $N$  yang menekan kedua permukaan secara bersamaan. Hal itu dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut :

$$F = \mu \cdot N \quad (2.7)$$

Gesekan yang terjadi dalam kondisi luncuran (*sliding*) disebut sebagai *sliding friction*, sedangkan gesekan yang terjadi dalam kondisi pengerolan (*rolling*) disebut sebagai *rolling friction*. Adapun gesekan yang terjadi dalam proses *deep drawing* dikategorikan sebagai gesekan luncur. Dimana proses terjadinya gesekan luncur berasal dari berbagai efek kombinasi seperti pelekatan (*adhesi*) antar permukaan, penggoresan partikel pengaus dan puncak kekasaran (*asperity*) permukaan yang lebih keras, serta deformasi pada *asperity* tersebut. Kontribusi relatif komponen-komponen itu tergantung pada komposisi material, topografi permukaan, kondisi *interface* luncuran, serta kondisi lingkungannya.

Komponen adhesi gesekan luncur timbul karena adanya pembentukan dan pemutusan ikatan yang terjadi pada *interface*. Ikatan tersebut merupakan hasil dari gaya antar atom pada *interface* yang tergantung pada derajat penetrasi antar *asperity* dan komposisi permukaannya. Apabila kemudian terjadi luncuran, maka gaya gesek dibutuhkan untuk menggeser bidang dengan garis singgung paling rendah pada kontak antar *asperity* tersebut. Jika salah satu permukaan luncur lebih keras daripada yang lain, *asperity* pada permukaan yang lebih keras dapat melakukan penetrasi dan menggores permukaan yang lebih lunak. Dan pada pergerakan tangensial, resistensi terhadap terjadinya penggoresan itu merupakan penambahan terhadap gaya geseknya. Sedangkan komponen deformasi *asperity* terjadi ketika *asperity* dari kedua permukaan bersentuhan satu sama lain. Deformasi tersebut menghasilkan bidang perpindahan yang sejajar dengan arah luncuran, dimana penjumlahan komponen vertikal *asperity* yang bersentuhan sebanding dengan besarnya pembebanan normal (B. Bhushan, 1996).

#### **2.4.1.2. Keausan**

Aus adalah proses kehilangan material pada salah satu atau kedua permukaan padat saat terjadi kontak. Aus terjadi ketika permukaan padat berada dalam gerakan luncuran atau pengerolan yang relatif terhadap satu sama lain. Model keausan yang dominan dalam proses *deep drawing* dan perlu mendapat perhatian utama dalam perencanaan *dry deep drawing* adalah jenis keausan adhesif dan abrasif.

Keausan adhesif diawali dengan pertemuan adhesi pada *interface* yang akan terbentuk apabila material padat bersentuhan pada ukuran atomnya. Saat pembebanan normal diberikan, tekanan lokal pada *asperity* menjadi sangat tinggi. Ketika tidak ada lapisan yang memisahkannya, kedua permukaan tersebut dapat melekat sehingga terjadi *cold welding* pada titik yang bersentuhan. Luncuran berikutnya pun akan menyebabkan titik tersebut bergeser dan titik pertemuan yang baru terbentuk. Proses adhesi dan pematahan pasangan permukaan itulah yang merupakan rantai kejadian sehingga mengakibatkan munculnya partikel pengaus. Adhesi cenderung lebih sering terjadi pada kondisi permukaan yang bersih dengan kemiripan kimia dan struktur pasangan logam yang melakukan luncuran. Dan untuk mencegah keausan, pasangan material harus dipilih agar memiliki kecenderungan minimum membentuk kelarutan padat. Selain itu pada umumnya keausan adhesif dicegah dengan memberikan *coating* berupa material lunak (seperti Pb atau Ag) maupun material keras dari logam, paduan, dan keramik. Dalam kondisi tanpa pelumasan sangat dibutuhkan kondisi permukaan yang lebih keras, dan biasanya digunakan keramik atau *coating* dari bahan tersebut (B. Bhushan, 1996).

Keausan abrasif dapat dijelaskan sebagai kerusakan pada permukaan karena material yang lebih keras. Ada dua situasi umum dimana jenis keausan ini dapat terjadi. Pada kasus pertama, permukaan kerasnya adalah permukaan yang lebih keras dari kedua permukaan yang bergesek (*two-body abrasion*), misalnya pada proses *grinding*, *cutting*, dan permesinan. Pada kasus kedua, permukaan kerasnya adalah benda ketiga, umumnya partikel *grit* atau bahan abrasif, yang berada didalam *interface* dan cukup keras untuk melakukan abrasi pada salah satu atau kedua permukaan tersebut (*three-body abrasion*). Faktor paling penting dalam keausan ini adalah kekerasan material yang menjadi agen pengausnya yang harus memiliki nilai kekerasan kira-kira 1,2 kali lebih besar daripada material kedua. Pada material murni/homogen (seperti keramik, plastik, dan logam), ketahanan terhadap keausan abrasif berbanding lurus dengan kekerasannya (B. Bhushan, 1996).



### 2.4.1.3. Pelumasan

Mekanisme pelumasan dibutuhkan untuk mengurangi terjadinya gesekan dan keausan antara permukaan padat yang memiliki gerakan relatif. Mekanisme pelumasan tersebut dibutuhkan untuk memenuhi beberapa fungsi sebagai berikut :

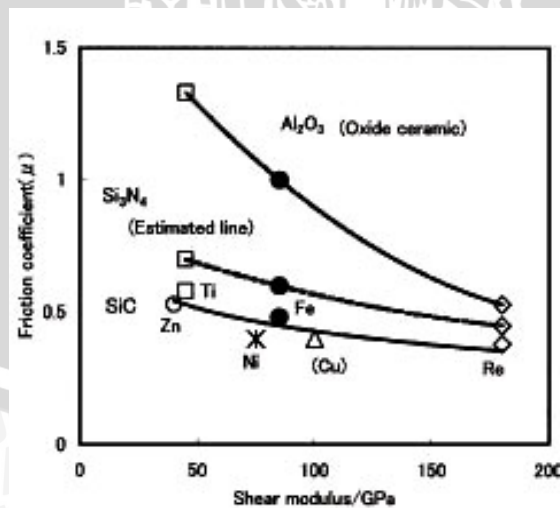
1. Mengurangi gesekan pada saat terjadi gerakan antara permukaan yang bersentuhan.
2. Meminimalisir terjadinya aus pada permukaan yang bersentuhan.
3. Mengendalikan peningkatan suhu karena gesekan dalam batas yang memungkinkan.

Material yang digunakan untuk memenuhi terjadinya pelumasan dapat berupa gas, cair atau padat. Dan mekanisme pelumasan padat yang menjadi acuan utama dalam proses *dry deep drawing* dapat diperoleh dari pelumasan padat oleh permukaan material itu sendiri (*self-lubricating solid*) atau dengan memasukkan material padat yang memiliki kekuatan geser rendah dan/atau ketahanan aus tinggi diantara permukaan yang bersentuhan seperti pelumas padat dan *coating*. Sejumlah material yang dapat melakukan *self-lubricating* meliputi logam ferro, logam non-ferro dan paduannya, keramik dan *cermet*, bahan anorganik lunak non-logam, dan polimer. Selain dapat digunakan langsung sebagai material *self-lubricating*, umumnya material tersebut juga biasa digunakan sebagai *coating*.

Pada permukaan logam ferro seperti baja terdapat *iron oxide* lunak yang mudah berdeformasi dan berperan sebagai pelumas. Beberapa logam non-ferro (indium, thallium, timbal, timah, kadmium, barium, dan logam mulia) dan paduannya bersifat lunak serta memiliki kekuatan geser rendah. Keramik seperti *oxide*, *carbide*, *nitride*, *boride*, dan *silicide*, merupakan material dengan ketahanan aus yang sangat baik ketika digunakan pada berbagai aplikasi tribologi karena kekerasannya yang sangat tinggi. Logam lunak anorganik seperti molibdenum disulfid ( $\text{MoS}_2$ ), grafit, *talca*, dan garam anorganik juga memiliki kekuatan geser rendah. Beberapa polimer memiliki sifat gesek dan aus yang tidak ditemui pada kelompok material lain. Polimer yang biasa digunakan sebagai material *self-lubricating* adalah PTFE, poliamid, dan polietilen (B. Bhushan, 1996).

#### 2.4.2. Dry Deep Drawing dengan Advance Ceramic Die

Berdasarkan pada pengetahuan mengenai prinsip-prinsip tribologi diatas, pembahasan berikut ini mengkhususkan pada penggunaan keramik sebagai material *die* dalam proses *dry deep drawing*. Karena pada kontak antar logam pelekatan aus dapat terjadi dengan mudah pada keadaan kering, maka lapisan keramik diperlukan di atas *die* bermaterial logam atau harus digunakan *die* yang dominan mengandung keramik. Ketika keramik mengalami kontak dengan logam pada kondisi tak berpelumas, gaya ikat yang kuat dapat berkembang diantara kedua material. Ikatan antar permukaan yang kuat tersebut berpengaruh pada terjadinya keausan adhesif. Dimana pelekatan serta gesekan pada logam berhubungan erat dengan koefisien geser serta tergantung pada konfigurasi elektronnya. Gambar 2.13 meringkas hubungan koefisien gesek dengan peningkatan koefisien geser logam pada berbagai jenis material *die* keramik. Koefisien gesek ( $\mu$ ) bertambah dengan meningkatnya kovalensi keramik untuk berbagai jenis logam dengan urutan  $\mu(\text{SiC}) < \mu(\text{Si}_3\text{N}_4) < \mu(\text{Al}_2\text{O}_3)$ . Dan berdasarkan pemahaman bahwa tingkat penggoresan akan semakin tinggi dengan bertambahnya koefisien gesek, maka diperkirakan nilai *LDR* akan berkurang dan *DF* bertambah dalam urutan tersebut (S. Kataoka, 2004).



Gambar 2.13 : Hubungan antara koefisien gesek dan koefisien geser elemen-elemen logam dengan berbagai jenis keramik dalam *sliding test* didalam vakum.

Sumber : S. Kataoka, et al, 2004 : 583

Namun demikian meski material *die* yang digunakan sama, koefisien gesek sangat tergantung pada koefisien geser *sheet* logam dalam *dry deep-drawing*. Karena  $\mu(\text{Ti}) > \mu(\text{Fe}) > \mu(\text{Cu})$  pada *die* SiC, maka dapat diperkirakan bahwa *dry deep-drawability* sangat buruk untuk *sheet* Ti dengan *die* SiC, normal untuk *sheet* baja dan lebih baik lagi untuk *sheet* tembaga dengan material *die* SiC yang sama. Pada akhirnya, pengetahuan dan kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian S. Kataoka dan rekannya pun sangat bermanfaat dalam merumuskan penelitian *dry deep drawing* yang akan dilakukan.

### 2.4.3. *Advanced Ceramic*

Keramik adalah material anorganik non-logam yang biasanya mengandung elemen logam dan non-logam terikat bersamaan, terutama dalam ikatan ionik dan/atau kovalen. Keramik dapat dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu *traditional ceramics* dan *advanced ceramics*. *Traditional ceramics* bukan hanya meliputi tembikar, ubin, peralatan makan, dan *sanitaryware*, namun juga termasuk didalamnya *structural clay product*, *refractory*, *glaze* (glasir), enamel serta *technical whiteware* yang mencakup *earthenware*, *stoneware*, serta *china* dan porselen. Sedangkan *advanced ceramics* (*high-technology ceramics* atau *fine ceramics*) dibuat dari bahan berupa serbuk murni dan homogen dengan ukuran terkontrol yang dirancang agar memiliki level sangat tinggi dalam karakteristik mekanis, optik, termal maupun sifat lainnya. Biasanya material tersebut memiliki tingkat kekuatan dan kekakuan tinggi serta kelembaman kimiawi.

*Advanced ceramics* pada umumnya berupa *oxide*, *nitride* atau *carbide* yang berada dalam struktur *monolithic* atau diperkuat dengan material tertentu dan/atau material berserat. *Advanced ceramic* memiliki variasi yang jauh lebih banyak dan tanpa standarisasi bila dibandingkan dengan logam, dimana material yang dihasilkan oleh industri manufaktur berbeda akan memiliki sifat yang berbeda pula (F. Kreith, 1999). Berdasarkan pada aplikasinya, *advanced ceramic* dapat dibedakan menjadi : *structural ceramic*, *electronic and magnetic ceramic*, serta *optical ceramic*.

*Structural advanced ceramic* dipakai pada kondisi dibawah pembebanan (*load-bearing situations*) dimana karakteristik materialnya memiliki kekuatan pada kondisi temperatur tinggi (lebih dari 1400°C), kekakuan, ketahanan mulur, ketahanan korosi dan oksidasi, serta idealnya juga memiliki toleransi kerusakan atau keuletan. Kesulitan umum dengan digunakannya *advanced ceramic* dalam aplikasi struktur adalah ketangguhan patahnya yang rendah (*low fracture toughness*) bila dibandingkan dengan logam.

#### 2.4.3.1. *Advanced Ceramic Alumina*

Bubuk *alumina* atau *aluminum oxide* yang digunakan sebagai *advanced ceramic* dapat berupa butiran material putih (seperti garam dapur) atau bubuk putih yang sangat halus dan padat, tergantung pada tipe dan metode pemrosesannya. Nama kimia *alumina* adalah *aluminum tri-oxide* dengan rumus kimia  $Al_2O_3$ . Terdapat tiga tipe umum bubuk *alumina*, yaitu *hydrated alumina* ( $Al_2O_3$  65,39%), *calcined alumina* ( $Al_2O_3$  99,70%) dan *tabular alumina* ( $Al_2O_3$  100,00%) (Richard Willis, 2003). *Advanced ceramic alumina* memiliki kombinasi sifat mekanis dan elektrik yang sangat bagus dan dapat digunakan dalam banyak aplikasi melalui bermacam metode pemrosesan dan permesinan. *Advanced ceramic* jenis ini juga dapat digabungkan dengan logam atau material *advanced ceramic* lainnya dalam proses *metallising* atau *brazing*.

Sifat – sifat umum *advanced ceramic alumina* antara lain :

1. Memiliki kekuatan dan kekakuan yang baik.
2. Memiliki kekerasan tinggi dan ketahanan aus yang baik.
3. Memiliki ketahanan korosi yang baik.
4. Memiliki stabilitas termal yang baik.
5. Memiliki sifat dielektris yang sangat baik.

Aplikasi umum *advanced ceramic alumina* antara lain :

*Seal rings, laser tubes, ballistic armour, electrical insulators, threadguides, medical prostheses, electronic substrates, thermocouple tubes, grinding media, wear components* (Morgan AdvancedCeramic, 2007).

#### 2.4.3.2. *Advanced Ceramic Silicon Nitride*

*Advanced ceramic silicon nitride* ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) memiliki kekuatan yang baik dalam temperatur tinggi serta ketahanan mulur dan oksidasi. Secara umum, koefisien ekspansi termalnya yang rendah memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap kejutan termal bila dibandingkan dengan material *ceramic* lainnya. *Advanced ceramic silicon nitride* dapat diproduksi dalam tiga tipe utama, yaitu : *Reaction Bonded Silicon Nitride* (RBSN), *Hot Pressed Silicon Nitride* (HPSN) and *Sintered Silicon Nitride* (SSN). RBSN dibuat melalui reaksi langsung antara cetakan bubuk *silicon* dengan nitrogen. Produk yang dihasilkan dari proses RBSN relatif memiliki tingkat densitas rendah bila dibandingkan dengan produk HPSN dan SSN, namun demikian dalam proses tersebut hanya terjadi sedikit sekali perubahan volume sehingga mampu dihasilkan bentuk yang lebih presisi. Adapun material HPSN dan SSN dibuat dengan bantuan proses *sintering* sehingga memiliki karakteristik fisik yang lebih baik untuk digunakan dalam aplikasi yang lebih luas (Morgan AdvancedCeramic, 2007).

Sifat – sifat umum *advanced ceramic silicon nitride* antara lain :

1. Memiliki ketahanan yang baik terhadap kejutan termal.
2. Memiliki kekuatan yang baik dalam temperatur tinggi.
3. Memiliki ketahanan mulur yang baik.
4. Memiliki tingkat densitas rendah.
5. Memiliki ketahanan patah yang tinggi.
6. Memiliki kekerasan tinggi dan ketahanan aus yang baik.
7. Memiliki resistivitas elektrik.
8. Memiliki ketahanan oksidasi yang baik dan tidak lengket dengan logam lebur.
9. Memiliki ketahanan kimiawi yang baik.

Aplikasi umum *advanced ceramic silicon nitride* antara lain :

*Bearing balls and rollers, cutting tools, valves, turbocharger rotors for engines, turbine blades, glow plugs, molten metal handling, thermocouple sheaths, welding jigs and fixtures, welding nozzles* (Morgan AdvancedCeramic, 2007).

#### 2.4.3.3. *Advanced Ceramic Silicon Carbide*

*Advanced ceramic silicon carbide* (SiC) merupakan material dengan ketahanan aus yang sangat tinggi dan juga memiliki sifat mekanis yang sangat baik, termasuk kekuatan yang baik dalam kondisi temperatur tinggi serta ketahanan terhadap kejutan termal. SiC sebagai keramik teknik (*technical ceramic*) dapat diproduksi melalui dua cara, yaitu *reaction bonded* dan *sintering*. *Reaction bonded SiC* dibuat dengan menginfiltrasikan cairan *silicon* kedalam hasil cetakan yang merupakan campuran antara SiC dan Carbon. Sedangkan SiC hasil *sintering* diproduksi dari bubuk SiC murni dalam proses *sintering non-oxide*. Selanjutnya digunakan proses pembentukan keramik secara konvensional dan proses *sintering* terhadap material tersebut dalam ruang hampa udara pada temperatur lebih dari 2000°C (Morgan AdvancedCeramic, 2007).

Sifat – sifat umum *advanced ceramic silicon carbide* antara lain :

1. Memiliki tingkat densitas rendah.
2. Memiliki kekuatan tinggi.
3. Memiliki kekuatan yang baik dalam temperatur tinggi (*reaction bonded SiC*).
4. Memiliki ketahanan terhadap oksidasi (*reaction bonded SiC*).
5. Memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap kejutan termal.
6. Memiliki kekerasan tinggi dan ketahanan aus yang baik.
7. Memiliki ketahanan kimiawi yang sangat baik.
8. Memiliki koefisien ekspansi termal rendah dan konduktivitas termal tinggi.
9. Memiliki konduktivitas termal yang baik.

Aplikasi umum *advanced ceramic silicon carbide* antara lain :

*Fixed and moving turbine components, seals, bearings, pump vanes, ball valve parts, wear plates, kiln furniture, heat exchangers, semiconductor wafer processing equipment* (Morgan AdvancedCeramic, 2007).

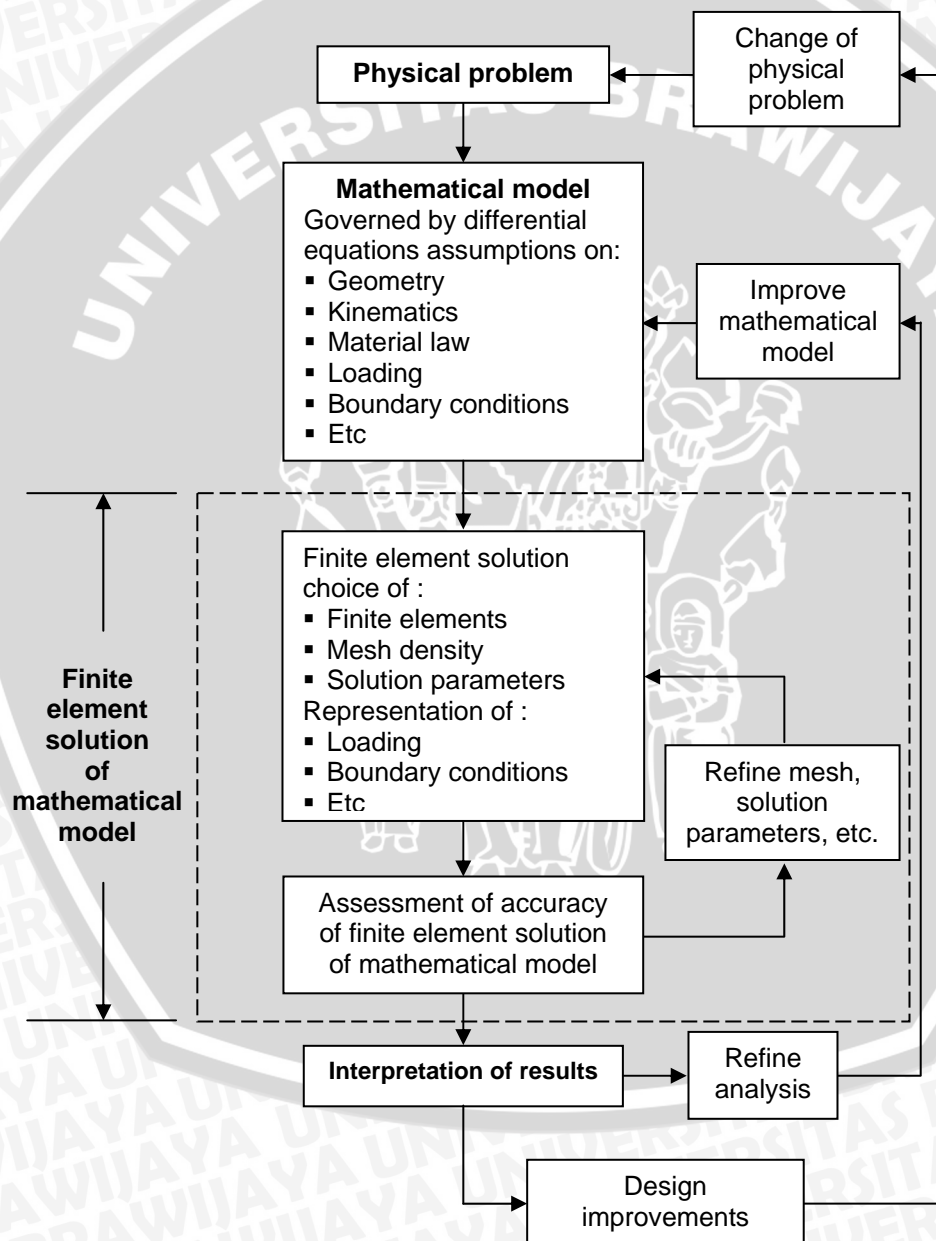
## 2.5. Metode Elemen Hingga

Dalam setiap analisis selalu dipilih sebuah model matematis dari permasalahan fisik yang dihadapi kemudian menyelesaikannya. Metode elemen hingga digunakan untuk menyelesaikan model matematis yang sangat kompleks dalam analisa dan desain rekayasa (*engineering*). Namun sangat penting untuk disadari bahwa penyelesaian elemen hingga tidak dapat memberi informasi yang lebih banyak daripada informasi yang telah diperoleh dari model matematis yang digunakan. Gambar 2.14 menjelaskan secara garis besar proses analisis elemen hingga secara lengkap.

Pada umumnya penyelesaian fisik melibatkan sebuah struktur aktual atau komponen yang diberi beban tertentu. Penyelesaian masalah fisik tersebut menjadi sebuah model matematis membutuhkan asumsi tertentu yang mengarah pada persamaan diferensial. Dan analisis elemen hingga menyelesaikan model matematis tersebut. Karena teknik penyelesaian elemen hingga merupakan sebuah proses numerik, maka sangat penting untuk menjaga keakuratan penyelesaian itu. Jika kriteria akurasi tidak terpenuhi, maka penyelesaian numerik (misalnya : elemen hingga) harus diulang kembali dengan parameter penyelesaian yang lebih baik (seperti *mesh* yang lebih halus) hingga akurasi yang cukup dapat dicapai.

Sebagaimana diketahui bahwa metode elemen hingga hanya menyelesaikan model matematis yang terpilih dan semua asumsi dalam pemodelan tersebut akan direfleksikan dalam respon yang terprediksi. Maka pemilihan model matematis yang sesuai merupakan hal yang sangat penting dan merepresentasikan sepenuhnya persoalan fisik yang diperoleh dari hasil analisis. Oleh karena itu, langkah kunci dalam analisis *engineering* adalah memilih model matematis yang sesuai. Model matematis tersebut dipilih berdasarkan fenomena apa yang akan diprediksi, dan pada umumnya sangat penting untuk memilih model matematis yang terpercaya (*reliable*) dan efektif dalam memprediksi penyelesaian yang diinginkan.

Untuk menentukan bahwa model yang digunakan terpercaya dan efektif maka digunakan model matematis sangat komprehensif (*very-comprehensive mathematical method*) dari permasalahan fisik yang diteliti serta mengukur respon dari model yang kita pilih dengan respon yang dihasilkan model tersebut. Secara umum, *very-comprehensive mathematical method* merupakan sebuah deskripsi tiga dimensi penuh yang juga mengikutsertakan efek-efek non-linier.



Gambar 2.14 : Proses analisis elemen hingga

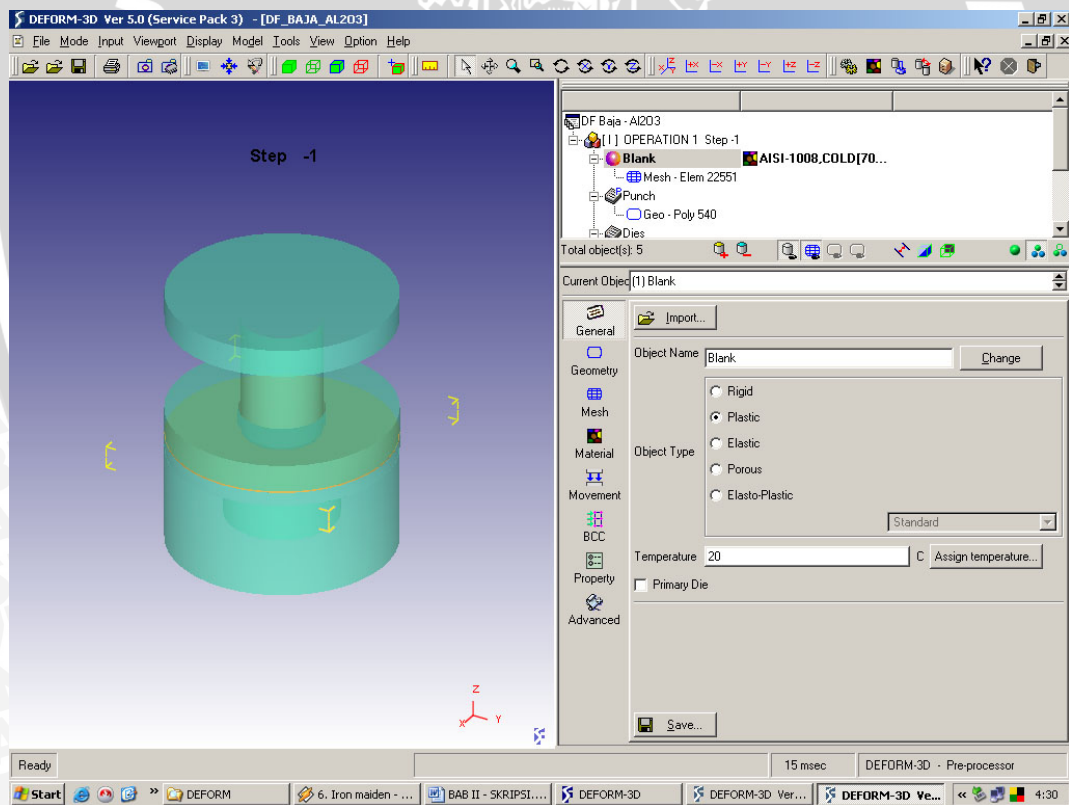
Sumber : Klaus-Jurgen Bathe, 1996





## 2.6. Program Simulasi DEFORM™3D

Dalam penelitian ini digunakan metode simulasi dengan memakai software DEFORM™3D service pack 5. DEFORM™3D merupakan software simulasi berbasis metode elemen hingga yang didesain untuk menganalisis bermacam-macam proses *forming* dan *heat treatment* yang digunakan dalam pembentukan logam dan industri terkait. DEFORM dibuat khusus untuk memodelkan deformasi, dengan proses analisis dan persiapan data yang mudah maka fokus akan tertuju pada proses pembentukan. Uraian lebih lengkap mengenai fasilitas yang tersedia dalam program ini akan dijelaskan lebih lanjut pada bab III mengenai metode penelitian. Adapun visualisasi program DEFORM™3D ditunjukkan pada gambar 2.15 dibawah ini.

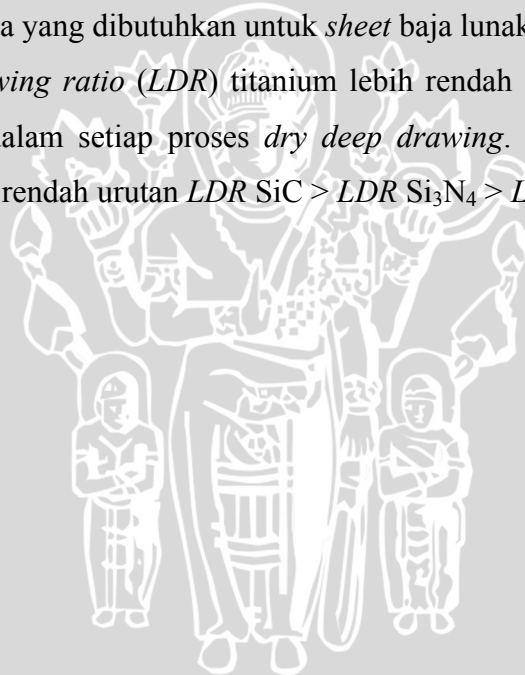


Gambar 2.15 : Visualisasi program DEFORM™3D service pack 5

## 2.7. Hipotesis

Beberapa hipotesis yang dapat diambil sebagai langkah awal pemahaman terhadap tinjauan pustaka yang telah dilakukan adalah :

1. Kekuatan *die* semakin rendah dengan urutan  $\text{SiC} > \text{Si}_3\text{N}_4 > \text{Al}_2\text{O}_3$ . Dan kekuatan *die* semakin rendah ketika digunakan dalam proses *dry deep drawing* terhadap *sheet* titanium dibandingkan terhadap *sheet* baja lunak.
2. Nilai *drawing force* (*DF*) yang dibutuhkan semakin tinggi dengan urutan  $DF \text{SiC} < DF \text{Si}_3\text{N}_4 < DF \text{Al}_2\text{O}_3$  karena semakin tingginya nilai koefisien gesek pasangan logam dan permukaan *advanced ceramic*. Dan *drawing force* (*DF*) yang dibutuhkan dalam proses *dry deep drawing* pada *sheet* titanium lebih besar daripada yang dibutuhkan untuk *sheet* baja lunak.
3. Nilai *limiting drawing ratio* (*LDR*) titanium lebih rendah dibandingkan nilai *LDR* baja lunak dalam setiap proses *dry deep drawing*. Namun nilai *LDR* keduanya semakin rendah urutan  $LDR \text{SiC} > LDR \text{Si}_3\text{N}_4 > LDR \text{Al}_2\text{O}_3$ .



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental semu (*quas experimental research*). Metode ini bertujuan untuk memperoleh informasi yang merupakan perkiraan bagi informasi yang dapat diperoleh dari eksperimen nyata karena variabel tertentu yang tidak relevan tidak dapat dikontrol. Dan dalam hal ini penulis berusaha agar dapat menerapkan prosedur penelitian sedekat mungkin dengan metode eksperimental nyata. Eksperimen dilakukan dengan simulasi program komputer tiga dimensi yang memodelkan proses *dry deep drawing* terhadap *sheet* logam titanium dan baja lunak dengan menggunakan *advanced ceramic alumina*, *silicon nitride* dan *silicon carbide* sebagai material *die*.

### 3.2. Variabel Penelitian

#### 3.2.1. Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan sebelum penelitian.

1. Material *sheet* logam.
2. Material *advanced ceramic die*.

#### 3.2.2. Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung pada variabel bebas.

1. Kekuatan *advanced ceramic die*.
2. *Limiting Drawing Ratio (LDR)*.
3. *Drawing Force (DF)*.

#### 3.2.3. Variabel kendali

1. Tebal *blank* ( $s_0$ ) dan diameter *blank* ( $d_0$ ).
2. Radius *die* ( $r_D$ ) dan radius *punch* ( $r_P$ ).
3. Diameter *die* ( $d_D$ ) dan diameter *punch* ( $d_P$ ).
4. Kecepatan *drawing* ( $v$ ), koefisien gesek ( $\mu$ ) dan gaya *blankholder* ( $F_{BH}$ ).

### 3.3. Spesifikasi Material

#### 3.3.1. Material Blank

Material pertama yang digunakan untuk memodelkan *blank* adalah *sheet* baja lunak *cold roll* tipe JIS G3141(96) SPCC atau setara dengan *sheet* baja AISI 1008 yang memiliki spesifikasi sebagai berikut (MatWeb.com, 2007) :

- Komposisi material :

Tabel 3.1. Komposisi baja SPCC

Komponen	Wt.%
C	Max 0,1
Fe	99,31 – 99,7
Mn	0,3 – 0,5
P	Max 0,4
S	Max 0,05

Sumber : MatWeb.com, 2007

- *Tensile Strength, Ultimate* = 650 Mpa
- *Elongation at break* = 42 – 48 %
- *Modulus of Elasticity* = 206 Gpa
- *Bulk Modulus* = 140 Gpa
- *Shear Modulus* = 80 GPa
- *Poisson's Ratio* = 0,29
- *Density* = 7,872 g/cc

Material kedua yang digunakan untuk memodelkan *blank* adalah titanium 'murni' TYPE-2 yang memiliki spesifikasi sebagai berikut (MatWeb.com, 2007) :

- Komposisi material :

Ti = 100 Wt.%

- *Tensile Strength, Ultimate* = 1530 Mpa
- *Elongation at break* = 54 %
- *Modulus of Elasticity* = 117 Gpa
- *Poisson's Ratio* = 0,34
- *Density* = 4,5 g/cc

### 3.3.2. Material Advanced Ceramic Die

Material *advanced ceramic die alumina* yang digunakan untuk memodelkan *die* pertama memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Nama Produk : **Alumina, Alpha  $Al_2O_3$ , 99,5 %**

Sumber : *Material Property Data Sheet*, MatWeb.com

- *Hardness, Mohs* = 9
- *Tensile Strength, Ultimate* = 260 Mpa
- *Modulus of Elasticity* = 370 Gpa
- *Flexural Strength* = 350 Mpa
- *Compressive Yield Strength* = 2600 Mpa
- *Poisson's Ratio* = 0,22
- *Fracture Toughness* = 4  $Mpa/m^2$
- *Shear Modulus* = 140 Gpa
- *Color* = *White*
- *Density* = 3,9 g/cc
- *Open Porosity* = 0 %

Material *advanced ceramic die silicon nitride* yang digunakan untuk memodelkan *die* kedua memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Nama Produk : **Sapco Silicon Nitride,  $Si_3N_4$**

Sumber : Sapco Company, MatWeb.com

- *Hardness, Mohs* = 9
- *Tensile Strength, Ultimate* = 350 Mpa
- *Modulus of Elasticity* = 300 Gpa
- *Flexural Strength* = 750 Mpa
- *Compressive Yield Strength* = 3000 Mpa
- *Poisson's Ratio* = 0,26
- *Shear Modulus* = 119 Gpa
- *Color* = *Gray*
- *Density* = 3,2 g/cc
- *Open Porosity* = 0 %

Material *advanced ceramic die silicon carbide* yang digunakan untuk memodelkan *die* ketiga memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Nama Produk : **CoorsTek SC-DSLIP (SC-50)**

***Liquid Phase Sintered Silicon Carbide***

Sumber : CoorsTek Inc, MatWeb.com

- *Knoop Microhardness* = 24
- *Modulus of Elasticity* = 375 Gpa
- *Flexural Strength* = 540 Mpa
- *Poisson's Ratio* = 0,21
- *Fracture Toughness* = 6,9 Mpa/m<sup>2</sup>
- *Shear Modulus* = 155 Gpa
- *Color* = *Black*
- *Density* = 3,18 g/cc
- *Open Porosity* = 0 %

### 3.4. Dimensi dan Parameter Material

#### 3.4.1. Dimensi *Blank*

Model *blank* yang digunakan dalam analisa kekuatan *advanced ceramic die* dan *drawing force (DF)* memiliki dimensi sebagai berikut :

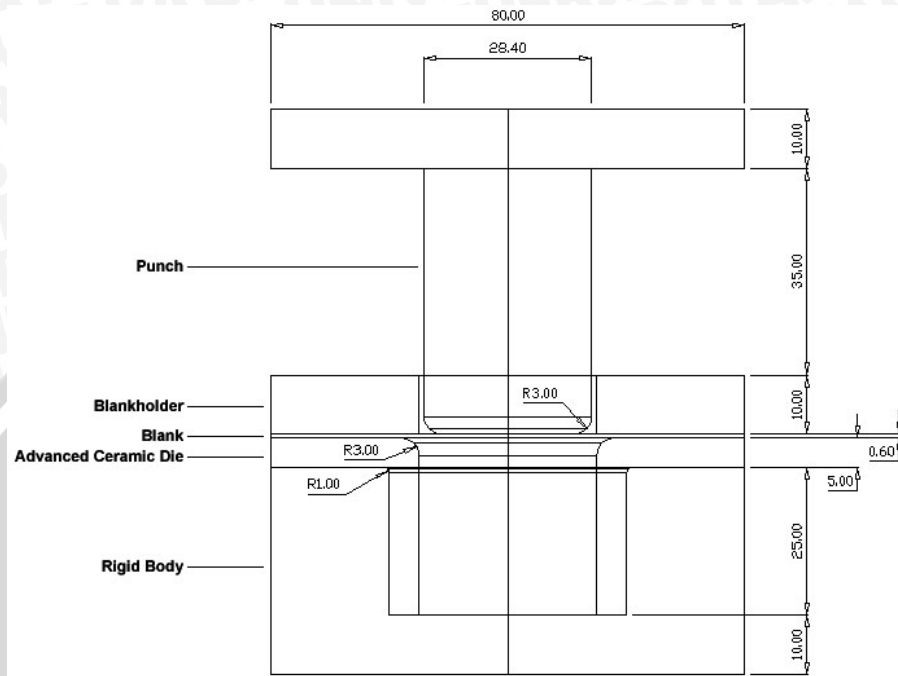
Tebal ( $s_0$ ) = 0,6 mm      Diameter ( $d_0$ ) = 80 mm

Adapun model *blank* yang digunakan dalam analisa *limiting drawing ratio (LDR)* logam memiliki variasi diameter sebagaimana ditunjukkan oleh tabel 3.2. Variasi diameter itu dibutuhkan untuk menentukan nilai *LDR* dengan metode *peak punch force*.

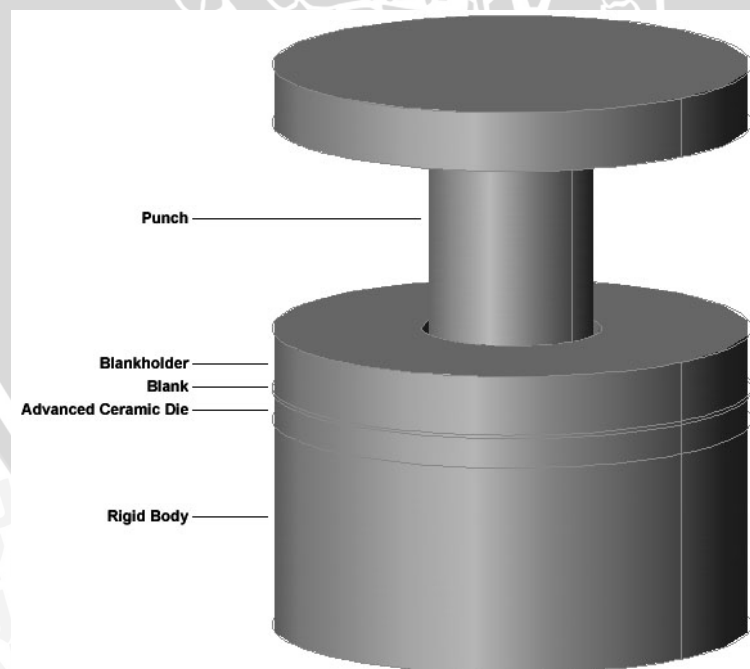
Tabel 3.2. Variasi diameter *blank* dalam analisa *LDR*

No	Diameter (mm)	Tebal (mm)	$\beta = d_0 / d_p$
1	45	0,6	1,5845
2	50		1,7606
3	65		2,2887
4	70		2,4648

### 3.4.2. Dimensi Perkakas *Deep Drawing*



Gambar 3.1. Spesifikasi geometri perkakas *deep drawing* dan *blank*.



Gambar 3.2. Perkakas *deep drawing* dan *blank* dalam bentuk tiga dimensi.

### 3.5. Penentuan Variabel Kendali

Variabel kendali yang akan digunakan dalam hal ini terbagi dalam dua kategori. Pada kategori pertama, variabel tersebut berasal dari penelitian *dry deep drawing* oleh S. Kataoka dan rekannya. Beberapa variabel itu antara lain adalah :

1. Tebal *blank* ( $s_0$ ) = 0,60 mm
2. Diameter *die* ( $d_D$ ) = 30 mm
3. Diameter *punch* ( $d_P$ ) = 28,4 mm
4. Radius *die* ( $r_D$ ) = 3 mm
5. Radius *punch* ( $r_P$ ) = 3 mm
6. Koefisien gesek ( $\mu$ )

Berdasarkan hasil *sliding test* didalam ruang vakum, diperoleh nilai koefisien gesek antara permukaan logam dan *advanced ceramic* seperti ditunjukkan tabel berikut ini.

Tabel 3.3. Koefisien gesek ( $\mu$ ) antara logam dan *advanced ceramic*

$\mu$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SiC
Baja (Fe)	0,99	0,61	0,49
Titanium (Ti)	1,34	0,71	0,58

Sumber : S. Kataoka, et al, 2004 : 583

Adapun variabel kendali yang ditentukan berdasarkan referensi dan rumus perhitungan atau pertimbangan lainnya adalah :

1. Kecepatan *drawing* ( $v$ ) = 0,279 m/s (Tabel 2.2 untuk baja)
2. Gaya *Blankholder* ( $F_{BH}$ )

$$F_{BH} = A_{BH} \cdot p_{BH}$$

(Pers 2.6)

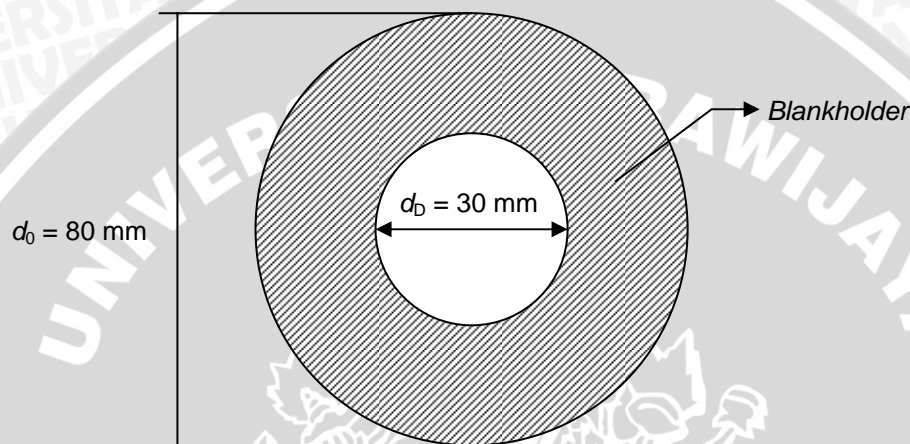
Sebagaimana yang disyaratkan oleh rumus tersebut, untuk menentukan  $F_{BH}$  perlu diketahui luas area kontak antara *blankholder* dan *blank* ( $A_{BH}$ ) serta tekanan *blankholder* ( $p_{BH}$ ). Dan karena perbedaan nilai keduanya dalam masing-masing simulasi, maka perhitungan  $F_{BH}$  dibedakan dalam dua kategori.



### Perhitungan I : $F_{BH}$ pada analisa kekuatan die dan DF

Penentuan luas area kontak dalam simulasi ini diperlihatkan oleh gambar 3.3.

$$\begin{aligned} A_{BH} &= A_{blank} - A_{lubang BH} \\ &= (\pi \times 40^2) - (\pi \times 15^2) = 5024 - 706,5 = 4317,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$



Gambar 3.3. Luas area kontak *blankholder* dan *blank* (arsir).

$$p_{BH} = 10^{-3} c \left[ (\beta - 1)^3 + \frac{0,005 \cdot d_0}{s_0} \right] S_u \quad \text{dengan } c = 2,5$$

(Pers 2.7)

$$\begin{aligned} p_{BH \text{ Baja}} &= 10^{-3} \times 2,5 \left[ (2,8169 - 1)^3 + \frac{0,005 \times 80}{0,60} \right] 1323 \\ &= 10^{-3} \times 2,5 [5,9978 + 0,6667] 358 = 5,9647 \text{ Mpa} = 5,9647 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{BH \text{ Ti}} &= 10^{-3} \times 2,5 \left[ (2,8169 - 1)^3 + \frac{0,005 \times 80}{0,60} \right] 1519 \\ &= 10^{-3} \times 2,5 [5,9978 + 0,6667] 220 = 3,6655 \text{ Mpa} = 3,6655 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$F_{BH \text{ Baja}} = A_{BH} \cdot p_{BH} = 4317,5 \times 5,9647 = 25752,5923 \text{ N}$$

$$F_{BH \text{ Ti}} = A_{BH} \cdot p_{BH} = 4317,5 \times 3,6655 = 15825,7963 \text{ N}$$

### **Perhitungan II : $F_{BH}$ pada analisa LDR**

Dengan rumus yang sama sebagaimana pada penentuan  $F_{BH}$  sebelumnya, maka diperoleh nilai  $F_{BH}$  seperti dalam tabel 3.4 berikut ini.

Tabel 3.4. Nilai  $F_{BH}$  dalam simulasi untuk analisa LDR

Material	No Sim.	$d_0$ (mm)	$A_{BH}$ (mm <sup>2</sup> )	$p_{BH}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{BH}$ (N)
Baja	1	45	883,125	0,5144	454,2795
	2	50	1256	0,7667	962,9752
	3	65	2610,125	2,4	6264,3
	4	70	3140	3,3349	10471,586
Titanium	1	45	883,125	0,3161	279,1558
	2	50	1256	0,4712	591,8272
	3	65	2610,125	1,475	3849,9344
	4	70	3140	2,0494	6435,116

### **3.6. Prosedur Penelitian**

#### **3.6.1. Prosedur Umum**

##### **3.6.1.1. Studi Literatur**

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan berbagai informasi yang mendukung serta data-data yang berhubungan dengan penelitian. Antara lain mengenai pengertian tentang proses pembentukan logam, proses *deep drawing*, proses *dry deep drawing*, serta spesifikasi material. Selain itu juga dilakukan studi literatur terhadap penelitian-penelitian sebelumnya mengenai pembentukan logam dan penggunaan *advanced ceramic* dalam proses pembentukan. Dimana studi literatur ini dilakukan terhadap beberapa buku, jurnal penelitian, tesis, serta artikel-artikel yang diperoleh melalui berbagai media.

##### **3.6.1.2. Perencanaan Variabel Pemodelan**

1. Menentukan bahwa dimensi perkakas dan *blank* yang digunakan sama dengan dimensi perkakas dan *blank* dalam penelitian S. Kataoka dan rekannya.
2. Menentukan *punch* dan *blankholder* sebagai material *rigid* dalam pemodelan.
3. Menemukan spesifikasi material *advanced ceramic alumina*, *silicon nitride* dan *silicon carbide* dan menentukan sebagai material *rigid* dalam pemodelan.

4. Menemukan data spesifikasi material *blank* dengan tipe yang sama seperti dalam penelitian S. Kataoka serta menentukan sebagai material *plastis*.
5. Membuat gambar model tiga dimensi yang telah disatukan dengan jarak tertentu secara akurat sebagai representasi perkakas *deep drawing* dan *blank*.
6. Menentukan jumlah *mesh* pada permukaan *blank* dan *die* yang memenuhi syarat sehingga dapat diperoleh keakuratan data yang mencukupi.
7. Menentukan analisa numerik serta analisis elemen hingga yang sesuai untuk digunakan dalam program simulasi.

### 3.6.1.3. Pemodelan dan Penelitian

Analisa yang akan dilakukan dalam penelitian ini membutuhkan dua jenis pemodelan sistem, antara lain :

1. Pemodelan untuk analisa kekuatan *die* dan *drawing force (DF)*.

Dalam hal ini dilakukan pemodelan terhadap proses *dry deep drawing* dengan ukuran diameter *blank* yang tetap. Dari hasil pemodelan dilakukan analisa terhadap perubahan yang terjadi pada *advanced ceramic die* serta gaya maksimum.

2. Pemodelan untuk analisa nilai *limiting drawing ratio (LDR)*.

Pemodelan *dry deep drawing* dalam hal ini dilakukan dengan diameter *blank* yang berbeda hingga diperoleh *draw piece* yang mengalami *tearing* pada bagian dasar. Kemudian nilai *LDR* ditentukan dengan metode *peak punch force* sebagai berikut :

- a. Dilakukan penarikan regresi linier dari nilai gaya maksimum yang tercatat dalam pemodelan *deep drawing* yang berhasil diperoleh *draw piece* secara utuh.
- b. Dilakukan penarikan garis horisontal dari nilai rata-rata gaya maksimum ketika terjadi *tearing* pada bagian dasar *draw piece*.
- c. Garis regresi linier dipotongkan dengan garis horisontal sehingga diperoleh nilai diameter *blank* maksimum ( $d_{0,max}$ ) untuk menghitung nilai *limiting drawing ratio (LDR)*.

#### 3.6.1.4. Pembahasan dan Evaluasi

Pembahasan dan evaluasi mengacu pada beberapa hal sebagai berikut :

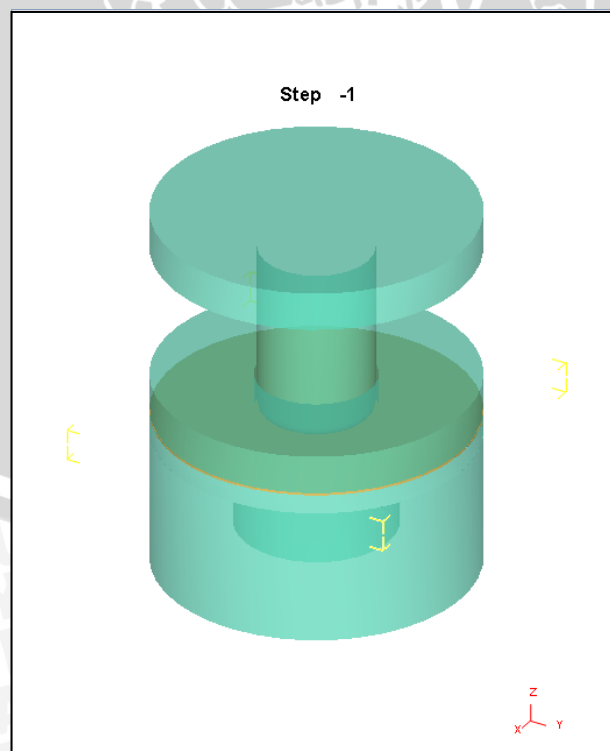
1. Hasil interpretasi data dan grafik yang diperoleh.
2. Parameter material serta hubungannya dengan analisa data yang diperoleh.

#### 3.6.1.5. Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan yang diambil merupakan hasil representasi akhir dari penelitian yang dilakukan. Hasil kesimpulan tersebut diharapkan dapat berguna bagi penelitian berikutnya serta memberi sumbangan berarti bagi perkembangan teknologi. Selanjutnya diberikan pula saran yang tepat untuk menunjang hal itu.

#### 3.6.2. Prosedur Eksperimentasi Pemodelan

1. Mempersiapkan gambar perkakas *deep drawing* dan *blank* yang telah disusun dengan tepat dalam program AUTOCAD 2007 serta disimpan dalam bentuk file *lytography* (\*.stl) sehingga memudahkan *object positioning* dalam program DEFORM<sup>TM</sup>3D seperti ditunjukkan oleh gambar 3.4 dibawah ini.



Gambar 3.4. Visualisasi pemodelan dalam DEFORM<sup>TM</sup>3D

2. Membuka program simulasi tiga dimensi DEFORM™3D version 5.0 dan membuat folder penyimpanan database.
3. Memulai proses pemodelan dengan membuka menu DEFORM 3D Pre-Processor yang menjadi sarana untuk memasukkan variabel pemodelan.
4. Menentukan jenis komponen yang dibutuhkan dan menambahkan kedalam pemodelan serta menentukan variabel setiap komponen melalui form berikut :
  - a. GENERAL  
Form untuk menentukan nama, tipe, dan temperatur komponen.
  - b. GEOMETRI  
Form untuk memasukkan gambar pemodelan.
  - c. MESH  
Form untuk menentukan *meshing* terhadap komponen tertentu yang akan diteliti pengaruhnya.
  - d. MATERIAL  
Form untuk menentukan jenis material yang digunakan
  - e. MOVEMENT  
Form untuk menentukan pergerakan komponen tertentu.
  - f. PROPERTY  
Form untuk menentukan variabel tertentu yang berpengaruh seperti batasan regangan dan target volume.
5. Membuka menu Input|Simulation Control untuk menentukan beberapa variabel penting yang tersedia dalam form berikut :
  - a. MAIN  
Form untuk menentukan satuan yang digunakan, tipe analisa numerik yang dipilih, serta tipe analisa pemodelannya.
  - b. STEP  
Form untuk menentukan langkah simulasi dan pergerakannya.
  - c. STOP  
Form untuk menentukan jarak penghentian proses.
  - d. ITERATION  
Form untuk menentukan metode elemen hingga yang digunakan.

6. Membuka menu Input|Material untuk memasukkan spesifikasi material yang belum tersedia didalam *system library*.
7. Membuka menu Input|Inter Object untuk mengatur hubungan antar permukaan material serta memasukkan nilai koefisien gesek yang sesuai.
8. Membuka menu Input|Database untuk melakukan penyimpanan data pemodelan yang telah dilakukan sebelumnya dan keluar dari Pre-Processor.
9. Menjalankan pemodelan proses *dry deep drawing* melalui menu Simulator|Run.
10. Setelah *running* simulasi selesai, dilakukan pengambilan data yang dihasilkan.

### 3.7. Rancangan Pengambilan Data

Pengambilan data dikelompokkan dalam tiga rancangan berbeda sebagaimana ditunjukkan pada tabel 3.5, 3.6 dan 3.7 berikut ini.

Tabel 3.5. Rancangan pengambilan data penerimaan gaya maksimum pada *die*

Gaya Maksimum Die ( $F_{\max \text{ die}}$ )		Variasi <i>advanced ceramic die</i>		
		$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Si}_3\text{N}_4$	SiC
Variasi <i>sheet logam</i>	Baja	$\sigma_{1,1}$	$\sigma_{1,2}$	$\sigma_{1,3}$
	Titanium	$\sigma_{2,1}$	$\sigma_{2,2}$	$\sigma_{2,3}$

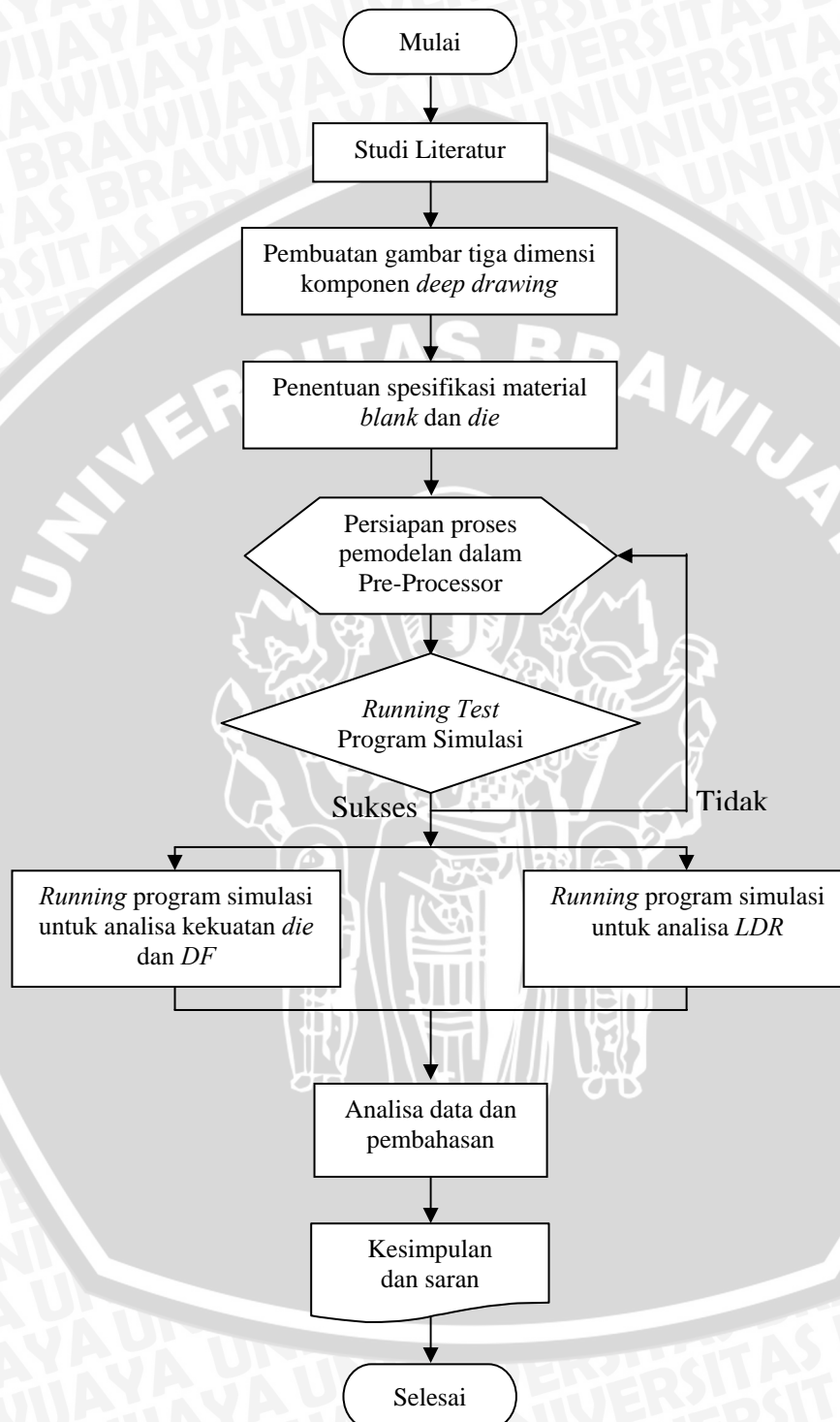
Tabel 3.6. Rancangan pengambilan data *drawing force (DF)*

<i>Drawing Force (DF)</i>		Variasi <i>advanced ceramic die</i>		
		$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Si}_3\text{N}_4$	SiC
Variasi <i>sheet logam</i>	Baja	$DF_{1,1}$	$DF_{1,2}$	$DF_{1,3}$
	Titanium	$DF_{2,1}$	$DF_{2,2}$	$DF_{2,3}$

Tabel 3.7. Rancangan pengambilan data *limiting drawing ratio (LDR)*

<i>Limiting Drawing Ratio (LDR)</i>		Variasi <i>advanced ceramic die</i>		
		$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Si}_3\text{N}_4$	SiC
Variasi <i>sheet logam</i>	Baja	$LDR_{1,1}$	$LDR_{1,2}$	$LDR_{1,3}$
	Titanium	$LDR_{2,1}$	$LDR_{2,2}$	$LDR_{2,3}$

### 3.8. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.5. Diagram alir penelitian

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

**4.1. Hasil Pemodelan**

**4.1.1. Hasil Pemodelan Kekuatan *Die* dan *Drawing Force* (DF)**

Tabel 4.1. Data penerimaan gaya maksimum pada *die*

$F_{\max die}$ (N)		Variasi <i>advanced ceramic die</i>		
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SiC
Variasi <i>sheet logam</i>	Baja	50255.9063	49968.4688	48670.2695
	Titanium	71013.4375	70932.4297	70292.3047

Tabel 4.2. Data *drawing force* (DF)

<i>Drawing Force</i> (N)		Variasi <i>advanced ceramic die</i>		
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SiC
Variasi <i>sheet logam</i>	Baja	23851.5703	23550.1269	22679.6465
	Titanium	55376.8320	54982.4687	54687.3281

**4.1.2. Hasil Pemodelan *Limiting Drawing Ratio* (LDR)**

Tabel 4.3. Data *limiting drawing ratio* (LDR)

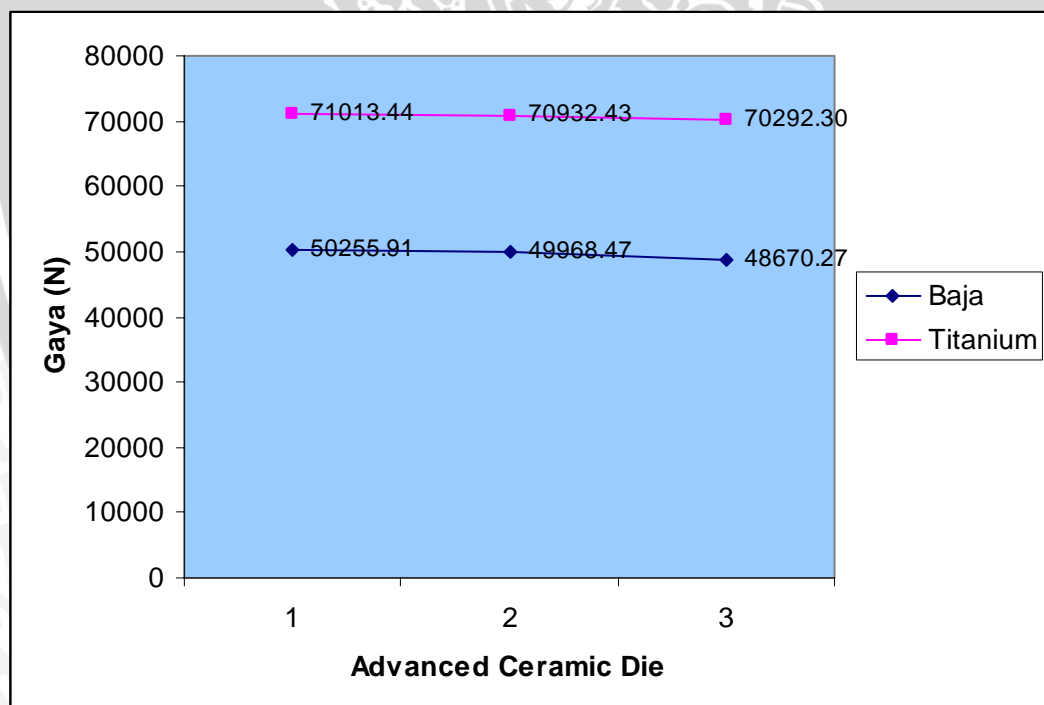
<i>Limiting Drawing Ratio</i> (LDR)		Variasi <i>advanced ceramic die</i>		
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SiC
Variasi <i>sheet logam</i>	Baja	2,0689	2,0894	2,1257
	Titanium	1,7632	1,7670	1,7696



## 4.2. Pembahasan dan Evaluasi

### 4.3.1. Hubungan Variasi *Advanced Ceramic Die* dan Kekuatannya

Berdasarkan data penerimaan gaya maksimum pada *die* yang ditunjukkan oleh tabel 4.1 dapat diketahui hubungan antara variasi *advanced ceramic die* yang digunakan dan jumlah gaya yang diterima. Selanjutnya dengan memperhatikan grafik 4.1 maka perbedaan besar gaya yang diterima *die* dalam masing-masing proses akan digunakan untuk memprediksi kekuatannya. Melalui grafik tersebut dapat diketahui dengan jelas adanya penurunan jumlah gaya yang diterima *advanced ceramic die* dengan urutan  $F_{\max \text{ die Al}_2\text{O}_3} > F_{\max \text{ die Si}_3\text{N}_4} > F_{\max \text{ die SiC}}$ . Apabila besarnya penerimaan gaya digunakan sebagai dasar analisa kekuatan *die* maka hal itu mengindikasikan pula bahwa kekuatan *advanced ceramic die* mengalami peningkatan dalam urutan sebaliknya, yaitu  $\text{Al}_2\text{O}_3 < \text{Si}_3\text{N}_4 < \text{SiC}$ .



Keterangan : 1. *Alumina Die*  
 2. *Silicon Nitride Die*  
 3. *Silicon Carbide Die*

Gambar 4.1 : Grafik penerimaan gaya maksimum pada *die*

#### 4.3.2. Hubungan Variasi Logam dan Kekuatan *Advanced Ceramic Die*

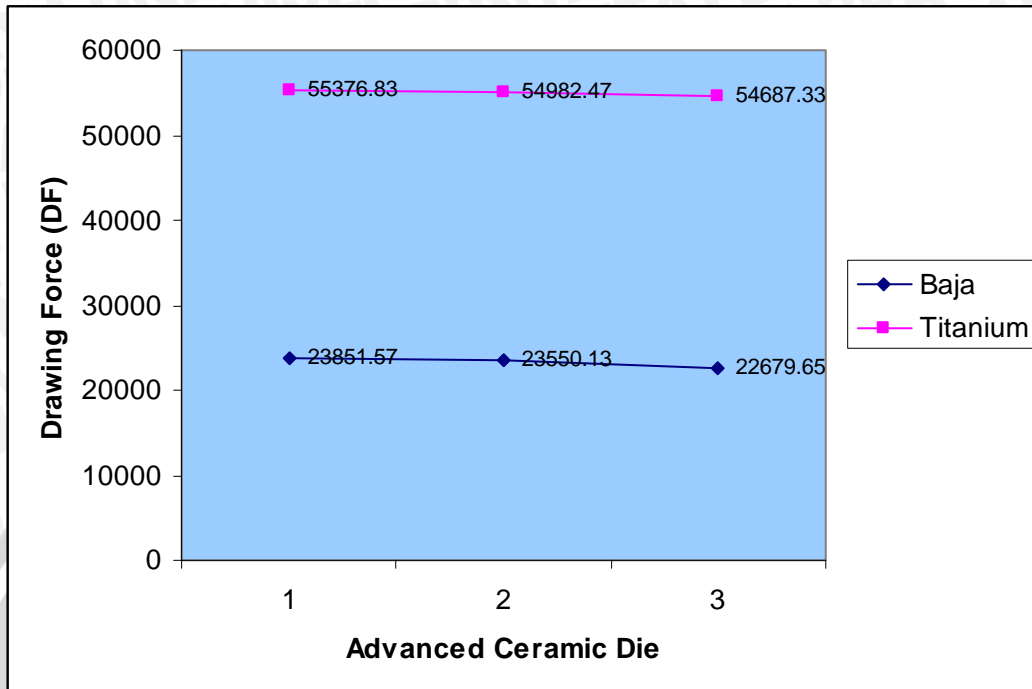
Berdasarkan data penerimaan gaya maksimum pada *die* yang ditunjukkan oleh tabel 4.1 dan gambar 4.1 dapat diketahui pula hubungan antara variasi *sheet* logam yang diproses dengan jumlah gaya yang diterima oleh *die*. Dengan menggunakan kembali grafik 4.1 sebagai acuan, diketahui bahwa proses *dry deep drawing* terhadap logam titanium mengakibatkan penerimaan gaya pada *die* lebih tinggi dibandingkan terhadap logam baja. Dan apabila besarnya penerimaan gaya digunakan sebagai dasar analisa kekuatan *die* maka hal itu mengindikasikan pula bahwa kekuatan *advanced ceramic die* pada *dry deep drawing* baja lebih tinggi daripada *advanced ceramic die* yang digunakan pada *dry deep drawing* titanium.

#### 4.3.3. Hubungan Antara Variasi *Advanced Ceramic Die* dan *Drawing Force*

Berdasarkan data *drawing force (DF)* yang ditunjukkan oleh tabel 4.2 dapat diketahui hubungan antara variasi *advanced ceramic die* yang digunakan dan gaya yang dibutuhkan dalam proses *dry deep drawing*. Selanjutnya dengan memperhatikan grafik 4.2 dapat diketahui adanya penurunan jumlah *drawing force (DF)* dengan urutan  $DF Al_2O_3 > DF Si_3N_4 > DF SiC$ . Karena besarnya nilai *drawing force (DF)* tersebut digunakan untuk mengetahui karakteristik tribologi *advanced ceramic die*, maka dapat disimpulkan pula bahwa karakteristik tribologi dalam penggunaan *advanced ceramic die* mengalami peningkatan dalam urutan sebaliknya, yaitu  $Al_2O_3 < Si_3N_4 < SiC$ .

#### 4.3.4. Hubungan Antara Variasi Logam dan *Drawing Force (DF)*

Berdasarkan data *drawing force (DF)* yang ditunjukkan oleh tabel 4.2 dan grafik 4.2 dapat diketahui pula hubungan antara variasi *sheet* logam yang diproses dengan *drawing force (DF)* yang dibutuhkan dalam setiap proses. Dengan menggunakan kembali grafik 4.2 sebagai acuan, diketahui bahwa proses *dry deep drawing* terhadap logam titanium membutuhkan *drawing force (DF)* lebih tinggi dibandingkan terhadap logam baja. Dan dengan demikian dapat disimpulkan bahwa karakteristik tribologi proses *dry deep drawing* dengan menggunakan *advanced ceramic die* terhadap baja lebih baik daripada terhadap titanium.



Keterangan : 1. Alumina Die

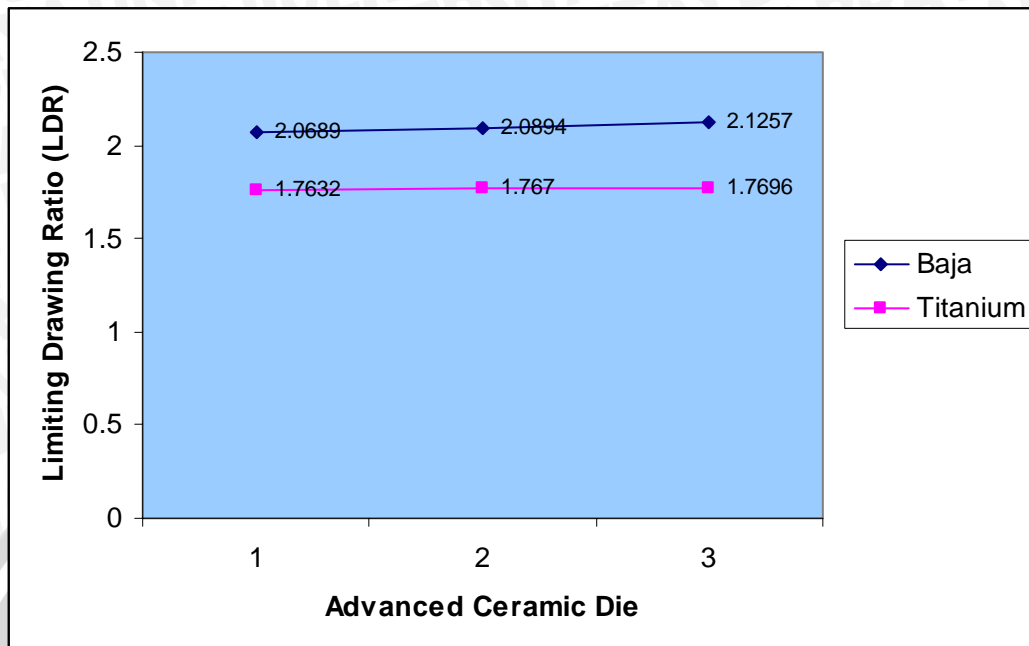
2. Silicon Nitride Die

3. Silicon Carbide Die

Gambar 4.2 : Grafik *drawing force* (DF)

#### 4.3.5. Hubungan Antara Variasi *Advanced Ceramic Die* dan LDR Logam

Berdasarkan data *limiting drawing ratio* (LDR) yang ditunjukkan oleh tabel 4.3 dapat diketahui hubungan antara variasi *advanced ceramic die* yang digunakan dan nilai *limiting drawing ratio* (LDR) logam baja maupun titanium dalam *dry deep drawing*. Selanjutnya dengan memperhatikan grafik 4.3 dapat diketahui adanya peningkatan nilai *limiting drawing ratio* (LDR) dengan urutan  $LDR Al_2O_3 < LDR Si_3N_4 < LDR SiC$ . Karena besarnya nilai *limiting drawing ratio* (LDR) tersebut digunakan untuk mengetahui karakteristik tribologi *advanced ceramic die*, maka dapat disimpulkan pula bahwa karakteristik tribologi dalam penggunaan *advanced ceramic die* mengalami peningkatan dalam urutan yang sama, yaitu  $Al_2O_3 < Si_3N_4 < SiC$ .



Keterangan : 1. *Alumina Die*  
2. *Silicon Nitride Die*  
3. *Silicon Carbide Die*

Gambar 4.3 : Grafik *limiting drawing ratio (LDR)*

#### 4.3.6. Hubungan Antara Variasi Logam dan *LDR* Logam

Berdasarkan data *limiting drawing ratio (LDR)* yang ditunjukkan oleh tabel 4.3 dan grafik 4.3 dapat diketahui pula kedua jenis logam tersebut memiliki perbedaan nilai *limiting drawing ratio (LDR)*. Dengan menggunakan kembali grafik 4.3 sebagai acuan, dapat diketahui bahwa logam titanium nilai *LDR* lebih rendah daripada baja. Dan dengan demikian dapat disimpulkan bahwa karakteristik tribologi proses *dry deep drawing* terhadap logam baja lebih baik daripada terhadap logam titanium.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa terhadap pemodelan *dry deep drawing* yang telah dilakukan dalam penelitian ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Kekuatan *advanced ceramic die* yang dianalisa dari jumlah gaya yang diterimanya mengalami peningkatan dengan urutan  $Al_2O_3 < Si_3N_4 < SiC$ . Dan dalam setiap proses yang dilakukan, *dry deep drawing* terhadap baja memungkinkan untuk dapat diperolehnya kekuatan *die* yang lebih tinggi karena gaya yang diterima oleh *die* cenderung lebih rendah.
2. Karakteristik tribologi yang dianalisa dari nilai *drawing force (DF)* dan *limiting drawing ratio (LDR)* mengalami peningkatan dengan urutan  $Al_2O_3 < Si_3N_4 < SiC$ . Dan proses *dry deep drawing* terhadap baja memiliki karakteristik tribologi yang lebih baik daripada terhadap titanium karena dibutuhkan *drawing force (DF)* yang lebih kecil dan dihasilkan nilai *limiting drawing ratio (LDR)* yang lebih tinggi.

#### 5.2. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, kami dapat memberikan beberapa saran dan masukan berikut ini :

1. Pada dasarnya perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan program simulasi tiga dimensi terhadap proses *dry deep drawing* sehingga dimasa yang akan datang dapat diketahui program yang mampu merepresentasikan kondisi yang dimaksud secara lebih baik.
2. Selain daripada itu perlu dilakukan pula penelitian lebih lanjut terhadap proses *dry deep drawing* dengan material *advanced ceramic die* dan *sheet* logam berbeda sehingga dapat diperoleh data lebih banyak mengenai aplikasi proses tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

1982 *Annual Book of ASTM Standards*; American Society for Testing and Materials; 1916 Race St, Philadelphia.

Aizawa, T, Yamamoto, S, Sumimoto, T; 2006; *Self-Lubrication of Machining Tools in Dry via In-situ Formed Tribofilms*; Materials Research Society Symp. Proceeding Vol. 890; Department of Materials Science and Engineering, University of Toronto, Canada.

Altan, T; 2005 : *Interactive Educational Multimedia Modules in Net Shape Manufacturing, Short Course on Sheet Metal Forming*; Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing (ERCNSM); The Ohio State University, 339 Baker Systems, 1971 Neil Avenue, Columbus, Ohio.

Bushan, B; 1996; *Handbook of Tribology*; A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc, New York.

Bushan, B; 1999; *Principal and Applications of Tribology*; A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc, New York.

Eary, D, F, Reed, E, A; 1974; *Techniques of Pressworking Sheet Metal*; An Engineering Approach to Die Design; Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey

Harpell, E, T; 1997 : *Numerical Prediction of Limiting Draw Ratio in Aluminum Cylindrical Cup Drawing*; A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in Mechanical and Aerospace Engineering Carleton University, Ottawa, Ontario; National Library of Canada 395 Wellington Street, Ottawa, Canada.

Kataoka, S, Murakawa, M, Aizawa, T, Ike, H; 2004 : *Tribology of dry deep-drawing of various metal sheets with use of ceramics tools*; Journal of Surface and Coating Technology 177 –178 (2004) 582–590; Elsevier Science Publishers, B.V.

Kreith, F; 1999; *Mechanical Engineering Handbook*; CRC Press LLC.

Lange, K; 1985: *Handbook of Metal Forming*; McGraw Hill Book Co, New York.

Ortergaard, D, E; 1967; *Metal Forming*; McGraw Hill Book Co, New York.

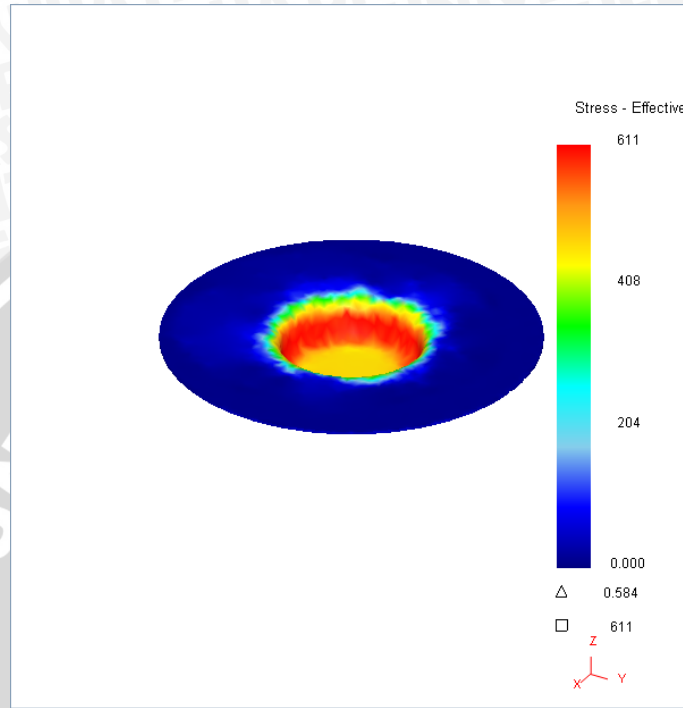
Sebayang, P, Muljadi, Sudjono, H, K; 2002; *Pembuatan dan karakterisasi dari keramik  $Al_2O_3$  untuk diaplikasikan pada bidang engineering*; TELAAH Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Vol. 23 No. 0201; Pusat Penelitian Fisika Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI).

Siegert, K, Wagner, S; 1994; *Deep Drawing*; TALAT Lecture 3704; EAA-European Aluminium Association.

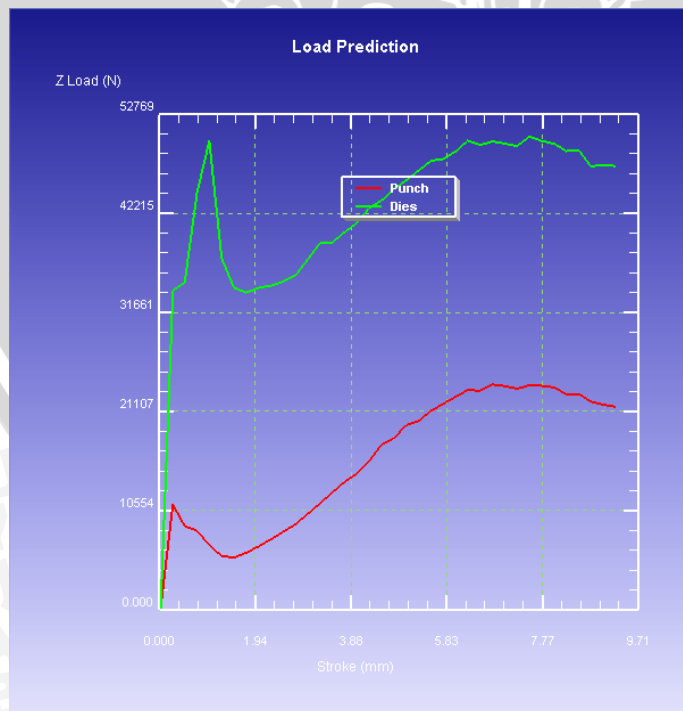
Walpole, R,E; 1995; *Pengantar Statistika, Edisi ke-3*; PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

Willis, R; 2003; *Ceramic Material Database*; <http://www.ceramicmaterials.info>.

Lampiran 1 : Visualisasi hasil pemodelan *dry deep drawing* baja dan *alumina* dalam analisa kekuatan *die* dan *drawing force (DF)*



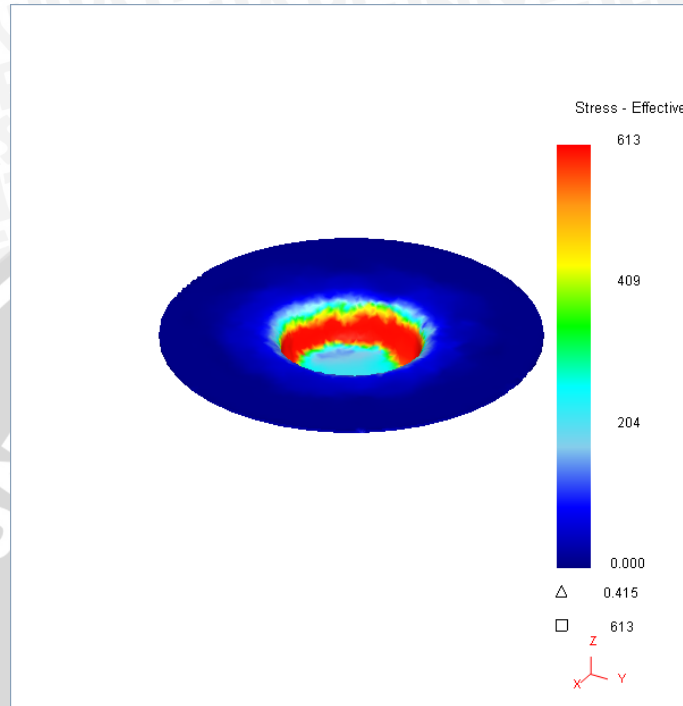
Variasi tegangan alir pada *draw piece*



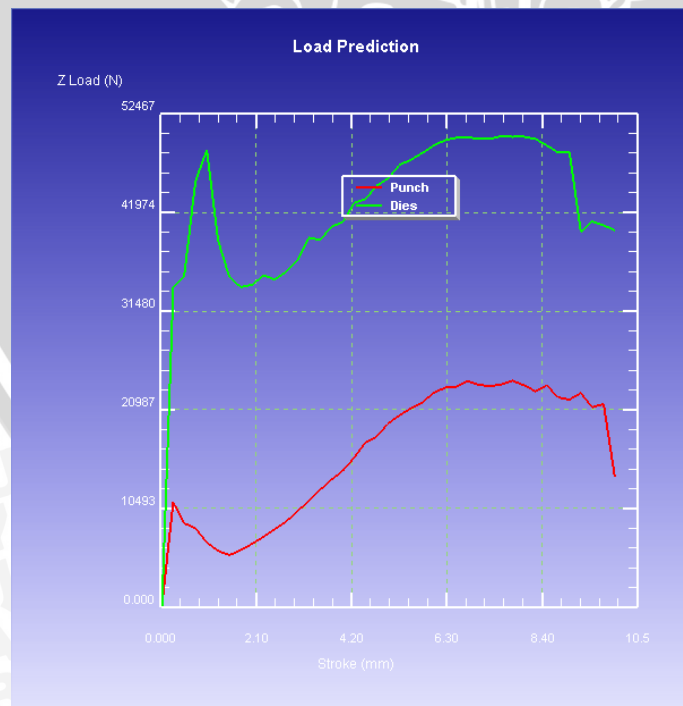
Variasi gaya *punch* dan gaya yang diterima *die*



Lampiran 2 : Visualisasi hasil pemodelan *dry deep drawing* baja dan *silicon nitride* dalam analisa kekuatan *die* dan *drawing force (DF)*

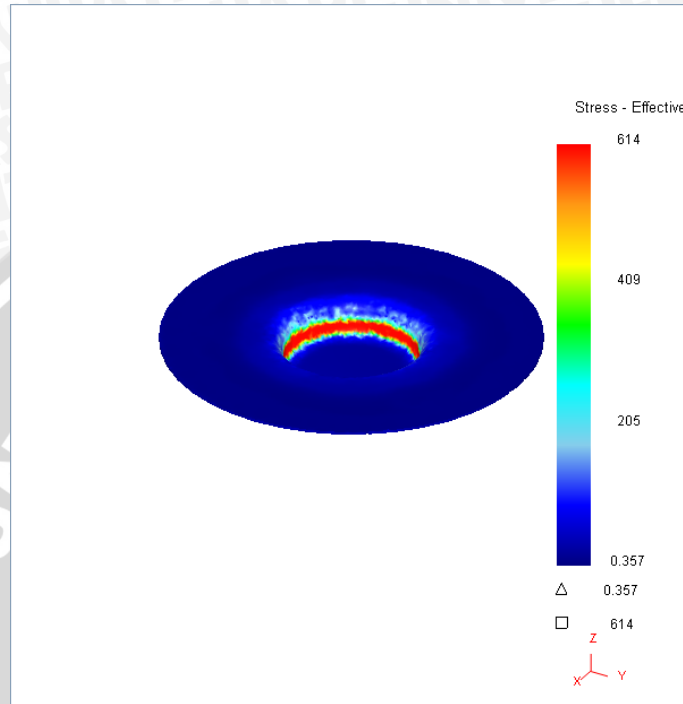


Variasi tegangan alir pada *draw piece*

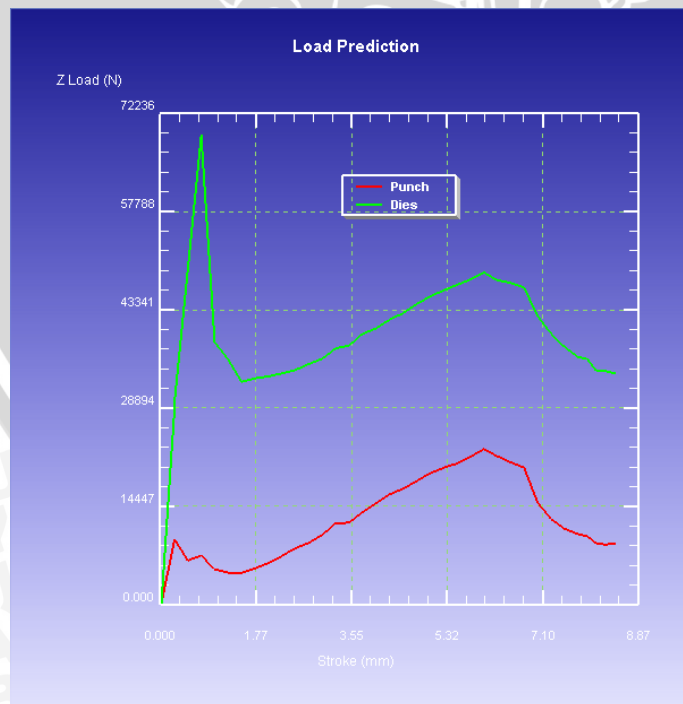


Variasi gaya *punch* dan gaya yang diterima *die*

Lampiran 3 : Visualisasi hasil pemodelan *dry deep drawing* baja dan *silicon carbide* dalam analisa kekuatan *die* dan *drawing force (DF)*

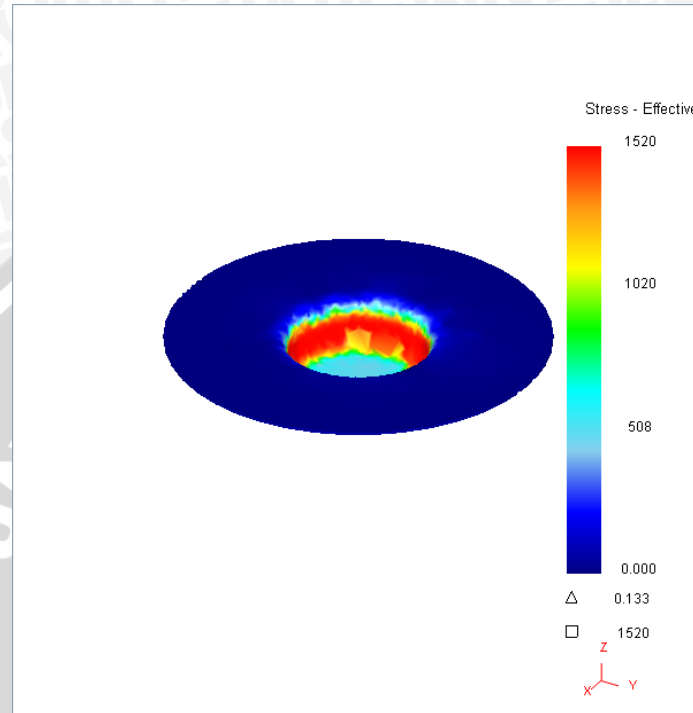


Variasi tegangan alir pada *draw piece*

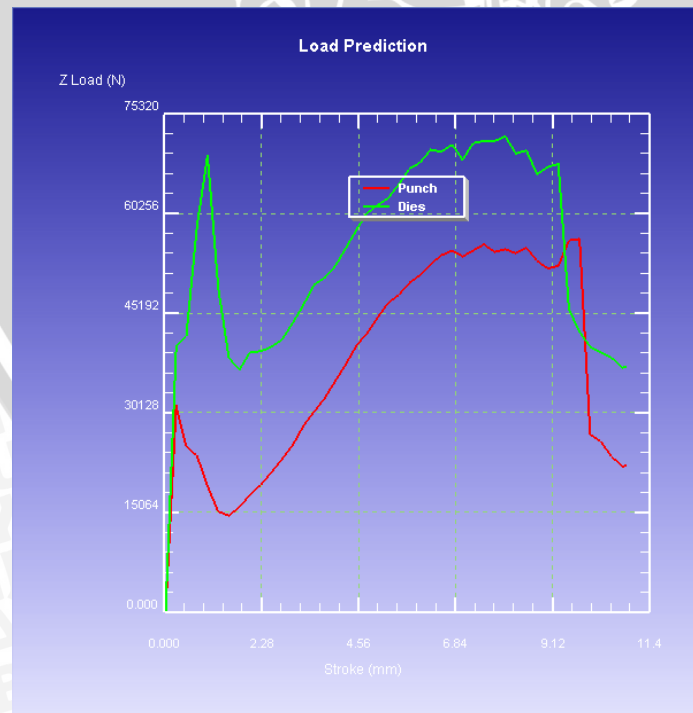


Variasi gaya *punch* dan gaya yang diterima *die*

Lampiran 4 : Visualisasi hasil pemodelan *dry deep drawing* titanium dan alumina dalam analisa kekuatan *die* dan *drawing force (DF)*

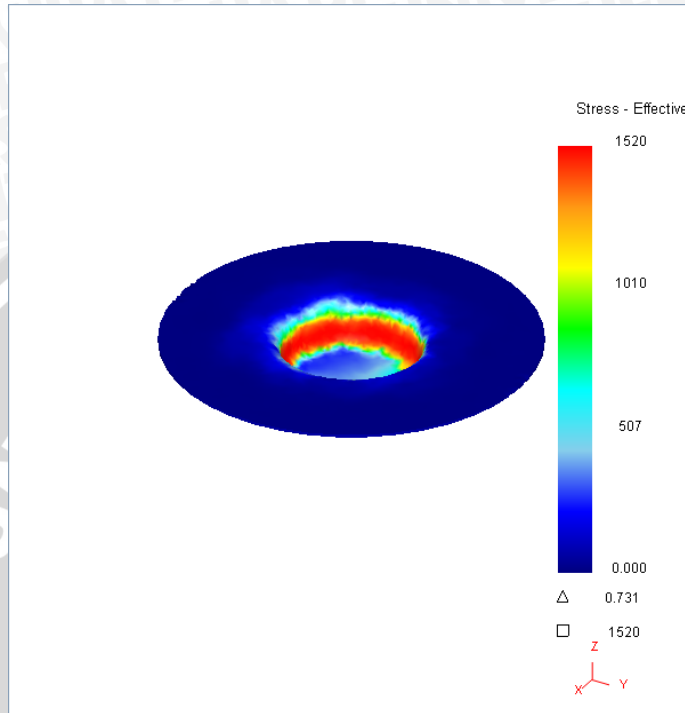


Variasi tegangan alir pada *draw piece*

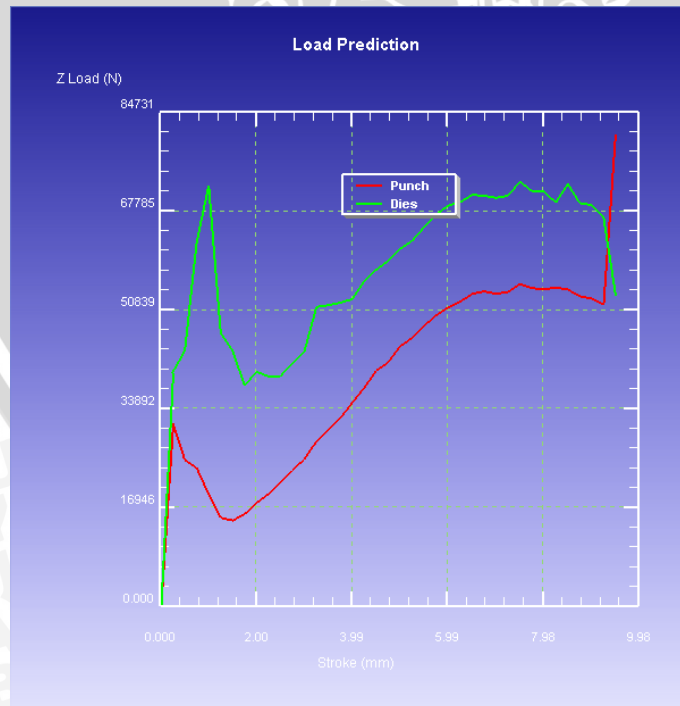


Variasi gaya *punch* dan gaya yang diterima *die*

Lampiran 5 : Visualisasi hasil pemodelan *dry deep drawing* titanium dan *silicon nitride* dalam analisa kekuatan *die* dan *drawing force (DF)*

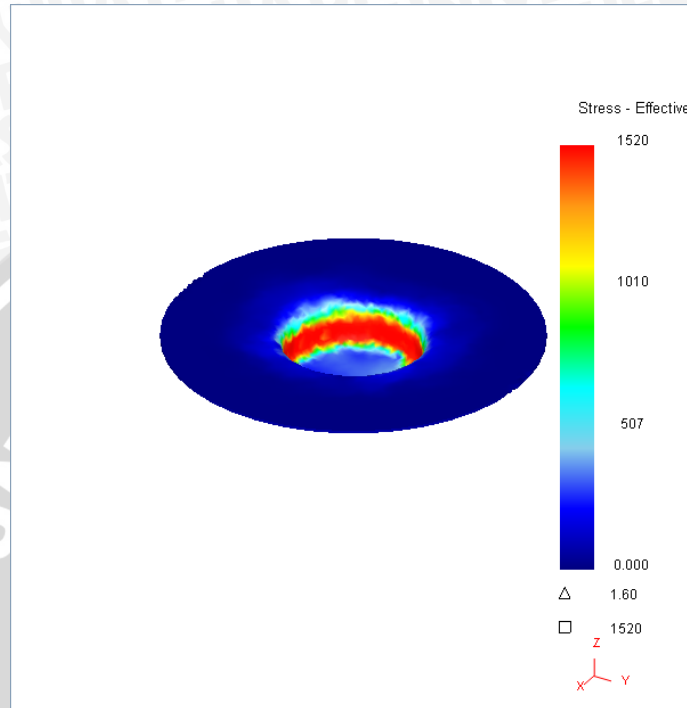


Variasi tegangan alir pada *draw piece*

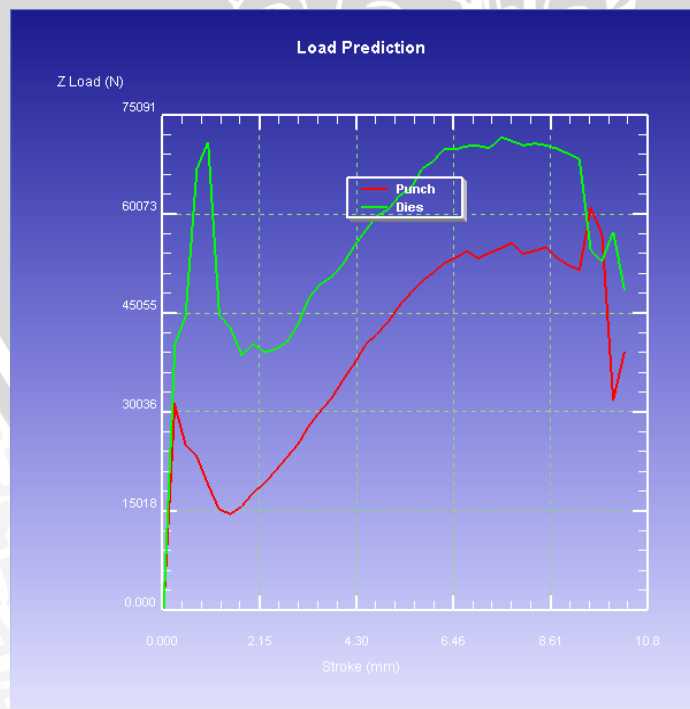


Variasi gaya *punch* dan gaya yang diterima *die*

Lampiran 6 : Visualisasi hasil pemodelan *dry deep drawing* titanium dan *silicon carbide* dalam analisa kekuatan *die* dan *drawing force (DF)*



Variasi tegangan alir pada *draw piece*



Variasi gaya *punch* dan gaya yang diterima *die*