

**PENGARUH DIE CLEARANCE TERHADAP SPRINGBACK  
HASIL DEEP DRAWING U-PROFILE PADA  
ALUMINIUM PADUAN YANG TELAH DI ANNEALING**

**SKRIPSI  
Konsentrasi Teknik Produksi**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**



Disusun Oleh :

**HADI SUWITO  
NIM. 0310620056-62**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN MESIN  
MALANG  
2009**

**PENGARUH *DIE CLEARANCE* TERHADAP *SPRINGBACK*  
HASIL *DEEP DRAWING U-PROFILE* PADA  
ALUMINIUM PADUAN YANG TELAH DI *ANNEALING***

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

**HADI SUWITO**  
**NIM. 0310620056-62**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT.**  
**NIP. 19460804 198303 1 001**

**Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc.CSE**  
**NIP. 19670923 199303 1 002**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGARUH *DIE CLEARANCE* TERHADAP *SPRINGBACK* HASIL  
*DEEP DRAWING U-PROFILE* PADA ALUMINIUM PADUAN  
YANG TELAH DI *ANNEALING***

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

**HADI SUWITO  
NIM. 0310620056-62**

Skripsi ini telah diuji dan  
dinyatakan lulus pada tanggal 10 September 2009

Dosen Penguji :

Penguji Skripsi I

Penguji Skripsi II

**Ir. Endi Sutikno, MT.  
NIP. 19590411 198710 1 001**

**Ir. Erwin Sulisty, MT.  
NIP. 19661213 199802 1 001**

Penguji Komprehensif

**Putu Hadi Setyarini, ST., MT.  
NIP. 19770806 200312 2 001**

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin

**Dr. H. Slamet Wahyudi, ST., MT.  
NIP. 19720903 199702 1 001**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkat, rahmat serta hidayah-Nya sehingga skripsi yang berjudul **“Pengaruh Die Clearance Terhadap Springback Hasil Deep Drawing U- Profile Pada Aluminium Paduan Yang Telah Di Annealing”** dapat terselesaikan dengan baik.

Dalam rangka penyusunan skripsi ini, penulis tidak dapat terlepas dari bantuan berbagai pihak. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ayah dan Ibuku, kakak – kakak serta adikku dan seluruh keluargaku, balasan Allah lebih baik dan kekal.
2. Bapak Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT. dan Bapak Tjuk Oerbandono, M.Sc. CSE. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan pada skripsi saya.
3. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST. MT selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
5. Bapak Ir. Marsoedi W, MMT. selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Produksi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
6. Teman–temanku seperjuangan M’03, teman – teman KSR UB , warga alumni Kertosentono 81, dan warga POHARIN D 148 terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.
7. Untuk Dini Zuraidah terima kasih atas dukungannya.
8. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari walaupun telah berusaha dengan sebaik-baiknya dalam penyusunan skripsi ini pasti masih jauh dari sempurna dikarenakan keterbatasan pengetahuan dan kemampuan penulis. Maka dengan ini penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun guna menuju kesempurnaan. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan berbagai pihak yang akan mengembangkan skripsi ini.

Malang, 6 September 2009

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
<b>PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	iv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	v
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	4
2.1 Aluminium .....	4
2.2 <i>Heat Treatment</i> pada Aluminium .....	5
2.3 Proses Pembentukan Logam .....	6
2.3.1 Proses Pengerjaan Panas .....	6
2.3.2 Proses Pengerjaan Dingin .....	7
2.4 Mekanisme Deformasi .....	8
2.4.1 Pengertian Deformasi Elastis dan Plastis .....	9
2.4.2 Mekanisme Slip .....	9
2.4.3 Hubungan antara Deformasi dengan Teori Dislokasi .....	10
2.4.4 Tegangan Sisa .....	12
2.5 Pengaruh Pengerjaan Dingin Terhadap Sifat Logam .....	13
2.6 Pengaruh Deformasi dan Pemanasan Terhadap Besar Butir .....	13
2.7 <i>Deep Drawing</i> .....	14
2.8 Analisis Variabel – Variabel <i>Drawing</i> .....	16
2.8.1 Radius <i>Punch</i> .....	16
2.8.2 Radius <i>Dies</i> .....	16
2.8.3 Gaya <i>Blankholder</i> .....	17
2.8.4 <i>Drawing Ratio</i> .....	18
2.8.5 Kedalaman Penekanan .....	19
2.8.6 <i>Strain Ratio</i> .....	19
2.8.7 Ukuran <i>Blank</i> .....	20
2.8.8 <i>Limiting Drawing Ratio</i> .....	20
2.8.9 <i>Die Clearance</i> .....	20
2.8.10 <i>Trim Allowance</i> .....	22
2.8.11 <i>Springback</i> .....	22
2.9 Hipotesa .....	24



**BAB III. METODOLOGI PENELITIAN**

3.1	Metode Penelitian .....	25
3.2	Tempat dan Waktu Penelitian .....	25
3.3	Alat dan Bahan yang Digunakan .....	25
3.3.1	Alat yang Digunakan .....	25
3.3.2	Bahan yang Digunakan .....	29
3.3.2.1	Pengujian Komposisi .....	29
3.3.2.2	Pengujian Tarik .....	29
3.3.2.3	Perhitungan Parameter Drawing .....	32
3.4	Prosedur Penelitian .....	33
3.5	Analisa Statistik .....	35
3.5.1	Interval Penduga Rata – rata .....	36
3.5.2	Analisis Varian Dua Arah .....	36
3.6	Diagram Alir .....	40

**BAB IV ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN DATA**

4.1	Data Sudut <i>Springback</i> .....	41
4.2	Analisa Statistik .....	42
4.2.1	Sudut <i>Springback</i> $\alpha_1$ .....	42
4.2.2	Analisa Varian Dua Arah .....	43
4.3	Pembahasan dan Grafik .....	47

**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1	Kesimpulan .....	51
5.2	Saran .....	51

**DAFTAR PUSTAKA  
LAMPIRAN**



**DAFTAR TABEL**

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Klasifikasi Proses Pembentukan Logam	6
Tabel 2.2	Harga $\beta$ terhadap $(s_0/d_0)$	18
Tabel 2.3	Jumlah dan prosentase reduksi berdasarkan $H/d_t$	19
Tabel 2.4	<i>Trim allowance</i> pada <i>deep drawing</i>	22
Tabel 3.1	Ukuran standard pengujian ASTM – A 370	29
Tabel 3.2	Rancangan penelitian	36
Tabel 3.3	Analisis Varian Dua Arah	39
Tabel 4.1	Hasil pengukuran sudut <i>springback</i> pada $\alpha_1$	41
Tabel 4.2	Hasil pengukuran sudut <i>springback</i> pada $\alpha_2$	41
Tabel 4.3	Interval Penduga	43
Tabel 4.4	Analisis Varian Dua Arah	46



## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	: Pergeseran atom di daerah plastis ( <i>slip</i> )	8
Gambar 2.2	: Pergeseran atom pada gerakan kembaran ( <i>twinning</i> )	8
Gambar 2.3	: Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan	9
Gambar 2.4	: Beberapa struktur atom yang biasa dikenal	10
Gambar 2.5	: (a) Gerakan atom pada dislokasi dalam slip ;(b) Dislokasi sisi ; (c) Dislokasi ulir	11
Gambar 2.6	: Reaksi dislokasi sisi dengan dislokasi sisi	12
Gambar 2.7	: Reaksi dislokasi ulir dengan dislokasi ulir	12
Gambar 2.8	: Perubahan sifat mekanik akibat pengerjaan dingin	13
Gambar 2.9	: Perubahan sifat mekanik akibat pengerjaan dingin (besar butir)	14
Gambar 2.10	: Aliran <i>sheet metal</i> selama <i>drawing</i>	15
Gambar 2.11	: Skema ilustrasi proses <i>deep drawing</i>	16
Gambar 2.12	: Skema dari proses penekanan <i>blank</i>	21
Gambar 2.13	: <i>Springback</i> pada proses <i>u-channel deep drawing</i>	22
Gambar 2.14	: <i>Springback</i>	23
Gambar 2.15	: Kondisi pada radius <i>die</i>	24
Gambar 3.1	: Instalasi mesin <i>deep drawing</i>	25
Gambar 3.2	: <i>Punch</i> pada mesin <i>deep drawing</i>	26
Gambar 3.3	: <i>Die</i> pada mesin <i>deep drawing</i>	27
Gambar 3.4	: <i>Blankholder</i> pada mesin <i>deep drawing</i>	27
Gambar 3.5	: Dapur pemanas	28
Gambar 3.6	: Mesin Press	28
Gambar 3.7	: Skematis standart pengujian ASTM – A 370	29
Gambar 3.8	: Bentuk dan dimensi benda kerja	30
Gambar 3.9	: Bentuk dan dimensi benda kerja setelah proses	31
Gambar 3.10	: Pemasukan gambar benda kerja ke dalam program <i>Autocad</i>	34
Gambar 3.11	: Tampilan sudut pada gambar benda kerja	35
Gambar 3.12	: Diagram Alir Penelitian	40
Gambar 4.1	: Grafik Pengaruh <i>die clearance</i> terhadap sudut <i>springback</i> $\alpha_1$ dengan variasi tanpa perlakuan dan perlakuan panas <i>annealing</i>	47
Gambar 4.2	: Hasil penelitian benda kerja dengan perlakuan panas <i>annealing</i> dengan <i>die clearance</i> 40% (4,2 mm)	47

Gambar 4.3	: Hubungan geometris <i>bending</i> dan <i>unbending</i> pada <i>radius die</i>	48
Gambar 4.4	: Grafik pengaruh <i>die clearance</i> terhadap sudut <i>springback</i> $\alpha_2$ dengan variasi tanpa perlakuan dan perlakuan panas <i>annealing</i>	49
Gambar 4.5	: Hasil penelitian benda kerja dengan perlakuan panas <i>annealing</i> dengan <i>die clearance</i> 10% (3,3 mm)	50



## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Tabel Distribusi nilai F dengan $\alpha = 5\%$
Lampiran 2	Data Hasil Pengujian Komposisi Unsur Penyusun Material Aluminium Paduan
Lampiran 3	<i>Spectra</i> Hasil Pengujian Komposisi Unsur Penyusun Material Aluminium Paduan
Lampiran 4	Spesimen Hasil Pengujian



## RINGKASAN

**Hadi Suwito**, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, September 2009, Pengaruh *Die Clearance* Terhadap *Springback* Hasil *Deep Drawing* U- *Profile* Pada Aluminium Paduan Yang Telah Di *Annealing*, Dosen Pembimbing : Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT. dan Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc. CSE.

*Springback* merupakan salah satu cacat produk didalam proses produksi, diantaranya adalah dalam proses *deep drawing*. Dalam *deep drawing* terdapat beberapa parameter untuk memprediksi ada tidaknya *springback*, yaitu faktor parameter proses, *tooling shape*, dan mekanika dari *springback*, yaitu proses dari pemulihan elastis / deformasi elastis. Parameter *tooling setup* yang dapat mempengaruhi terjadinya *springback*, salah satunya adalah *die clearance*.

Penelitian ini menggunakan bahan aluminium paduan. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental nyata. Parameter dalam penelitian ini adalah *die clearance* dengan variasi 10% lebih besar dari tebal *blank* (3,3 mm), 20% (3,6 mm), 30% (3,9 mm), dan 40% (4,2 mm) serta perlakuan panas *annealing* sebagai variabel bebasnya. *Springback* sebagai variabel terikat. Radius *punch*, radius *die*, gaya tekan *blankholder* dan tebal material uji sebagai variabel terkendali. Pengukuran sudut *springback* menggunakan *scanner* dan *software Autocad 2009*. Data yang diperoleh diolah dengan analisis varian dua arah.

Dari hasil pengolahan data dan pembahasan didapatkan bahwa *die clearance* dan perlakuan panas *annealing* berpengaruh nyata terhadap sudut *springback* yang dihasilkan. Sudut *springback*  $\alpha_2$  meningkat seiring dengan peningkatan *die clearance*, sedangkan sudut *springback*  $\alpha_1$  menurun. Sudut *springback*  $\alpha_1$  terbesar dihasilkan oleh benda kerja tanpa perlakuan panas *annealing*, *die clearance* 10% dengan nilai penyimpangan sebesar 2,28°. Sedangkan Sudut *springback*  $\alpha_2$  terbesar dihasilkan oleh benda kerja dengan perlakuan panas *annealing*, *die clearance* 40% dengan nilai penyimpangan sebesar 7,32°.

Kata kunci : *die clearance*, *springback*, *deep drawing*, aluminium paduan, *annealing*.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Berbagai macam jenis baja (Ultra HSS, Advance HSS, dan lain – lain) telah banyak digunakan dalam sepuluh tahun terakhir ini sebagai solusi untuk bahan yang memiliki bobot ringan dalam struktur kendaraan. Pengurangan bobot kendaraan memiliki keuntungan diantaranya menghemat bahan bakar. Pengurangan bobot kendaraan tidak bisa sembarangan dilakukan karena harus memenuhi beberapa kriteria, diantaranya adalah harus aman digunakan, harga terjangkau, dan memiliki karakteristik material yang paling tidak sama atau bahkan lebih baik dari material yang digantikan. Aluminium merupakan logam yang memiliki karakteristik ringan, kuat, tahan terhadap korosi, mampu mesin yang baik, mempunyai konduktivitas termal dan konduktivitas listrik yang baik, dan memiliki *fatigue strength* yang sebanding dengan baja. Oleh karena itu, aluminium merupakan material yang tepat untuk menggantikan baja dalam industri otomotif (Thomas,2001).

Kendala utama dalam proses produksi dalam industri otomotif adalah cacat produk selama proses pembentukan. *Springback* merupakan satu diantara cacat produk yang menjadi permasalahan utama. *Springback* sendiri adalah perubahan dimensi pada hasil pembentukan setelah penekanan ditiadakan. Perubahan ini merupakan akibat dari perubahan regangan yang dihasilkan oleh pemulihan elastik. *Springback* banyak dijumpai pada proses *bending* dan *deep drawing*. *Deep drawing* merupakan proses produksi yang dapat menghasilkan produk akhir berupa plat yang cekung maupun lekuk di tengahnya. Dalam memprediksi ada tidaknya *springback*, perlu dipertimbangkan faktor parameter proses, *tooling shape*, dan mekanika dari *springback*, yaitu proses dari pemulihan elastis / deformasi elastis (Buranathiti, 2004 : 138).

Pada penelitian sebelumnya, Adi Prasetya (2003) melakukan penelitian tentang optimalisasi kelonggaran *die* (*die clearance*) plat U pada proses *deep drawing* dengan menggunakan metode elemen hingga telah mendapatkan bahwa kelonggaran *die* yang optimal pada proses *deep drawing* adalah 5%. Tetapi hal ini masih menggunakan simulasi 2-dimensi sehingga masih dianggap kurang akurat.

Pada penelitian selanjutnya, Abidin (2005) melakukan riset ulang tentang optimalisasi kelonggaran *dies* plat U pada proses *deep drawing* dengan menggunakan simulasi 3-dimensi dan mendapatkan bahwa kelonggaran optimal yang bisa didapatkan

dalam proses *deep drawing* adalah kelonggaran *die* 20%. Dari penelitian tersebut masih belum dibandingkan dengan eksperimental murni dan masih belum dihubungkan dengan *springback*, yang kemungkinan dapat terjadi pada proses *deep drawing* sehingga optimalisasi kelonggaran *die* yang ada belum tentu menjadi optimalisasi dalam proses produksi dengan menggunakan proses *deep drawing*.

Buranathiti (2004) meneliti tentang pengaruh *tooling shape*, terutama mengenai *die clearance/ gap* dan *die radius* pada material HS110 dan *mild steel* terhadap hasil pembentukan. Dengan membandingkan anatara model analisis dengan eksperimen, didapatkan kesimpulan bahwa dengan *gap* dan *radius die* yang semakin kecil akan menimbulkan *springback* yang semakin kecil pula.

Nuruddin (2005) dalam penelitiannya untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap *springback* pada proses *bending* dengan menggunakan material JIS G 3131 SPHC mendapatkan hasil bahwa nilai *springback* yang terjadi akan lebih kecil pada material dengan perlakuan panas daripada material tanpa perlakuan panas *annealing*.

Dari beberapa uraian diatas ada beberapa hal yang belum diteliti yang salah satunya adalah optimalisasi *die* pada proses *deep drawing* dengan memperhatikan faktor *springback*. Maka diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh kelonggaran *die* (*die clearance*) terhadap *springback* dalam proses *deep drawing* pada material aluminium yang telah di *annealing* sehingga didapatkan hasil *deep drawing* yang maksimal.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut: Bagaimanakah pengaruh kelonggaran *die* (*die clearance*) terhadap *springback* pada proses *deep drawing* U-profile material aluminium paduan yang telah di *annealing*?

### 1.3 Batasan Masalah

Agar dalam menganalisa pembahasan menjadi lebih spesifik dan terarah maka dalam penelitian ini perlu adanya beberapa batasan masalah. Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Material yang digunakan adalah aluminium paduan
- Material dianggap homogen dan isentropik
- Pemanasan dianggap merata
- Tidak membahas perubahan struktur dari material
- Kelonggaran *die* yang dipakai adalah 10%, 20%, 30% dan 40% lebih besar dibanding tebal *blank* (dieter, 1988; 275).
- Objek penelitian ini adalah pada *springback* dalam perubahan sudut (sudut antara dinding dengan *flange* dan antara dinding dengan dasar)
- Benda kerja dianggap simetris

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh antara *die clearance* (kelonggaran *die/gap*) terhadap *springback* yang terjadi pada proses *deep drawing*. Selain itu, untuk mengetahui pengaruh temperatur pemanasan terhadap *springback* untuk material aluminium pada proses *deep drawing*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan kontribusi dalam dunia pendidikan untuk memahami proses *deep drawing* pada material aluminium.
2. Untuk pengembangan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh *die clearance* pada proses pembentukan logam *sheet*.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Aluminium

Paduan aluminium diklasifikasikan dalam berbagai standar oleh beberapa negara di dunia. Tetapi saat ini klasifikasi yang digunakan dan sempurna adalah standar *Aluminium Association* (AA) di Amerika (Surdia, 1986:135). Standar AA menggunakan penandaan dengan 4 angka, yaitu angka pertama menyatakan sistem paduan dengan unsur tambahannya. Berikut klasifikasi aluminium *alloy* dengan standar AA dengan unsur paduannya :

1. 1XXX = merupakan jenis aluminium paduan dengan kadar aluminium 99,00%. Dalam jenis ini disamping sifat tahan karatnya yang baik, paduan aluminium jenis ini juga merupakan konduktor panas dan listrik yang baik. Dapat dilakukan pengerjaan pengerasan, dan mampu mesin yang tinggi. Kekurangannya adalah memiliki kekuatan yang rendah.
2. 2XXX = paduan Al - Cu. Merupakan jenis *heat-treatable* (dapat dilakukan proses pemanasan pengerasan) . Cu berguna untuk meningkatkan kekerasan dari aluminium. Memiliki daya tahan korosi yang rendah bila dibandingkan dengan jenis paduan lainnya. Sifat mampu lasnya juga kurang baik, karena itu jenis paduan ini biasanya digunakan pada konstruksi keling di dalam konstruksi pesawat seperti duralumin (AA 2017) dan super duralumin (AA 2024).
3. 3XXX = paduan Al - Mn. Jenis *nonheat-treatable* sehingga untuk menaikkan kekuatan hanya dapat diusahakan melalui pengerjaan dingin dalam proses pembuatannya. Mn disini berfungsi untuk meningkatkan sifat tahan korosi dari aluminium. Sifat yang sama dengan tipe 1XXX dalam hal tahan korosi, mampu potong, dan sifat mampu lasnya. Banyak digunakan untuk pipa, tangki minyak.
4. 4XXX = paduan Al - Si. *Heat-treatable*. Si dapat menurunkan temperatur leleh dari aluminium dan meningkatkan sifat mampu alir. Jenis ini dalam keadaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik. Digunakan sebagai bahan alam logam las dalam pengelasan paduan aluminium baik paduan cor maupun paduan tempa.
5. 5XXX = paduan Al - Mg. *Nonheat-treatable*. Mg berguna dalam meningkatkan sifat mampu bentuk dan mampu las dari aluminium. Mempunyai sifat yang baik dalam daya tahan korosi, terutama korosi air laut, dan dalam sifat mampu lasnya paduan Al-Mg ini banyak digunakan dalam konstruksi umum, juga untuk tangki penyimpanan gas alam cair dan oksigen cair.

6. 6XXX = paduan Al – Mg – Si. *Heat-treatable*. Magnesium dan silicon membentuk senyawa  $Mg_2Si$  (magnesium silisida) yang memberikan kekuatan tinggi pada paduan ini setelah proses *heat treatment*. Mempunyai sifat mampu potong, mampu las, dan daya tahan korosi yang cukup baik. Kekurangannya adalah terjadinya pelunakan pada daerah las sebagai akibat dari panas pengelasan yang bermasalah.
7. 7XXX = paduan Al – Zn. *Heat-treatable*. Biasanya dalam paduan pokok Al-Zn ditambahkan Mg, Cu, Cr. Kekuatan tarik yang dapat dicapai  $> 50 \text{ kg/m}^2$ , sehingga paduan ini dinamakan juga *ultra duralumin*. Berlawanan dengan kekuatan tariknya, sifat mampu las dan daya tahan terhadap korosi kurang baik.

## 2.2. Heat Treatment pada Aluminium

Proses *heat treatment* merupakan suatu proses yang mengacu pada proses pemanasan, penahanan temperatur pemanasan dan pendinginan, dengan tujuan untuk mengubah sifat mekanik dan struktur mikro dari suatu material. *Heat treatment* pada aluminium umumnya bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan aluminium. Jenis aluminium yang termasuk dalam kelompok yang dapat di-*heat treatment* adalah aluminium seri 2xxx, 4xxx, 6xxx dan 7xxx. Sedangkan kelompok aluminium lainnya untuk tujuan yang sama hanya dapat dilakukan melalui proses *cold working*.

Proses *heat treatment* untuk mengurangi kekuatan dan meningkatkan keuletan dilakukan dengan *annealing*. *Annealing* adalah salah satu dari proses perlakuan panas yang bertujuan untuk melunakkan material, meningkatkan keuletannya, mengurangi tegangan dalam, menghaluskan ukuran butiran, dan meningkatkan sifat mampu mesin. Prosesnya dengan memanaskan material sampai suhu tertentu, lalu ditahan beberapa saat pada temperatur tersebut selama beberapa waktu kemudian didinginkan secara perlahan dalam dapur pemanas. Digunakan oleh kedua jenis aluminium (*cast* maupun *wrought aluminium*). Sedangkan proses *heat treatment* untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan aluminium dilakukan dalam 3 langkah yaitu *solution heat treatment*, *quenching* dan *age hardening*.

### 2.3. Proses Pembentukan Logam

Prinsip dasar dari proses pembentukan logam adalah melakukan perubahan bentuk pada benda kerja dengan cara memberikan gaya luar sehingga terjadi deformasi plastis. Pengklasifikasian proses pembentukan logam dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Klasifikasi Proses Pembentukan Logam

Klasifikasi	Proses
Berdasarkan daerah temperatur pengerjaan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pengerjaan panas</li> <li>- pengerjaan dingin</li> </ul>
Berdasarkan jenis gaya pembentukan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pembentukan dengan tekanan                             <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>forging</i></li> <li>2. <i>rolling</i></li> <li>3. <i>extruding</i></li> </ol> </li> <li>- pembentukan dengan tekanan dan tarikan                             <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>wire drwing</i></li> <li>2. <i>tube drawing</i></li> <li>3. <i>deep drawing</i></li> </ol> </li> <li>- pembentukan dengan tarikan                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>stretch forming</i></li> </ul> </li> <li>- pembentukan dengan tekukan                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>bending</i></li> </ul> </li> </ul>
Berdasarkan bentuk benda kerja	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pembentukan benda kerja pejal</li> <li>- pembentukan benda kerja pelat</li> </ul>
Berdasarkan tahapan produk	<ul style="list-style-type: none"> <li>- proses pembentukan primer</li> <li>- proses pembentukan sekunder</li> </ul>

Sumber: Siswosuwarno, 1985 :5

#### 2.3.1. Proses Pengerjaan Panas

Proses pengerjaan panas didefinisikan sebagai proses pembentukan yang dilakukan di atas suhu rekristalisasi dari logam benda kerja. Sedangkan temperatur rekristalisasi sendiri adalah temperatur saat mulai terjadinya nukleasi inti – inti baru atau temperatur saat mulai pertumbuhan kristal baru dari kristal yang telah mengalami deformasi.

Temperatur rekristalisasi dinyatakan dalam temperatur absolut (Kalpakjian, 1991)

$$T_R = 0,5.T_M \quad (2 - 1)$$

dengan :

$$T_R = \text{Temperatur rekristalisasi} \quad (\text{K})$$

$$T_M = \text{Temperatur lebur logam} \quad (\text{K})$$

Karakteristik proses pengerjaan panas :

- Energi pembentukan yang diperlukan lebih kecil dari energi pembentukan pada proses pengerjaan dingin
- Membutuhkan peralatan yang tidak terlalu berat seperti pada proses pengerjaan dingin
- Pembentukan dengan deformasi plastis yang besar tanpa ada retak maupun *strain hardening*
- Digunakan pada proses pembentukan primer
- Akibat adanya pemanasan akan memperbaiki struktur butiran
- Dapat menghasilkan berbagai macam bentuk dengan mudah

### 2.3.2. Proses Pengerjaan Dingin

Proses pengerjaan dingin adalah proses yang dilakukan pada daerah temperatur di bawah temperatur rekristalisasi (daerah temperatur rendah). Pada kondisi ini logam yang dideformasi mengalami pengerasan regangan (*strain-hardening*). Untuk benda kerja dengan bentuk pelat, proses deformasi yang dilakukan hanyalah dengan proses pengerjaan dingin. Hal ini dikarenakan apabila pelat mengalami proses pembentukan, misalnya pengerolan, temperturnya akan cepat turun di bawah temperatur rekristalisasi.

#### a) Kelebihan proses pengerjaan dingin

- Kondisi permukaan produk lebih baik karena tidak ada kerak/ sisik akibat oksidasi saat pemanasan
- Naiknya kekerasan dan keuletan logam
- Tanpa pemanasan dan kontrol dimensi lebih baik

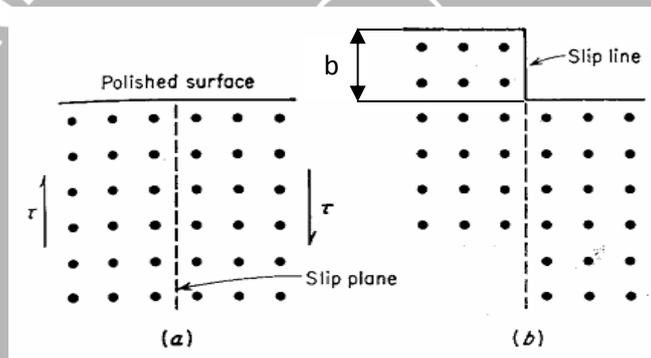
#### b) Kekurangan proses pengerjaan dingin

- Perlu gaya yang lebih besar daripada proses pengerjaan panas
- Perlu peralatan yang lebih kuat
- Sebelum proses, permukaan harus bersih dari terak
- Benda kerja makin getas akibat *strain hardening*
- Adanya tegangan sisa (*residual stress*)

### 2.4. Mekanisme Deformasi

Secara umum deformasi adalah perubahan bentuk dan ukuran. Perubahan yang terjadi dapat dibedakan menjadi deformasi elastis dan deformasi plastis. Kedua perubahan bentuk ini disebabkan bergesernya kedudukan atom – atom dari tempat semula. Pada deformasi elastis adanya tegangan membuat atom – atom akan bergeser ke tempat kedudukan yang baru, dan akan kembali ke tempat kedudukan semula apabila tegangan itu diiadakan. Jarak pergeseran atom pada deformasi elastis relatif kecil.

Atom – atom pada deformasi plastis, akan bergeser menempati tempat kedudukan yang baru dan tidak akan kembali ke tempat semula meskipun beban dihilangkan. Atom ini akan stabil berada di tempat yang baru dikarenakan tempat yang baru itu adalah posisi atom pada sel satuannya. Pada gambar 2.1 terlihat atom bergeser sebesar  $b$  (satu satuan kisi). Model pergeseran atom ini disebut dengan *slip*.

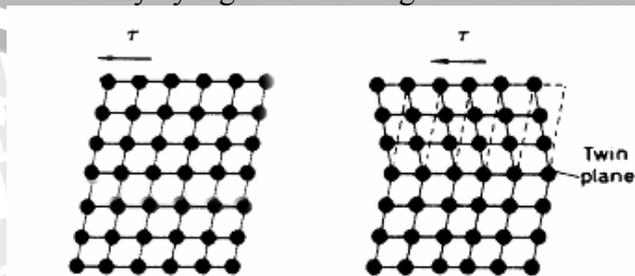


Gambar 2.1 Pergeseran atom di daerah plastis (*slip*)

- (a) tegangan geser dilakukan pada logam
- (b) terjadi *slip* ketika nilai dari tegangan geser melebihi batas kritis

Sumber: Dieter, 1988 :115

Deformasi dapat pula disebabkan oleh mekanisme kembaran (*twinning*). Secara skematis terlihat pada gambar 2.2. Dikarenakan adanya tegangan geser maka sederetan bidang atom akan berpindah tempat. Tempat kedudukan atom – atom yang baru adalah simetris terhadap kedudukannya yang lama. Bidang simetri ini disebut bidang kembaran (*twin plane*)

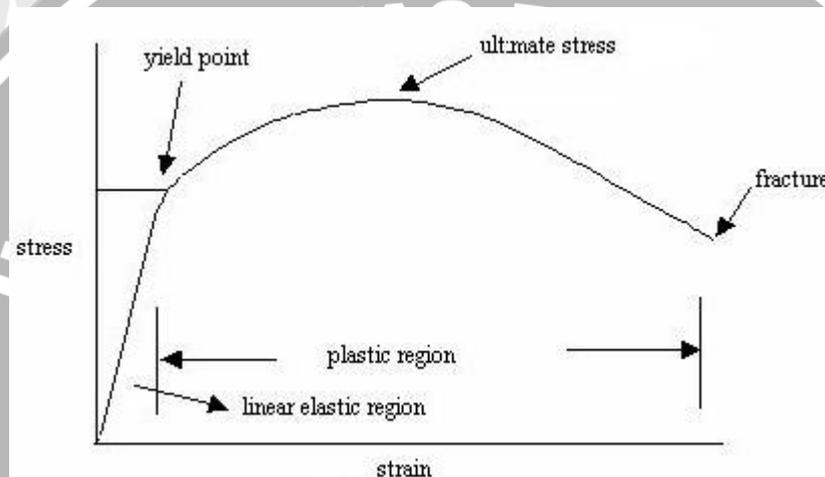


Gambar 2.2 Pergeseran atom pada gerakan kembaran (*twinning*)

Sumber: Smallman, 1999 :203

### 2.4.1. Pengertian Deformasi Elastis dan Plastis

Deformasi elastis adalah perubahan bentuk yang terjadi apabila ada gaya yang bekerja pada material dan akan hilang jika gaya itu ditiadakan. Sehingga material akan kembali ke bentuk dan ukuran semula bila gaya ditiadakan. Sedangkan deformasi plastis adalah perubahan bentuk yang sifatnya permanen, walaupun beban gaya dihilangkan. Apabila material dibebani sampai daerah plastis, perubahan bentuk yang terjadi adalah gabungan antara deformasi plastis dan deformasi elastis, dan saat beban dihilangkan maka perubahan bentuk yang ada hanya deformasi plastis saja.



Gambar 2.3 Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan

Sumber: mmd.sdsmt.edu

Pada gambar 2.3 dapat dilihat bahwa *linear elastic region* adalah garis yang berhubungan dengan Modulus elastisitas.

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

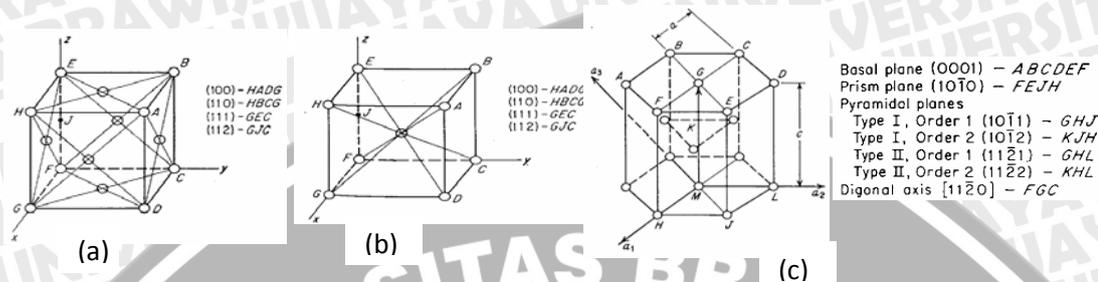
dengan :

- E = modulus elastisitas (N/m<sup>2</sup>)
- σ = tegangan (N/m<sup>2</sup>)
- ε = regangan

### 2.4.2. Mekanisme Slip

Atom – atom logam tersusun secara teratur mengikuti pola geometris tertentu. Pola geometris yang terkecil dan berulang disebut sel satuan. Apabila ada tegangan geser yang besar, maka sederetan atom akan bergeser dan berpindah serta akan menempati kedudukannya yang baru. Pergeseran atom ini menyebabkan pemutusan

ikatan atom. Bidang – bidang atom yang mudah bergeser adalah atom yang memiliki jarak yang berjauhan satu sama lain. Pergeseran atom ini mempunyai arah dan disebut arah slip. Bidang slip dan arah slip yang mudah terjadi adalah arah yang paling padat di dalam bidang slip. Bidang slip dan arah slip membentuk sistem slip.



Gambar 2.4 Beberapa struktur atom yang biasa dikenal  
 (a) Face-centered cubic (FCC) ;(b) Body-centered cubic (BCC) ;  
 (c) Hexagonal-closed packed (HCP)

Sumber: Dieter, 1988 :105,107

### 2.4.3. Hubungan antara Deformasi dengan Teori Dislokasi

Dengan model logam sempurna tanpa cacat, kekuatan geser teoritis dapat dihitung dengan persamaan (Dieter, 1988:119)

$$\tau_m = \frac{G}{2\pi} \tag{2-3}$$

dengan:

$G$  = modulus geser (N.mm<sup>-2</sup>)

$\tau_m$  = Tegangan geser teoritis (N.mm<sup>-2</sup>)

Modulus geser untuk logam adalah sekitar 20 – 150 GPa. Dengan persamaan di atas maka didapatkan kekuatan geser teoritis sekitar 3 – 30 GPa, sedangkan harga tegangan geser yang diperlukan untuk menghasilkan deformasi plastis adalah sekitar 0,5 – 10 MPa. Kekuatan geser teoritis setidaknya 100 kali lebih besar daripada kekuatan geser yang diamati. Oleh sebab itu maka dapat disimpulkan bahwa terjadi suatu cacat (dislokasi) pada logam yang mengalami tegangan geser.

Karena terdapat perbedaan antara tegangan geser teoritis dan tegangan geser yang diamati maka dikembangkan teori dislokasi. Adanya dislokasi akan memudahkan terjadinya slip. Model gerakan dislokasi sisi pada bidang slip sebagai akibat dari tegangan geser dapat dilihat pada gambar 2.5 (a). Dislokasi yang mencapai titik luar diartikan mengalami deformasi, meskipun dalam skala kecil.



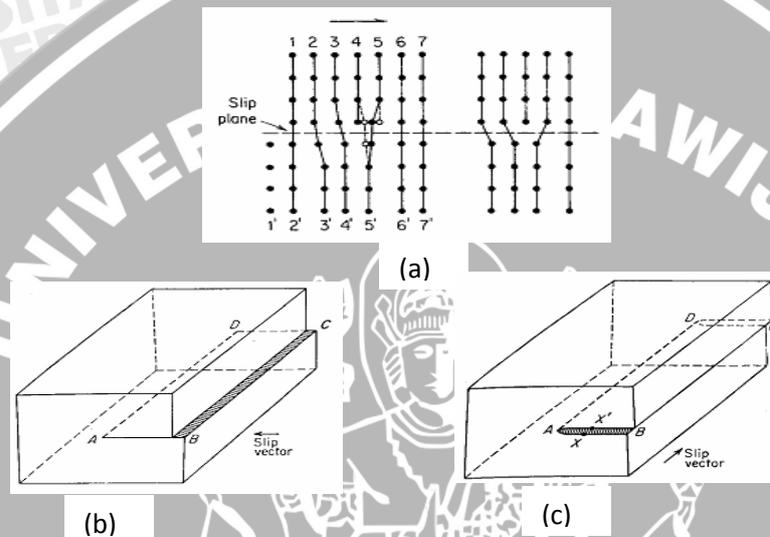
Dislokasi dapat dibedakan menjadi dua jenis (Siswosuwarno, 1985:26) :

1. Dislokasi sisi

- garis dislokasi tegak lurus terhadap vektor slipnya (vektor Burger)
- arah gerakan dislokasi searah dengan vektor Burger

2. Dislokasi ulir

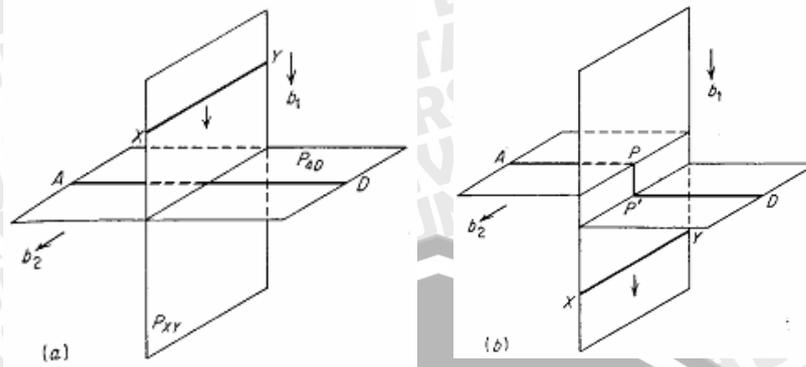
- garis dislokasi searah dengan vektor slipnya (vektor Burger)
- arah gerakan dislokasi tegak lurus dengan vektor Burger



Gambar 2.5 (a) Gerakan atom pada dislokasi dalam slip ;(b) Dislokasi sisi ; (c) Dislokasi ulir

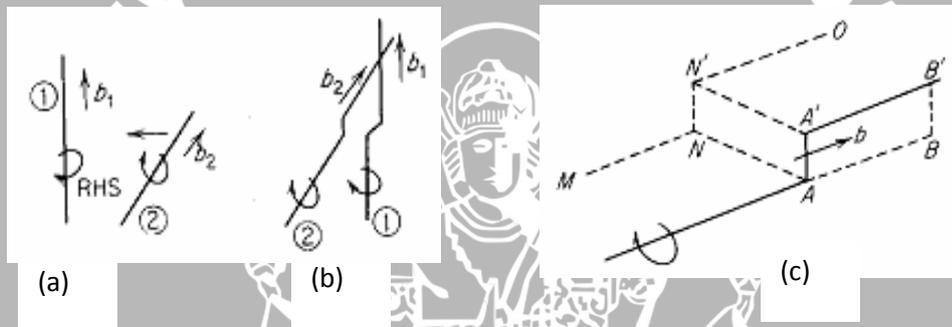
Sumber: Siswosuwarno, 1985:27

Pada logam yang mengalami proses *annealing*, kerapatan dislokasinya sekitar  $10^5$  sampai  $10^6$  per  $\text{cm}^2$  (Siswosuwarno, 1985:29) Logam yang lunak setelah mengalami proses *annealing*, dideformasi sehingga dislokasinya bergerak ke permukaan luar. Dalam dislokasi ini terjadi reaksi – reaksi, seperti garis dislokasi yang berpotongan. Reaksi ini ada yang mudah bergerak, ada yang tidak mudah bergerak. Reaksi – reaksi ini dapat dilihat pada gambar 2.6 dan 2.7.



Gambar 2.6 Reaksi dislokasi sisi dengan dislokasi sisi  
 (a) Sebelum berpotongan ;  
 (b) Sesudah berpotongan masih bisa bergerak pada bidang slip

Sumber: Siswosuwarno, 1985:30



Gambar 2.7 Reaksi dislokasi ulir dengan dislokasi ulir  
 (a) Sebelum berpotongan ; (b) Sesudah berpotongan ;  
 (c) Hasil reaksi tidak mudah bergerak

Sumber: Siswosuwarno, 1985:30

#### 2.4.4. Tegangan Sisa

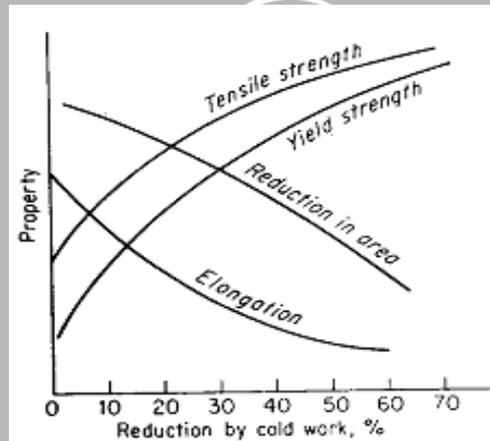
Tegangan sisa (*residual stress*) merupakan tegangan yang terdapat pada benda tanpa dikenai beban luar, dapat berupa tegangan sisa tarik dan tegangan sisa tekan yang ditimbulkan oleh adanya deformasi plastis tak seragam akibat operasi mekanik atau termal yang dilakukan dalam proses pembentukan (Dieter, 1992). Adanya tegangan sisa tekan dapat meningkatkan sifat ketangguhan dan kemampuan bahan untuk menahan *fatigue*, sedangkan tegangan sisa tarik sangat dihindari karena dapat mempermudah timbulnya cacat (*crack*) pada benda kerja saat proses pembentukan.

Pada proses *bending* ketika beban yang diberikan dihilangkan bagian yang terdeformasi elastis akan cenderung untuk kembali ke bentuk semula, sedangkan bagian yang terdeformasi plastis cenderung untuk mempertahankan bentuk akhir

pembengkokan. Hasilnya, bagian yang terdeformasi plastis akan mencegah daerah elastis untuk mengalami pengembalian kondisi elastis secara sempurna. Sehingga daerah yang terdeformasi elastis tersebut berada dalam keadaan tegangan sisa tarik, sedangkan daerah yang terdeformasi plastis akan dalam keadaan tegangan sisa tekan untuk menyeimbangkan tegangan pada luasan penampang material.

### 2.5. Pengaruh Pengerjaan Dingin Terhadap Sifat Logam

Deformasi yang terjadi pada temperatur di bawah temperatur rekristalisasi akan menyebabkan naiknya kekuatan dan kekerasan tetapi menurunkan keuletan. Perubahan sifat itu dapat dilihat pada gambar 2.8. Kenaikan kekuatan setiap jenis logam dan paduannya sebagai akibat pengerjaan dingin sangat bergantung pada kenaikan kerapatan dislokasinya.



Gambar 2.8 Perubahan sifat mekanik akibat pengerjaan dingin

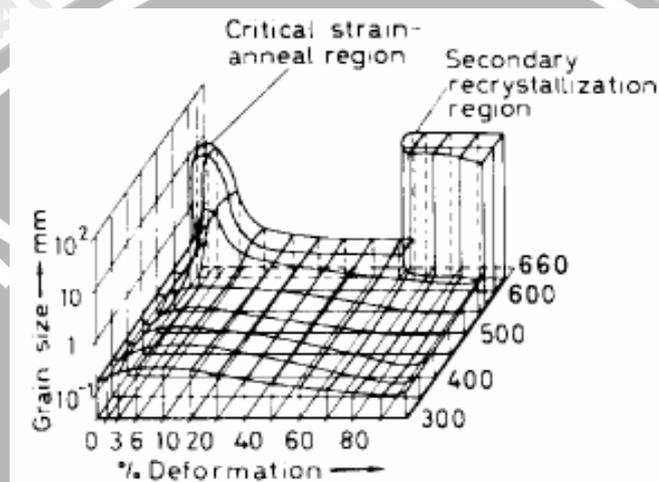
Sumber: Dieter, 1988 :232

### 2.6. Pengaruh Deformasi dan Pemanasan Terhadap Besar Butir

Deformasi yang semakin besar membuat energi dalam akan bertambah tinggi. Dan nukleasi butir – butir baru dimulai pada tempat yang tingkat energinya tinggi. Dapat dikatakan bahwa logam yang besar deformasinya akan mempunyai inti baru bila dipanaskan sampai temperatur rekristalisasi. Inti itu akan tumbuh dan rekristalisasi akan sempurna bila butir – butir baru telah bertemu satu dengan yang lain.

Rekristalisasi logam yang telah mengalami deformasi akan menghasilkan butir yang semakin halus bila deformasinya semakin besar. Demikian pula sebaliknya, deformasi yang kecil akan menghasilkan butir yang kasar. Secara skematis dapat dilihat pada gambar 2.9. Pada gambar 2.9 juga ditunjukkan pengaruh regangan dan

temperatur pemanasan terhadap besar butir pada aluminium. Terlihat bahwa adanya daerah yang rekristalisasinya menghasilkan butir yang kasar, yaitu pada keadaan dengan deformasi yang besar dan dipanaskan pada temperatur yang tinggi. Keadaan ini disebut *secondary recrystallization* (rekristalisasi sekunder). Pada keadaan rekristalisasi sekunder terjadi penggantian butir – butir yang halus dengan butir – butir yang kasar, yang mengesankan adanya pertumbuhan atau pengkasaran butir.

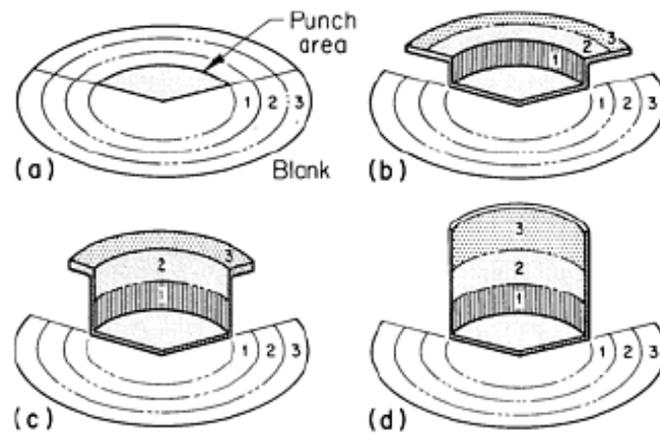


Gambar 2.9 Perubahan sifat mekanik akibat pengerjaan dingin

Sumber: Smallman, 1999 :244

## 2.7. Deep Drawing

*Deep drawing* adalah suatu proses dimana sebuah *blank* ditekan melalui *die* oleh *punch* untuk membentuk komponen yang cekung atau lekuk dimana ketebalannya sama dengan tebal *blank* awal. Secara garis besar tahapan proses *deep drawing* dapat dijelaskan sebagai berikut :



Gambar 2.10. Aliran *sheet metal* selama *drawing*  
 (a) *Blank* sebelum dikenai gaya *drawing* .  
 (b) *Blank* setelah dikenai gaya hingga luasan 1 masuk ke dalam  
 (c) *Blank* setelah dikenai gaya hingga luasan 1 dan 2 masuk ke dalam  
 (d) *Blank* setelah semua luasan menjadi dinding tabung

Sumber : ASM Handbook Vol.14, 1993 : 1265

**Kontak Awal**

Dimana *punch* bergerak dari atas ke bawah hingga akhirnya *punch* menyentuh permukaan dari *blank*.

**Bending**

*Punch* terus menekan kebawah sehingga posisi *punch* lebih dalam melebihi jari-jari (R) dari *die*, sedangkan posisi *die* tetap tidak bergerak ataupun berpindah tempat.

**Straightening**

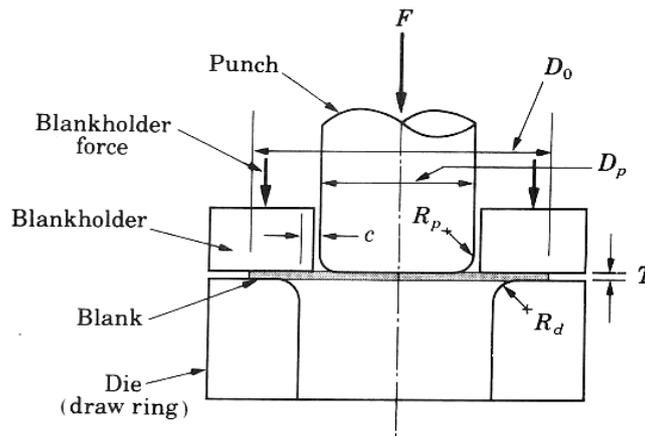
Gerakan *punch* ke bawah akan menghasilkan pelurusan sepanjang dinding *die* pada bagian yang sebelumnya mengalami *bending* pada radius *die* ( gambar 2.10 : c ).

**Compression**

Daerah *blank* yang masih berada pada *blankholder* akan mengalami *compression* arah radial mengikuti bentuk dari *die*.

**Tension**

Tegangan tarik terbesar terjadi pada bagian bawah cup produk hasil *drawing*.



Gambar 2.11. Skema ilustrasi proses *deep drawing*

Sumber : Kalpakjian, 1990 : 474

Pada gambar 2.11 dapat dilihat bahwa komponen utama pada mesin *deep drawing* adalah *punch*, *die*, dan *blankholder*. Sedangkan simbol – simbol dalam gambar adalah radius *punch* ( $R_p$ ), radius *die* ( $R_d$ ), *clearance* ( $c$ ), tebal *blank* ( $T$ ), diameter awal *blank* ( $D_0$ ), diameter *punch* ( $D_p$ ), dan gaya penekanan ( $F$ ).

## 2.8. Analisis Variabel – Variabel *Drawing*

### 2.8.1. Radius *Punch*

Besarnya radius *punch* dipengaruhi oleh radius *die*. Radius *punch* yang kecil akan memperbesar gaya bending yang dibutuhkan untuk proses *drawing*.

### 2.8.2. Radius *Dies*

Besar radius *dies* tergantung pada ukuran benda kerja dan ketebalan *blank*. Hubungan diantara keduanya adalah semakin besar radius *dies* maka akan menurunkan beban *drawing*. Tetapi radius *dies* yang besar berakibat berkurangnya kontak antara *blankholder* dan *flange*, sehingga kemungkinan dapat menyebabkan terjadinya kerutan (*wrinkle*). Persamaan secara empiris untuk menghitung radius *die* dapat didekati dengan persamaan, yaitu (Eary 1977,113) :

$$R_D = 2t \text{ sampai dengan } 14t \quad (\text{mm}) \quad (2 - 4)$$

dengan :

$$t = \text{tebal blank} \quad (\text{mm})$$

### 2.8.3. Gaya Blankholder

Pada daerah *flange* terjadi tegangan tekan pada arah melintang, yang dinamakan dengan tegangan tangensial. Tegangan ini dapat menimbulkan kerutan (*wrinkle*). Kerutan ini bisa dihindari dengan menggunakan *blankholder*. Besar gaya *blankholder* akan mempengaruhi besar gaya *drawing* yang berakibat terhadap hasil produk. Gaya *blankholder* akan menambah gaya gesek antara permukaan *die* dan *blank*.

Rumus yang digunakan untuk menghitung gaya *blankholder* adalah (Lange, 1985 : 201) :

$$F_{BH} = A_{BH} \cdot p_{BH} \quad (N) \quad (2-5)$$

dengan :

$F_{BH}$  = gaya *blankholder*

$A_{BH}$  = luas kontak *blankholder* dengan *blank*

$$= \frac{\pi}{4} [d_0^2 - (D + 2r_D)^2] \quad (mm^2)$$

$p_{BH}$  = tekanan *blankholder* (N.mm)

$d_0$  = diameter *blank* (mm)

$D$  = diameter *punch* (mm)

$r_D$  = radius *die* (mm)

Rumus yang digunakan untuk menghitung tekanan *blankholder* adalah :

$$p_{BH} = 10^{-3} \cdot c \left[ (\beta - 1)^2 + \frac{0,005 d_0}{s_0} \right] \cdot \sigma_u \quad (2-6)$$

dengan :

$p_{BH}$  = Tekanan *blankholder* (N)

$c$  = faktor yang memiliki harga 2 – 3

$\sigma_u$  = tegangan tarik ultimate (N.mm<sup>-2</sup>)

$\beta$  =  $d_0 / d_1 = \text{drawing ratio}$

Sedangkan untuk material yang berbentuk persegi panjang, persegi, elips, ataupun yang memiliki bentuk yang hampir sama memakai rumusan yang sama dimana radius *die* tidak terlalu kecil, maka rumusan yang digunakan sama seperti pada bentuk silindris (Schuler, 1998:169):

$$d_0 = 1.13 \sqrt{A_{St}} \quad (mm) \quad (2-7)$$

$$D = 1.13 \sqrt{A_Z} \quad (mm) \quad (2-8)$$

dengan :

$$A_{St} = \text{luasan } punch \quad (\text{mm}^2)$$

$$A_z = \text{luasan } blank \quad (\text{mm}^2)$$

### 2.8.4. Drawing Ratio

*Drawing ratio* ( $\beta$ ) memiliki harga dimana besar maksimum adalah antara 1,8 – 2 (tergantung banyak *draw*). Harga  $\beta$  pada proses yang memerlukan beberapa langkah *punch* terhadap perbandingan tebal dan diameter *blank* ( $s_0/d_0$ ) dapat dilihat pada tabel 2.2

Tabel 2.2 Harga  $\beta$  terhadap ( $s_0/d_0$ )

Number of draws	Relative sheet thickness $s_0/d_0 \times 10^{-3}$					
	1.5 – 2.0	1.0 – 1.5	0.6 – 1.0	0.3 – 0.6	0.15 – 0.3	0.08 – 0.15
1	2.00–2.08	1.87-2.0	1.82-1.87	1.72-1.82	1.67-1.72	1.59-1.67
2	1.33-1.37	1.32-1.33	1.28-1.32	1.26-1.28	1.25-1.26	1.22-1.25
3	1.28-1.32	1.26-1.28	1.25-1.26	1.23-1.25	1.22-1.23	1.19-1.22
4	1.25-1.28	1.23-1.25	1.22-1.23	1.20-1.22	1.18-1.20	1.16-1.18
5	1.22-1.25	1.19-1.22	1.18-1.19	1.16-1.18	1.15-1.16	1.14-1.15

Sumber : Lange, 985 : 20.42

Pada rumusan lain, *drawing ratio* dapat dinyatakan sebagai prosentase reduksi. Semakin besar harga prosentase reduksi maka gaya *drawing* juga semakin besar. Dengan demikian, harga prosentase reduksi akan mempengaruhi hasil produksi dan dengan harga prosentase reduksi yang tepat maka cacat produk dapat dihindarkan. Secara teoritis, prosentase reduksi maksimum untuk satu kali penekanan mendekati 50%. Untuk tujuan praktis, baik menggunakan maksimum 40% pada penekanan (*draw*) pertama dan untuk menghitung prosentase reduksi adalah ( Donaldson, 1969 :767) :

$$\%red = \left( \frac{d_0 - d_t}{d_0} \right) \times 100\% \quad (2-9)$$

dengan :

% red = prosentase reduksi

$d_0$  = diameter *blank* (mm)

$d_1$  = diameter dalam benda kerja (mm)

**2.8.5. Kedalaman Penekanan**

Dinyatakan sebagai rasio dari tinggi tabung (h) terhadap diameter tabung(d<sub>t</sub>) juga menunjukkan derajat penekanan yang diperlukan. Tabel 2. 3. menunjukkan jumlah reduksi dan prosentase reduksi yang memungkinkan berdasarkan rasio h/d<sub>t</sub>.

Tabel 2.3. Jumlah dan prosentase reduksi berdasarkan H/d<sub>t</sub>

Ratio h/d	Number of reduction	Reduction %			
		First draw	Second draw	Third draw	Fourth draw
Up to 0.75	1	40			
0.75-1.8	2	40	25		
1.8-3.0	3	40	25	15	
3.0-4.5	4	40	25	15	10

Sumber : Donaldson, 1969 : 77

**2.8.6. Strain Ratio**

Untuk dapat mengetahui ketahanan suatu material terhadap terjadinya penipisan maka dapat digunakan anisotropi normal R material. Semakin tinggi harga R berarti ketahanan material terhadap pengurangan tebal juga meningkat.

Rumus berikut ini dapat digunakan setelah diketahui harga luas dan panjang material sebelum dan sesudah patah pada pengujian tarik, dimana harga R merupakan rata – rata harga R melintang dan memanjang.

$$R = \frac{\Sigma w}{\Sigma L - \Sigma w} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{L}{L_0}\right) - \ln\left(\frac{w}{w_0}\right)} \tag{2-10}$$

dengan :

- R = *strain ratio*
- w<sub>0</sub> = luas penampang sebelum patah (mm<sup>2</sup>)
- w = luas penampang setelah patah (mm<sup>2</sup>)
- L<sub>0</sub> = panjang spesimen sebelum patah (mm)
- L = panjang spesimen setelah patah (mm)



### 2.8.7. Ukuran Blank

Ukuran *blank* dari *drawing* merupakan variabel yang sangat penting dalam segi ekonomi, karena dapat mengurangi ongkos produksi. Sedangkan dari segi proses, diameter *blank* yang besar akan memperbesar nilai *drawing ratio* dan dapat menyebabkan terjadinya retak. Rumus yang digunakan untuk menentukan diameter *blank* adalah sebagai berikut (Schuler, 1998:162):

$$d_0 = \sqrt{d_1^2 + (4 \times d_1 \times h)} \quad (2-11)$$

dengan:

$d_0$  = diameter *blank* (mm)

$d_1$  = diameter dalam tabung (mm)

$h$  = tinggi tabung (mm)

### 2.8.8. Limiting Drawing Ratio

*Limiting Drawing Ratio* adalah kemampuan suatu *sheet metal* untuk didrawing tanpa mengalami sobekan. Harganya dinyatakan dengan rumus (Hosford, 1992 : 278) :

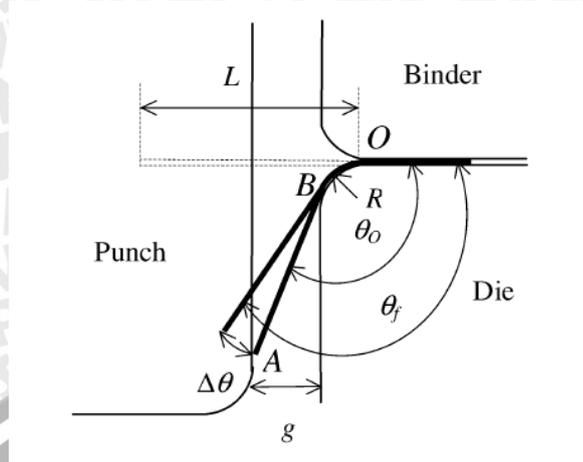
$$LDR = \frac{\text{diameter blank}}{\text{diameter punch}} = \frac{d_0}{d_p} \leq 2 \quad (2-12)$$

dengan :

LDR = *Limiting Drawing Ratio*

### 2.8.9. Die Clearance

Ukuran kelonggaran antara *punch* dan *die* adalah sangat penting sebab sangat berkaitan dengan kemudahan aliran material selama proses *drawing*. Kelonggaran antara *punch* dan *die* atau lebih dikenal dengan nama *clearance / gap* umumnya lebih besar daripada tebal *blank*. Hal ini untuk menampung perubahan tebal dari *blank*. Apabila *clearance* sama dengan atau lebih kecil daripada tebal *blank*, maka akan terjadi *ironing* yang berakibat naiknya gaya *drawing* sehingga kemungkinan terjadi retak semakin besar.



Gambar 2.12. Skema dari proses penekanan *blank*

Keterangan : B = titik pemisahan antara *blank* yang terdeformasi dengan *die*

A = titik sentuh antara *blank* dengan *punch*

O = posisi ujung pengecaman *die*

L = panjang *flange*

g = *gap / clearance* antara *punch* dengan *die*

$\theta_0$  = sudut pembebanan penuh

$\theta_f$  = sudut tanpa pembebanan

$\Delta\theta$  = sudut *springback*

Sumber : Buranathiti, 2004 : 139

Menurut Dieter, dalam proses *deep drawing* komersial, *clearance* antara *punch* dan *die* berkisar antara 10 % sampai 20 % lebih besar dari tebal blank. Pada rumusan lain, Ukuran celah untuk *drawing* dapat ditentukan dari persamaan berikut ini (Lange, 1985 : 20.41) :

$$U_D = S_0 + 0,07 \cdot \sqrt{10 \cdot S_0} \quad (mm) : \text{untuk steel sheet}$$

$$U_D = S_0 + 0,02 \cdot \sqrt{10 \cdot S_0} \quad (mm) : \text{untuk aluminium sheet}$$

$$U_D = S_0 + 0,04 \cdot \sqrt{10 \cdot S_0} \quad (mm) : \text{untuk logam non - besi sheet}$$

$$U_D = S_0 + 0,20 \cdot \sqrt{10 \cdot S_0} \quad (mm) : \text{untuk logam high temperature sheet}$$

dengan :

$$U_D = \text{kelonggaran die - punch / ukuran celah untuk drawing} \quad (mm)$$

$$S_0 = \text{ketebalan blank}$$

Dengan *clearance* yang semakin sempit maka proses *straightening* akan membutuhkan gaya *drawing* yang besar. Selain mempengaruhi gaya *drawing*, *clearance* yang sempit dapat menimbulkan material tersangkut pada *die* ketika proses berakhir. Pada kondisi demikian biasanya terdapat *ejector*, yaitu instalasi tambahan yang terletak pada dasar

dari material yang berfungsi mendorong material menuju permukaan ketika proses *drawing* selesai.

#### 2.8.10. Trim Allowance

Dalam pengerjaan *deep drawing* memerlukan kelebihan *sheet metal* untuk toleransi produk. Tabel 2.4. berikut ini memberikan pedoman untuk menentukan besarnya trim allowance yang bisa diberikan.

Tabel 2.4. *Trim allowance* pada *deep drawing*

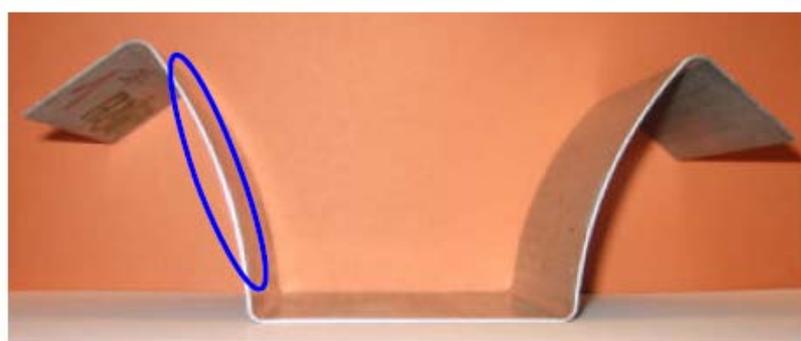
Cup or flange diameter	Trim allowance per side (mm)
Up to 25.4 mm	1.5748
25.4 to 50.8 mm	3.175
50.8 to 101.6 mm	6.35
101.6 to 152.4 mm	12.7
Largest than 152.4mm	25.4

Sumber : Eary.D.E , 1974 :139

#### 2.8.11. Springback

*Springback* adalah perubahan dimensi pada hasil pembentukan setelah penekanan ditiadakan. Perubahan ini merupakan akibat dari perubahan regangan yang dihasilkan oleh pemulihan elastik, berarti pula balikan pegas, dimana akan semakin besar jika rasio tegangan luluh (*yield*) terhadap modulus elastisitas semakin besar. Untuk bahan dan regangan tertentu, *springback* akan bertambah besar dengan perbandingan antara dimensi lateral dan tebalnya.

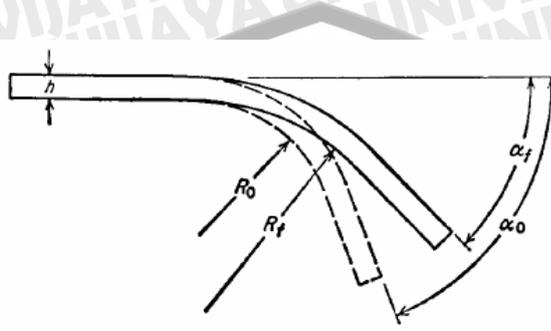
*Springback* terjadi pada semua proses pembentukan, tetapi pada pembengkokan paling mudah diamati.



Gambar 2.13. *Springback* pada proses *u-channel deep drawing*

Sumber : Edurne , 2007 : 137

*Springback* terjadi akibat variasi tegangan setelah proses *bending*, dimana tegangan terbesar yang akan terjadi adalah pada permukaan luar saat ditekuk (yaitu tegangan tarik). Tegangan tarik akan semakin kecil ke arah sumbu normal dan untuk hasil *bending* yang baik, maka tegangan tarik harus lebih rendah dari tegangan *ultimate*, (Lange, 1985 : 60).



Gambar 2.14 *Springback*  
(Sumber: Dieter, 1988 :662)

dengan :

$\alpha_f$  = sudut lengkungan sebelum beban ditiadakan  $(^\circ)$

$\alpha_0$  = sudut lengkungan setelah beban ditiadakan  $(^\circ)$

$R_0$  = jari-jari lengkungan sebelum beban ditiadakan (mm)

$R_f$  = jari-jari lengkungan setelah beban ditiadakan (mm)

$h$  = tebal pelat (mm)

Jari-jari lengkungan sebelum beban ditiadakan ( $R_0$ ) lebih kecil dibandingkan dengan jari-jari lengkungan setelah beban ditiadakan ( $R_f$ ). Namun kemampuan pembengkokan adalah sama antara sebelum dan sesudah pembengkokan. Pendekatan awal dari *springback* pada pembengkokan dapat dinyatakan dengan rumus:

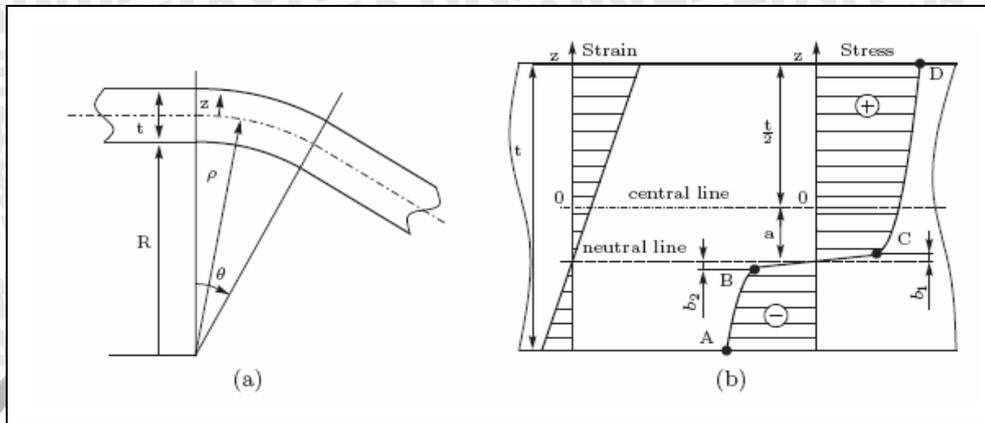
$$\frac{1}{R_f} = \frac{1}{R_0} - \frac{3 \sigma_y}{E \times h} \tag{2-13}$$

dengan:

$E$  = modulus elastisitas [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_y$  = tegangan yield [N/mm<sup>2</sup>]

Pada daerah radius *die* akan terjadi distribusi tegangan regangan karena pengaruh beban bending. Kondisi distribusi tegangan regangan pada daerah radius *die* dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Kondisi Pada Radius *Die*  
 a) Definisi Parameter ; b) Distribusi Tegangan dan Regangan

Sumber: Burchitz, 2008 : 24

## 2.9. Hipotesa

*Springback* terjadi akibat masih adanya regangan elastis sisa di dalam *blank* / material ketika beban dihilangkan dari suatu proses pembentukan. Regangan sisa elastis akan semakin bertambah ketika distribusi tegangan dan regangan semakin berkurang. Distribusi tegangan dan regangan salah satunya dipengaruhi oleh konsentrasi tegangan. Dengan semakin bertambah lebarnya *die clearance* maka akan didapatkan nilai konsentrasi tegangan yang semakin berkurang pula, sehingga distribusi tegangan dan regangan yang dihasilkan akan semakin kecil pula. Dengan semakin bertambah lebarnya *die clearance* maka *springback* yang dihasilkan akan semakin besar.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental nyata dan pengkajian literatur dari berbagai sumber baik dari buku dan jurnal dari internet Metode ini menggunakan analisa varian dua arah dengan interaksi. Pemilihan ini karena percobaan menggunakan dua variabel bebas.

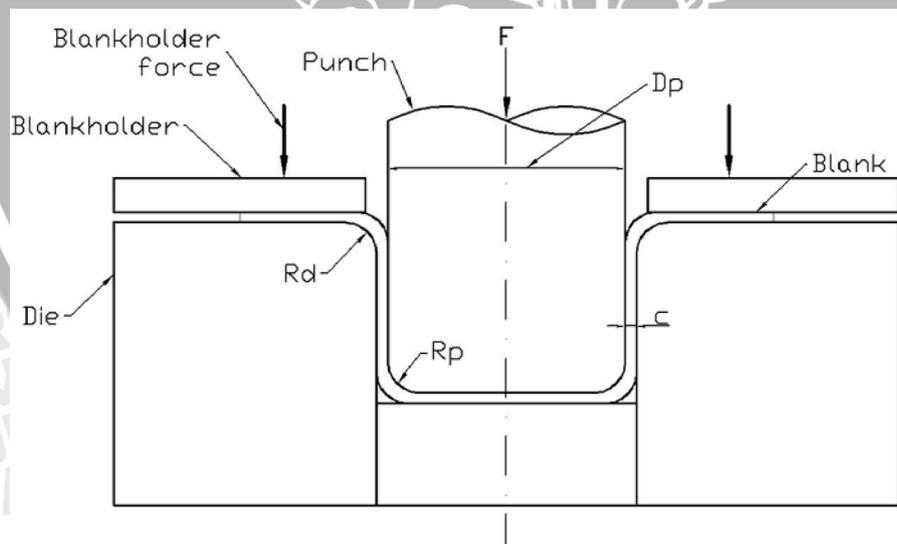
### 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan April 2009. Tempat yang digunakan untuk penelitian yaitu di Laboratorium Pengujian Bahan dan Laboratorium Proses Produksi Teknik Mesin Universitas Brawijaya.

### 3.3 Alat dan Bahan yang Digunakan

#### 3.3.1 Alat yang Digunakan

Peralatan utama yang digunakan untuk penelitian ini adalah 1 unit mesin *deep drawing* yang ditunjukkan pada gambar berikut :

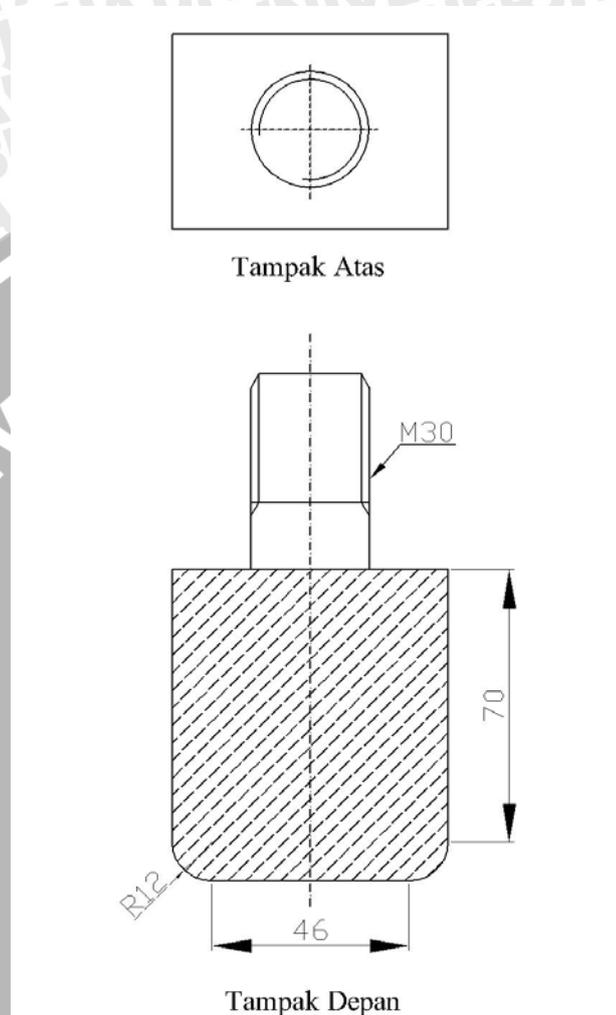


Gambar 3.1. Instalasi mesin *deep drawing*

Rangkaian mesin *deep drawing* ini terdiri dari :

- *Punch*

*Punch* merupakan bagian yang bergerak ke bawah untuk meneruskan gaya dari sumber tenaga sehingga *blank* tertekan ke bawah.



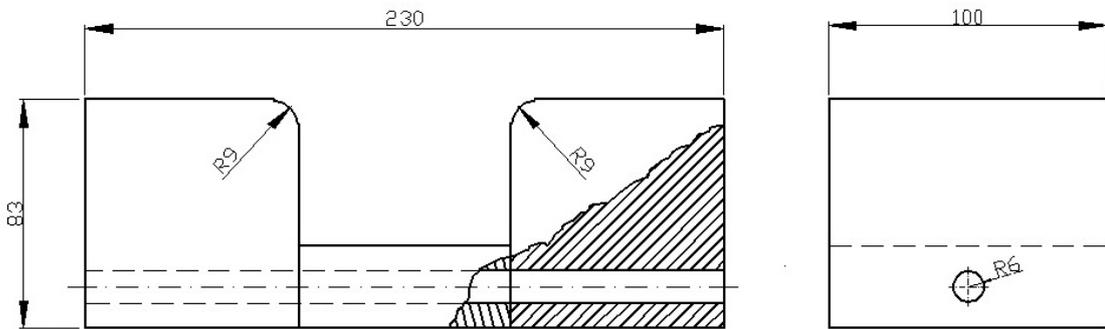
(Satuan dalam mm)

Gambar 3.2. *Punch* pada mesin *deep drawing*

- *Blankholder* dan *Die*

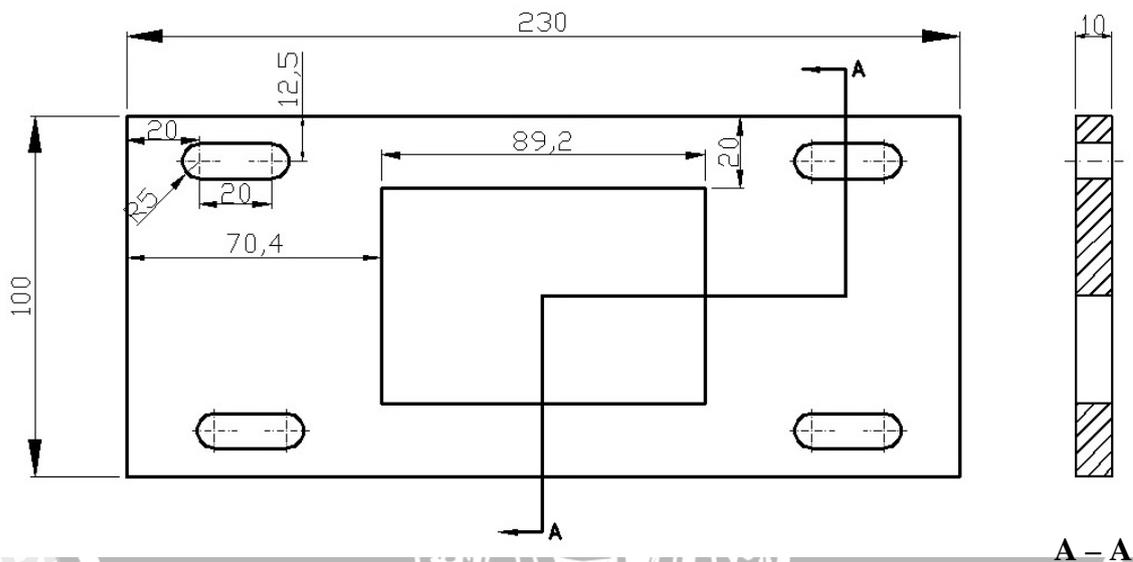
*Blankholder* berfungsi memegang *blank* atau benda kerja berupa lembaran logam, walaupun berfungsi untuk memegang benda kerja, benda kerja harus tetap dapat bergerak saat proses *drawing* dilakukan sebab saat proses *drawing* berlangsung benda kerja yang dijepit oleh *blankholder* akan bergerak ke arah pusat sesuai dengan bentuk dari *die drawing*.

Die merupakan komponen utama yang berperan dalam menentukan bentuk akhir dari benda kerja *drawing* (*draw piece*), bentuk dan ukuran *die* bervariasi sesuai dengan bentuk akhir yang diinginkan.



(Satuan dalam mm)

Gambar 3.3. Die pada mesin *deep drawing*



(Satuan dalam mm)

Gambar 3.4 Blankholder pada mesin *deep drawing*

- Dapur Pemanas  
Merupakan alat yang digunakan untuk memberikan perlakuan panas pada material.



Gambar 3.5. Dapur pemanas

- Mesin Press  
Merupakan alat bantu yang digunakan untuk memberikan tekanan pada *punch* pada waktu melakukan proses *deep drawing*.



Gambar 3.6. Mesin Press

- Peralatan penunjang lainnya yang dipergunakan dalam penelitian ini antara lain :
  - a. Penggaris dan spidol marker
  - b. Kamera digital
  - c. Gunting Pelat
  - d. Program *Autocad* 2009
  - e. Scanner

### 3.3.2 Bahan yang Digunakan

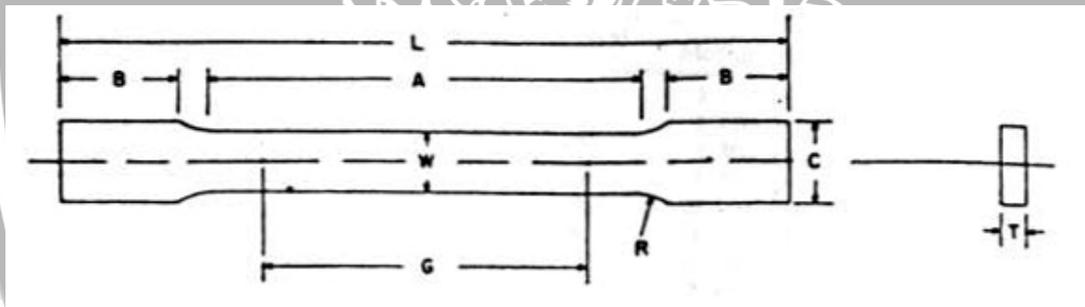
#### 3.3.2.1 Pengujian Komposisi

Bahan yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah aluminium paduan dengan komposisi sebagai berikut :

– Al (Aluminium)	= 98,4 %	– Ba (Barium)	= 0,03 %
– Fe (Besi)	= 0,815 %	– Ti (Titanium)	= 0,028 %
– P (Phospor)	= 0,27 %	– Yb (Iterbium)	= 0,02 %
– Ca (Kalsium)	= 0,17 %	– Re (Renyum)	= 0,004 %
– Cu (Tembaga)	= 0,154 %	– Ni (Nikel)	= 0,015 %
– Os (Osmium)	= 0,031 %	– Zn (Seng)	= 0,013 %
– Ga (Galium)	= 0,03 %		

#### 3.3.2.2 Pengujian Tarik

Spesimen dari standard pengujian *sheet* metal ASTM – A-370 adalah seperti pada gambar berikut :



Gambar 3.7 : Skematis standard pengujian ASTM – A 370

Sumber : ASTM A 370,1988 : 204

Tabel 3.1 : ukuran standard pengujian ASTM – A 370

	Standard Specimens				Subsize Specimen	
	Plate - Type		Sheet Type			
	1,5 in. Wide		0.5 in Wide		1/4 in. Wide	
	inch	mm	inch	mm	inch	mm
G - Gage length	8.00 + 0.01	200 +	2.0 +	50.0 +	1.0 +	25.0 +
	1.5 + 1/8 -	0.25	0.005	0.10	0.003	0.08
W - Width	1/4	40,+3,-6	0.5 +	12.5 +	0.25 +	6.25 +
T - thickness			0.010	0.25	0.002	0.05
			thickness of material			
R - Radius of fillet, min	1/2	13	0.5	13	1/4	6
L - Over-all length, min	18	450	8	200	4	100
A - Length reduced section, min	9	225	2.25	60	1.25	32
B - Length of grip section, min	3	75	2	50	1.25	32
C - Width of grip section, approximate	2	50	3/4	20	3/8	10

Sumber : ASTM handbook A 370,1988 : 256

Berdasarkan pengujian kekuatan tarik yang telah dilakukan didapatkan data sebagai berikut :

Beban *Ultimate*,  $P_u$  :

1. 6,4 KN
2. 6,1 KN
3. 5,9 KN

Luas permukaan awal material,  $A_o = 39 \text{ mm}^2$

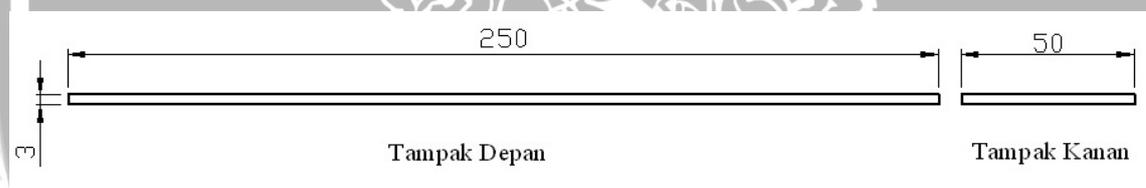
Sehingga didapatkan tegangan *ultimate* sebagai berikut :

$$\sigma_u = \frac{P_u}{A_o} = \frac{6133,33}{39} = 157,26 \text{ N/mm}^2$$

$$E = \frac{\sigma_u}{\varepsilon}$$

$$= \frac{157,26}{0,025} = 6290,4 \text{ N/mm}^2$$

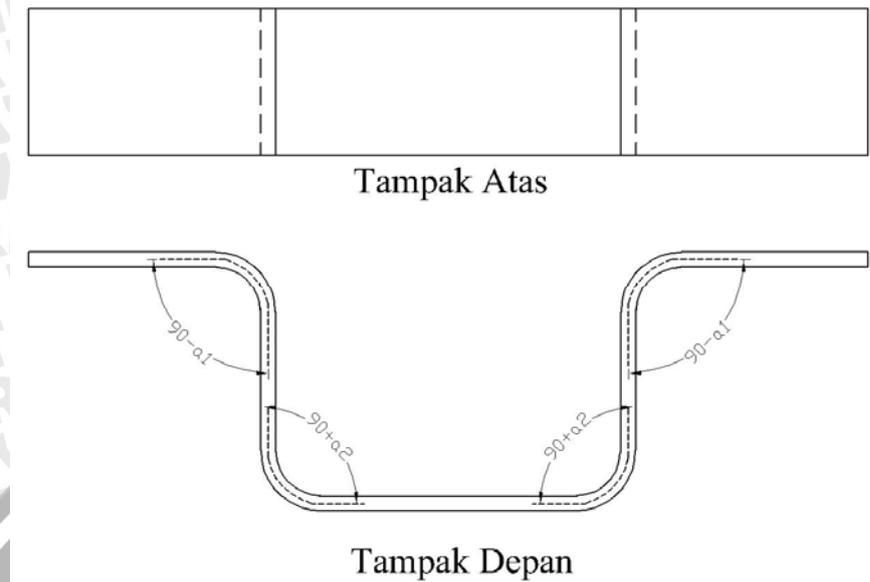
Bentuk dan dimensi benda kerja dapat dilihat pada gambar 3.8 berikut :



(Satuan dalam mm)

Gambar 3.8 Bentuk dan dimensi benda kerja

Bentuk dan benda kerja yang akan diamati dapat dilihat pada gambar 3.9 berikut



Gambar 3.9 Bentuk dan dimensi benda kerja setelah proses

Sudut yang diukur adalah sudut  $\alpha_1$  dan sudut  $\alpha_2$ .

### 3.3.2.3 Perhitungan Parameter Drawing

Agar dapat menggunakan rumus *deep drawing* pada benda kerja berbentuk lingkaran, terlebih dahulu dilakukan konversi luas plat menjadi luas lingkaran sehingga diameter yang terbentuk adalah (Persamaan 2 – 7)

$$\begin{aligned} d_0 &= 1,13\sqrt{(250 \times 50)} \\ &= 1,13\sqrt{12500} \\ &= 126,3 \text{ mm} \end{aligned}$$

Untuk *punch* dilakukan konversi yang sama (Persamaan 2 – 9), sehingga diameter yang terbentuk adalah

$$\begin{aligned} D &= 1,13\sqrt{70 \times 50} \\ &= 1,13\sqrt{3500} \\ &= 66,85 \text{ mm} \end{aligned}$$

*Drawing ratio* untuk profil ini dihitung menggunakan persamaan (2 -12)

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{d_0}{D} \\ &= \frac{126,3}{66,85} \\ &= 1,89 \end{aligned}$$

Dari harga  $\beta_{\max}$  atau *Limiting Drawing Ratio (LDR)* di atas dapat diketahui bahwa nilai *drawing ratio* profil ini masih memenuhi.

Ukuran radius *die* yang digunakan adalah

$$\begin{aligned} r_d &= 4t \\ &= 4 \times 3 \\ &= 12 \text{ mm} \end{aligned}$$

Radius *punch* yang digunakan tidak melebihi nilai dari radius *die* yaitu dipakai radius 9 mm.

*Blankholder* yang digunakan didasarkan pada persamaan (2 – 5) dan (2 – 6)

$$\begin{aligned} p_{BH} &= 10^{-3} \cdot c \left[ (\beta - 1)^2 + \frac{0,005 d_0}{s_0} \right] \cdot \sigma_u \\ &= 10^{-3} \cdot 2,5 \left[ (1 - 1,89)^2 + \frac{0,005 \cdot 126,3}{3} \right] 157 \\ &= 10^{-3} \cdot 2,5 [0,7921 + 0,2015] 157 \\ &= 0,374 \text{ N} \end{aligned}$$

Luasan kontak antara *blank* dengan *blankholder* untuk material yang dipakai disesuaikan dengan bentuk dari benda kerja yang akan dibuat

$A =$  Luasan kontak *blank* dengan *blankholder* – (Luasan *punch* + Luasan radius *die*)

$$\begin{aligned} A_{BH} &= [(230 \times 50) - ((70 \times 50) + (2 \times 12 \times 50))] \\ &= (11500) - [(3500 + 1200)] \\ &= 6800 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{BH} &= A_{BH} \cdot p_{BH} \\ &= 6800 \times 0,374 \\ &= 2543 \text{ N} \approx 2,5 \text{ kN} \end{aligned}$$

### Data Variabel yang Diukur dan Parameter yang Ditetapkan

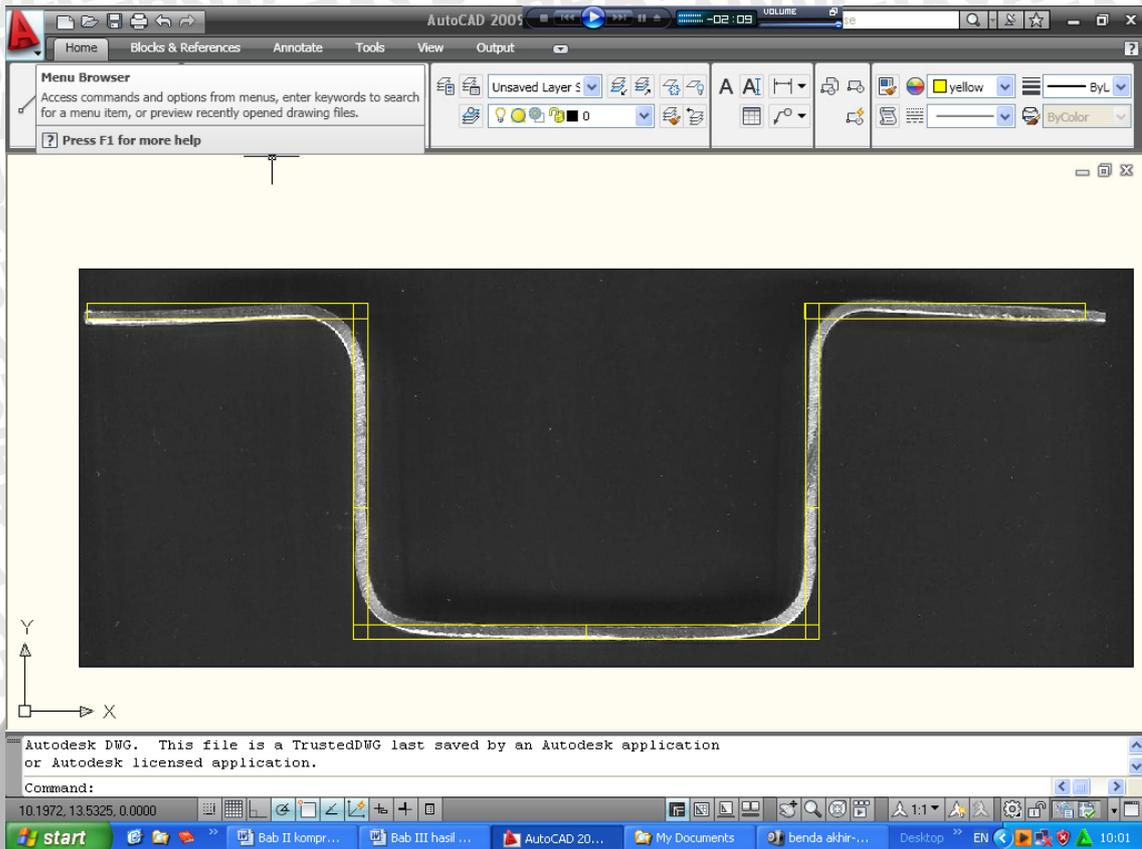
Penelitian ini terdiri dari variabel – variabel sebagai berikut :

- a. Variabel bebas
  - Variasi *die clearance* : 10%, 20%, 30%, dan 40% (lebih besar dibanding tebal *blank*)
  - Variasi tanpa perlakuan panas dan dengan perlakuan panas *annealing*, pemanasan suhu 300°C, *holding* 15 menit, pendinginan dapur, pendinginan udara
- b. Variabel terikat
  - Sudut *springback*
- c. Parameter terkendali
  - Radius *punch* 12 mm
  - Radius *die* 9 mm
  - Gaya *blankholder* 2,5 KN
  - Tebal material uji 3 mm.

### 3.4 Prosedur Penelitian

Berdasar pada variabel yang sudah ditentukan, maka langkah – langkah yang perlu dilakukan dalam penelitian ini adalah :

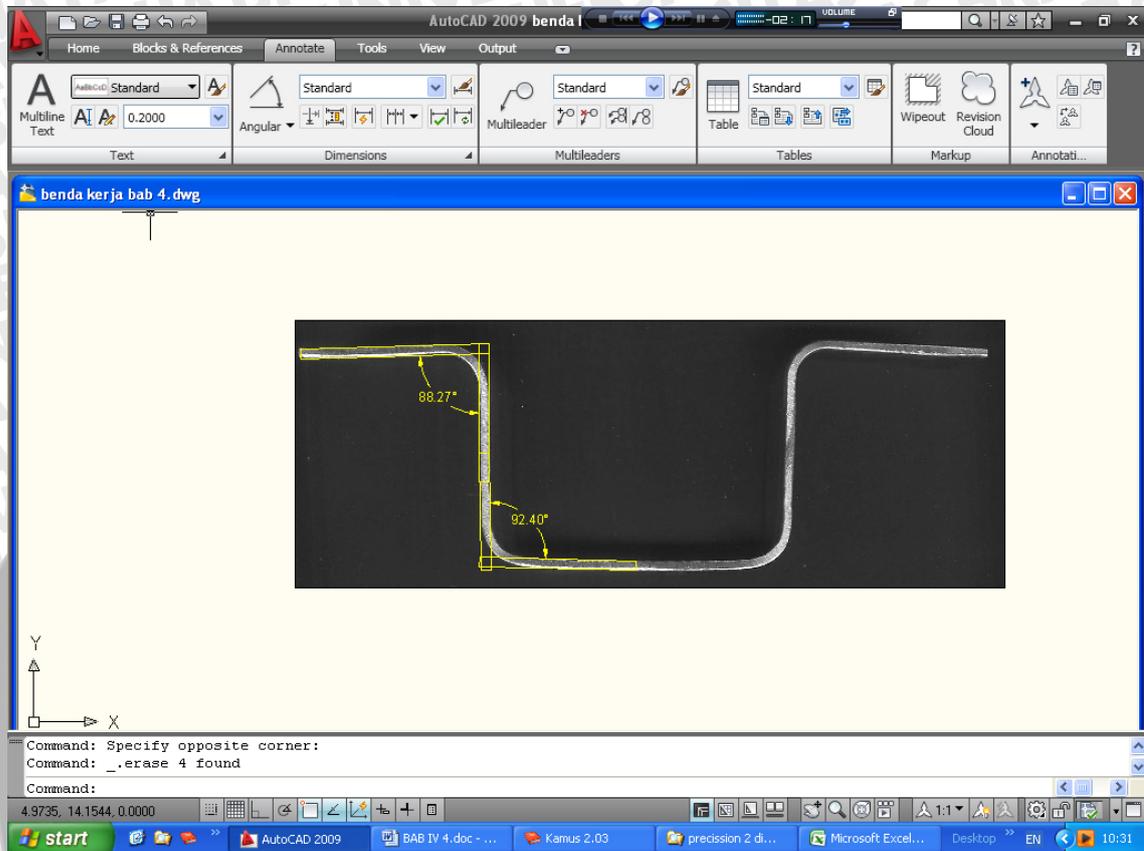
1. Pemotongan material uji dengan dimensi panjang 250 mm, lebar 50 mm, tebal 3 mm sebanyak 24 buah, dimana 3 buah material uji digunakan sebagai kontrol untuk 1 (satu) variabel bebas.
2. Melakukan proses *annealing* untuk material uji dengan perlakuan *annealing* dengan cara memanaskan material uji hingga mencapai suhu 300°C, kemudian di *holding* 15 menit kemudian dilanjutkan dengan pendinginan dapur, dan selanjutnya dengan pendinginan udara
3. Melakukan proses *deep drawing* dengan variasi *die clearance* 10%, 20%, 30%, dan 40% besar dibanding tebal *blank*.
4. Benda kerja hasil proses di *scan* melalui *scanner*.
5. Memasukkan gambar *scan* ke dalam program *autocad* untuk pengambilan data perubahan sudut. Adapun langkah – langkah pengolahan datanya adalah sebagai berikut :



Gambar 3.10 Pemasukan gambar benda kerja ke dalam program *Autocad*

- a) Buka program *Autocad*
- b) Pada menu kita pilih *file > new ...*
- c) Akan muncul *window* baru dengan judul "*select template*". pilih "*acad.dwt*" kemudian tekan *open*
- d) Akan muncul *window* baru untuk menggambar.
- e) Pada menu, klik *insert > raster image reference ...*
- f) Pilih hasil scan yang akan di ambil datanya. klik *open*
- g) Klik *OK*
- h) Klik sembarang tempat untuk menentukan penempatan objek gambar pada bidang gambar.
- i) Pada *command prompt* akan muncul perintah : *specific scale factor or (Unit)<1>*: klik *Enter*
- j) Gambar yang telah masuk bidang gambar kita tempelkan pada *sketch* yang telah kita buat sebelumnya sebagai acuan geometri akhir benda kerja yang diinginkan
- k) Dari *sketch* yang ada kita posisikan sehingga *sketch* tepat pada gambar benda kerja

- 1) Dari *sketch* yang telah kita sesuaikan dengan gambar dapat kita ketahui sudut penyimpangan (sudut *springback*)



Gambar 3.11: Tampilan sudut pada gambar benda kerja

6. Penulisan data dilanjutkan analisa kecukupan data dan pembahasan dengan analisa statistik.
7. Kesimpulan dan saran.

### 3.5 Analisa statistik

Dari data hasil yang telah diperoleh dan adanya variabel yang telah ditentukan, maka untuk menyatakan keterkaitan antara variabel terikat dan variabel bebas dengan analisis *komparasi*, yaitu membandingkan data hasil yang diperoleh dari hubungan antara variabel terikat terhadap variabel bebasnya dengan menggunakan metode analisa data varian dua arah rancangan ulang.

Tabel 3.2. Rancangan Penelitian

Perlakuan	Ulangan	Variasi kelonggaran <i>dies</i>			
		10 %	20 %	30 %	40 %
Tanpa perlakuan panas	1	X <sub>111</sub>	X <sub>121</sub>	X <sub>131</sub>	X <sub>141</sub>
	2	X <sub>112</sub>	X <sub>122</sub>	X <sub>132</sub>	X <sub>142</sub>
	3	X <sub>113</sub>	X <sub>123</sub>	X <sub>133</sub>	X <sub>143</sub>
Dengan perlakuan panas	4	X <sub>211</sub>	X <sub>221</sub>	X <sub>231</sub>	X <sub>241</sub>
	5	X <sub>212</sub>	X <sub>222</sub>	X <sub>232</sub>	X <sub>242</sub>
	6	X <sub>213</sub>	X <sub>223</sub>	X <sub>233</sub>	X <sub>243</sub>

### 3.5.1. Interval Penduga Rata – rata

- Sudut *springback* rata-rata :

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

- Standar deviasi (  $\sigma$  ) :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

- Standar deviasi rata-rata (  $\bar{\sigma}$  )

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

- Interval penduga rata-rata dari sudut *springback*  $\alpha_1$  :

$$db = n - 1$$

Dengan  $\alpha = 5\%$

$$\bar{x} - t(\alpha/2, db) \frac{\bar{\sigma}}{\sigma} < \mu < \bar{x} + t(\alpha/2, db) \frac{\bar{\sigma}}{\sigma}$$

### 3.5.2. Analisis Varian Dua Arah

Dari data hasil pengukuran sudut *springback* yang didapatkan, dilakukan analisa varian dua arah untuk mengetahui adanya pengaruh *die clearance* dan perlakuan panas *annealing*, serta interaksi keduanya terhadap sudut *springback* benda kerja hasil proses *deep drawing*.

Di dalam penelitian ini digunakan analisa varian dua arah dikarenakan variabel bebasnya sebanyak dua yaitu perlakuan / tanpa perlakuan *annealing* dan *die clearance*.

Untuk mengetahui apakah  $F_{hitung}$  lebih besar atau lebih kecil daripada  $F_{tabel}$  maka dilakukan perhitungan statistik sebagai berikut:

Kriteria pengujian

$$\alpha = 0,05$$

$$\text{Faktor A (perlakuan panas)} = r \longrightarrow v_1 = (r - 1)$$

$$\text{Faktor B (die clearance)} = c \longrightarrow v_1 = (c - 1)$$

$$\text{Ulangan} = t$$

$$\text{Interaksi A dan B} \longrightarrow v_1 = (r - 1)(c - 1)$$

$$v_2 = rc(t - 1) \text{ sehingga,}$$

$$F_A = F_{(0,05;v_1;v_2)}$$

$$F_B = F_{(0,05;v_1;v_2)}$$

$$F_{AB} = F_{(0,05;v_1;v_2)}$$

1. Jumlah semua perlakuan

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t X_{ijk}$$

2. Jumlah kuadrat semua perlakuan

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t X_{ijk}^2$$

3. Faktor koreksi (FK)

$$FK = \frac{\left[ \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t X_{ijk} \right]^2}{rct}$$

4. Jumlah kuadrat total (JKT)

$$JKT = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t X_{ijk}^2 - FK$$

5. Jumlah kuadrat pengaruh A (JKA)

$$JKA = \frac{\sum_{i=1}^r T_i^2}{ct} - FK$$

6. Jumlah kuadrat pengaruh B (JKB)

$$JKB = \frac{\sum_{j=1}^c T_j^2}{rt} - FK$$



7. Jumlah kuadrat perlakuan (JKP)

$$JKP = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c T_{ij}^2}{t} - FK$$

8. Jumlah kuadrat pengaruh interaksi A dan B (JKAB)

$$JKAB = JKP - JKA - JKB$$

9. Jumlah kuadrat galat (JKG)

$$JKG = JKT - JKA - JKB - JKAB$$

10. Kuadrat tengah A

$$S_A^2 = \frac{JKA}{r-1}$$

11. Kuadrat tengah B

$$S_B^2 = \frac{JKB}{c-1}$$

12. Kuadrat tengah A dan B

$$S_{AB}^2 = \frac{JKAB}{(r-1)(c-1)}$$

13. Kuadrat tengah galat

$$S^2 = \frac{JKG}{rc(t-1)}$$

14. F hitung pengaruh interval A

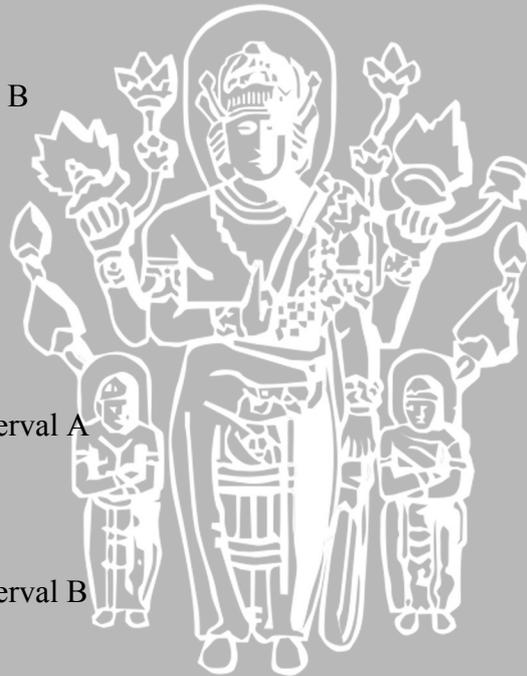
$$\frac{S_A^2}{S^2}$$

15. F hitung pengaruh interval B

$$\frac{S_B^2}{S^2}$$

16. F hitung pengaruh interval A dan B

$$\frac{S_{AB}^2}{S^2}$$



Dari perhitungan statistik didapatkan data seperti pada tabel 3.3 :

Tabel 3.3 Analisis Varian Dua Arah

Sumber keragaman	Db	JK	Varian (KT)	$F_{hitung}$	$F_{tabel}$ $F_{db(v_1, v_2)}$
Faktor A	$r-1$	JKA	$S_A^2 = \frac{JKA}{r-1}$	$\frac{S_A^2}{S^2}$	
Faktor B	$c-1$	JKB	$S_B^2 = \frac{JKB}{c-1}$	$\frac{S_B^2}{S^2}$	
Interaksi A dan B	$(r-1)(c-1)$	JKAB	$S_{AB}^2 = \frac{JKAB}{(r-1)(c-1)}$	$\frac{S_{AB}^2}{S^2}$	
Galat	$rc(t-1)$	JKG	$S^2 = \frac{JKG}{rc(t-1)}$		
Total	$rct-1$	JKT			

Dari hasil sehingga digunakan hipotesa sebagai berikut:

1.  $H_0^1 : \alpha_i = 0$  , tidak ada pengaruh perlakuan *annealing* benda kerja terhadap *springback*.

$H_1^1 : \alpha_i \neq 0$  , ada pengaruh perlakuan panas *annealing* terhadap *springback*.

2.  $H_0^2 : \beta_j = 0$  , tidak ada pengaruh *die clearance* terhadap *springback*.

$H_1^2 : \beta_j \neq 0$  , ada pengaruh *die clearance* terhadap *springback*.

3.  $H_0^3 : (\alpha\beta)_{ij} = 0$  , tidak ada pengaruh interaksi antara perlakuan panas dan *die clearance*.

$H_1^3 : (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$  , ada pengaruh interaksi antara perlakuan panas dan *die clearance*.

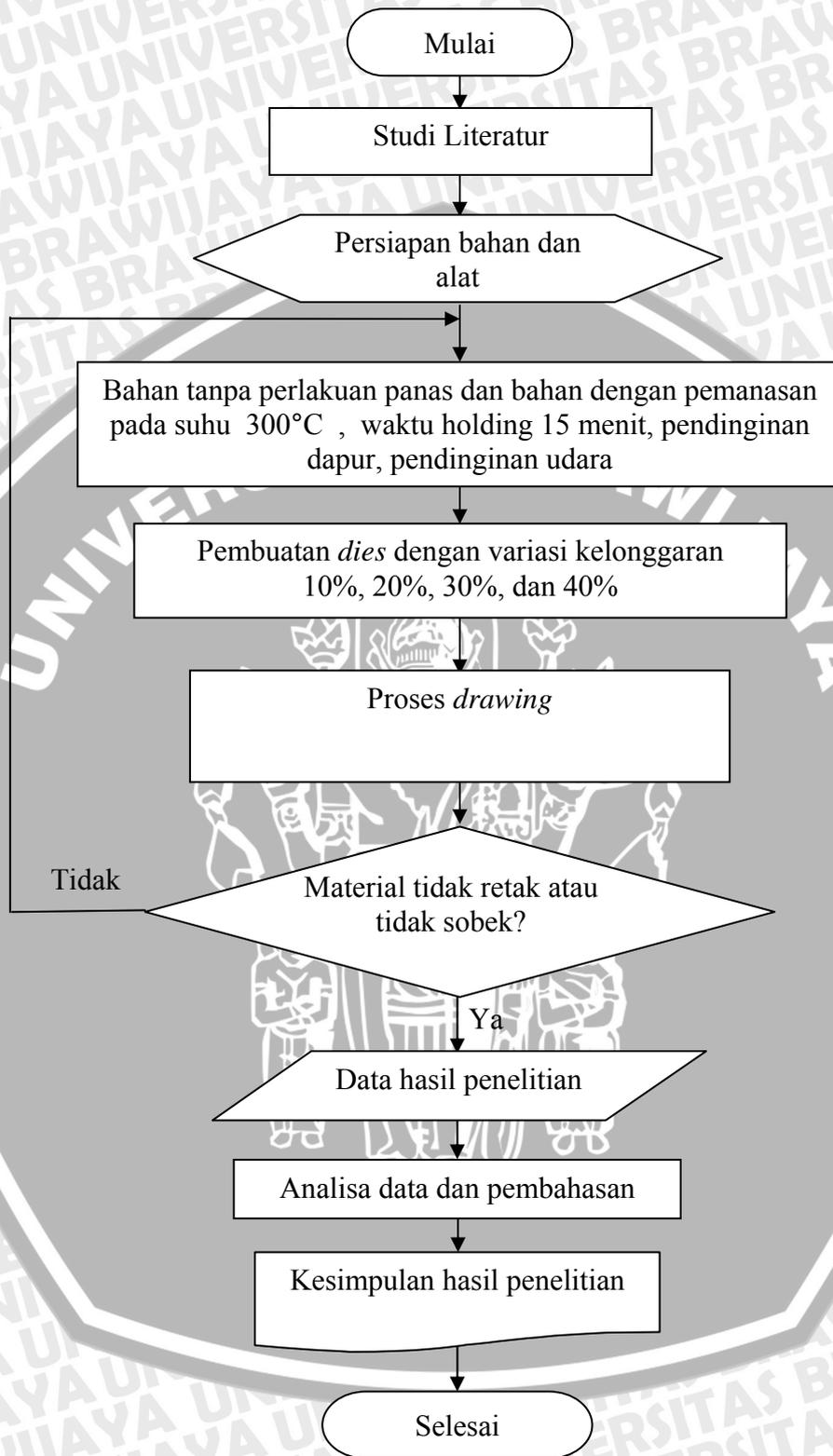
dengan :

$\alpha_i$  = pengaruh (efek) faktor A

$\beta_j$  = pengaruh (efek) faktor B

$(\alpha\beta)_{ij}$  = pengaruh interaksi faktor A dan faktor B

### 3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.12 Diagram Alir Penelitian

**BAB IV**

**ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN DATA**

**4.1. Data Sudut *Springback***

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan data sudut *springback* yaitu seperti pada tabel 4.1 dan tabel 4.2 berikut ini :

Tabel 4.1 Hasil pengukuran sudut *springback* pada  $\alpha_1$  (antara flange dengan dinding benda kerja).

Subjek	Ulangan	<i>Die Clearance</i>				Total
		10 %	20 %	30 %	40 %	
Tanpa Perlakuan	1	2,32	2,02	1,76	1,63	7,73
	2	2,23	2,19	1,73	1,52	7,67
	3	2,3	1,81	1,62	1,83	7,56
	Total	6,85	6,02	5,11	4,98	22,96
	Rata-rata	2,28	2,01	1,70	1,66	
Dengan perlakuan <i>Annealing</i>	1	2,04	1,73	1,74	1,7	7,21
	2	2,18	2	1,57	1,51	7,26
	3	1,97	1,8	1,55	1,54	6,86
	Total	6,19	5,53	4,86	4,75	21,33
	Rata-rata	2,06	1,84	1,62	1,58	
Total		13,04	11,55	9,97	9,73	44,29

Tabel 4.2 Hasil pengukuran sudut *springback* pada  $\alpha_2$  (antara dinding dengan dasar benda kerja).

Subjek	Ulangan	<i>Die Clearance</i>				Total
		10 %	20 %	30 %	40 %	
Tanpa Perlakuan	1	0,54	2,29	3,42	3,28	9,53
	2	0,6	2,15	3,13	3,85	9,73
	3	0,59	2,25	3,33	3,91	10,08
	Total	1,73	6,69	9,88	11,04	29,34
	Rata-rata	0,58	2,23	3,29	3,68	
Dengan perlakuan <i>Annealing</i>	1	0,73	2,34	4,43	6,72	14,22
	2	0,78	2,47	4,1	7,72	15,07
	3	0,82	2,3	4,23	7,52	14,87
	Total	2,33	7,11	12,76	21,96	44,16
	Rata-rata	0,78	2,37	4,25	7,32	
Total		4,06	13,8	22,64	33	73,5



Keterangan :

X = data hasil pengujian kekerasan permukaan

$X_{ijk}$  adalah data pengamatan yang berupa data pengujian kekerasan permukaan pada variasi perlakuan ke-i, *die clearance* ke-j, dan ulangan ke-k.

## 4.2. Analisa Statistik

### 4.2.1. Sudut *Springback* $\alpha_1$

Analisa ini digunakan untuk mengetahui interval penduga rata-rata dari sudut *springback*  $\alpha_1$  yang telah didapat. Berikut perhitungannya pada proses *deep drawing* tanpa perlakuan *annealing* dengan *die clearance* 10% dengan data sudut *springback*  $\alpha_1$  :

- Sudut *springback* rata-rata :

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} = \frac{6,85}{3} = 2,28$$

- Standar deviasi ( $\sigma$ ) :

$$\begin{aligned}\sigma &= \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \\ &= \sqrt{\frac{(2,32 - 2,28)^2 + (2,23 - 2,28)^2 + (2,3 - 2,28)^2}{3 - 1}} \\ &= \sqrt{0,002233} = 0,047258\end{aligned}$$

- Standar deviasi rata-rata ( $\bar{\sigma}$ )

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,047258}{\sqrt{3}} = 0,027285$$

- Interval penduga rata-rata dari sudut *springback*  $\alpha_1$  :

$$db = n - 1 = 3 - 1 = 2$$

Dengan  $\alpha = 5\%$

$$\bar{x} - t(\alpha/2, db) \bar{\sigma} < \mu < \bar{x} + t(\alpha/2, db) \bar{\sigma}$$

$$2,28 - 3(0,025, 2)0,027285 < \mu < 2,28 + 3(0,025, 2)0,027285$$

$$2,28 - 3(4,303)0,027285 < \mu < 2,28 + 3(4,303)0,027285$$

$$2,28 - 0,35 < \mu < 2,28 + 0,35$$

$$1,93 < \mu < 2,63$$

Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa interval penduga rata-rata sudut *springback* dengan variasi *die clearance* 10% dan tanpa perlakuan adalah antara 1,93 dan 2,63 dengan tingkat keyakinan 95%.

Dengan cara perhitungan yang sama dengan di atas, didapatkan interval penduga untuk variasi *die clearance* dan perlakuan panas *annealing* seperti pada tabel 4.3 :

Tabel 4.3 Interval Penduga

		<i>Die Clearance</i>			
		10 %	20 %	30 %	40 %
Interval penduga min	Tanpa perlakuan	1,931118	0,587981	1,153963	0,488667
	Dengan perlakuan <i>annealing</i>	1,266407	0,799024	0,841882	0,822055
Interval penduga max	Tanpa perlakuan	2,635549	3,425352	2,252704	2,831333
	Dengan perlakuan <i>annealing</i>	2,86026	2,887642	2,398118	2,344612

#### 4.2.2. Analisa Varian Dua Arah

Dari data hasil pengukuran sudut *springback* yang didapatkan, dilakukan analisa varian dua arah untuk mengetahui adanya pengaruh *die clearance* dan perlakuan panas *annealing*, serta interaksi keduanya terhadap sudut *springback* benda kerja hasil proses *deep drawing*.

Di dalam penelitian ini digunakan analisa varian dua arah dikarenakan variabel bebasnya sebanyak dua yaitu perlakuan/tanpa perlakuan *annealing* dan *die clearance*.

Kriteria pengujian :

$$\alpha = 0,05$$

$$\text{faktor A (perlakuan panas)} = r = 2 \longrightarrow v_1 = (2 - 1) = 1$$

$$\text{faktor B (die clearance)} = c = 4 \longrightarrow v_1 = (4 - 1) = 3$$

$$\text{ulangan} = t = 3$$

$$\text{interaksi A dan B} \longrightarrow v_1 = (r - 1)(c - 1) = 1 \times 3 = 3$$

$$v_2 = rc(t - 1) = 2 \times 4(3 - 1) = 16 \text{ sehingga,}$$

$$F_A = F_{(0,05;1;16)} = 4,49$$

$$F_B = F_{(0,05;3;16)} = 3,24$$

$$F_{AB} = F_{(0,05;3;16)} = 3,24$$

Dari perhitungan statistik didapatkan :

1. Jumlah semua perlakuan

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t X_{ijk} = 44,29$$

2. Jumlah kuadrat semua perlakuan

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t X_{ijk}^2 = 83,2935$$

3. Faktor koreksi (FK)

$$FK = \frac{\left[ \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t X_{ijk} \right]^2}{rct} = \frac{44,29^2}{2 \times 4 \times 3} = 81,7335$$

4. Jumlah kuadrat total (JKT)

$$JKT = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t X_{ijk}^2 - FK = 83,2935 - 81,7335 = 1,559996$$

5. Jumlah kuadrat pengaruh A (JKA)

$$\begin{aligned} JKA &= \frac{\sum_{i=1}^r T_i^2}{ct} - FK \\ &= \frac{\{(22,96)^2 + (21,33)^2\}}{4 \times 3} - 81,7335 \\ &= \frac{982,1305}{12} - 81,7335 \\ &= 81,844208 - 81,7335 \\ &= 0,110708 \end{aligned}$$

6. Jumlah kuadrat pengaruh B (JKB)

$$\begin{aligned} JKB &= \frac{\sum_{j=1}^c T_j^2}{rt} - FK \\ &= \frac{\{(13,04)^2 + (11,55)^2 + (9,97)^2 + (9,73)^2\}}{2 \times 3} - 81,7335 \\ &= \frac{497,5179}{6} - 81,7335 \\ &= 82,91965 - 81,7335 \\ &= 1,186146 \end{aligned}$$

7. Jumlah kuadrat perlakuan (JKP)

$$JKP = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c T_{ij}^2}{t} - FK$$

$$= \frac{\{(6,85)^2 + (6,02)^2 + (5,11)^2 + (4,98)^2 + \dots + (4,75)^2\}}{3} - 81,7335$$

$$= 1,317996$$

8. Jumlah kuadrat pengaruh interaksi A dan B (JKAB)

$$JKAB = JKP - JKA - JKB$$

$$= 1,317996 - 0,110708 - 1,186146$$

$$= 0,021146$$

9. Jumlah kuadrat galat (JKG)

$$JKG = JKT - JKA - JKB - JKAB$$

$$= 1,559996 - 0,110708 - 1,186146 - 0,021146 = 0,242$$

10. Kuadrat tengah A

$$S_A^2 = \frac{JKA}{r-1} = \frac{0,110708}{2-1} = 0,110708$$

11. Kuadrat tengah B

$$S_B^2 = \frac{JKB}{c-1} = \frac{1,186146}{4-1} = 0,395382$$

12. Kuadrat tengah A dan B

$$S_{AB}^2 = \frac{JKAB}{(r-1)(c-1)} = \frac{0,021146}{(2-1)(4-1)} = 0,007049$$

13. Kuadrat tengah galat

$$S^2 = \frac{JKG}{rc(t-1)} = \frac{0,242}{2 \times 4 \times (3-1)} = 0,015125$$

14. F hitung pengaruh interval A

$$\frac{S_A^2}{S^2} = \frac{0,110708}{0,015125} = 7,319284$$

15. F hitung pengaruh interval B

$$\frac{S_B^2}{S^2} = 0,395382 = 26,14096$$

16. F hitung pengaruh interval A dan B

$$\frac{S_{AB}^2}{S^2} = \frac{0,007049}{0,015125} = 0,466024$$

Dari perhitungan statistik didapatkan data seperti pada tabel 4.4 :

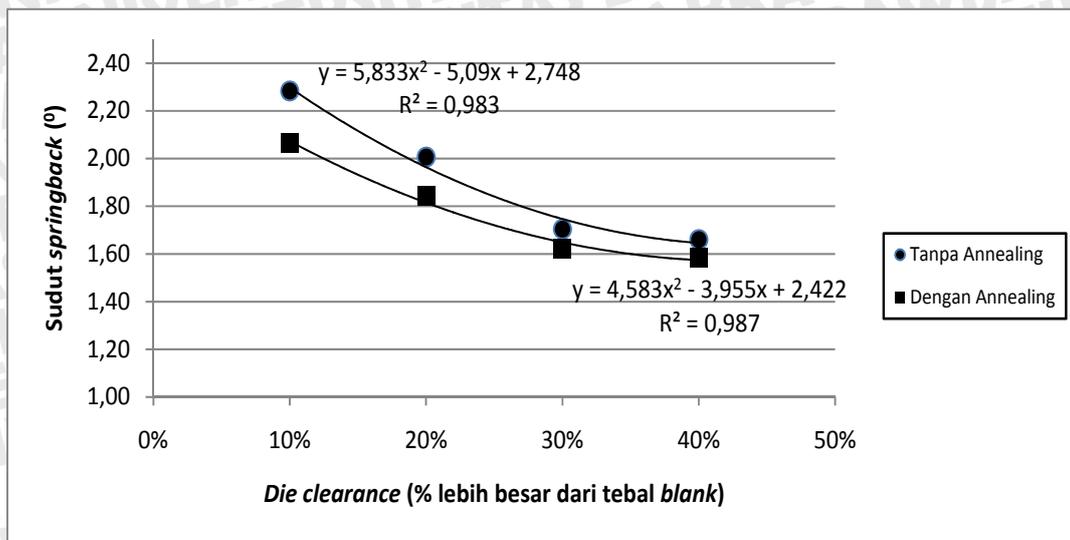
Tabel 4.4 Analisis Varian Dua Arah

Sumber keragaman	dB	JK	Varian (KT)	F hitung	F tabel F <sub>db(v1,v2)</sub>
Faktor A	1	0,110708	0,110708	7,319284	4,49
Faktor B	3	1,186146	0,395382	26,14096	3,24
Interaksi A dan B	3	0,021146	0,007049	0,466024	3,24
Galat	16	3.201	18,3		
Total	23	366			

Kesimpulan:

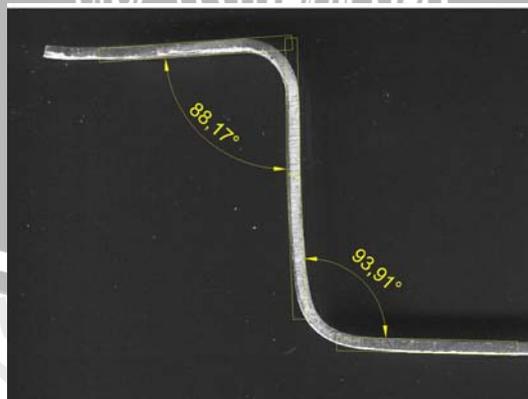
- Dari tabel analisis varian terlihat bahwa nilai  $F_{hitung}$  untuk faktor A adalah 7,31928 dan nilai  $F_{hitung}$  untuk faktor B adalah 26,14096. Kedua nilainya adalah lebih besar dari nilai  $F_{tabel}$  untuk faktor A yaitu 4,49 dan untuk faktor B yaitu 3,24 ( $F_{hitung} > F_{tabel}$ ) sehingga kita dapat mengatakan bahwa  $H_0^1$  dan  $H_0^2$  ditolak, dan akan menerima  $H_1^1$  dan  $H_1^2$ . Dengan demikian maka pengaruh perlakuan panas *annealing* dan pengaruh *die clearance* berbeda nyata.
- Tetapi untuk interaksi A dan B, dengan nilai  $F_{hitung}$  yaitu 0,466024 adalah lebih kecil dari nilai  $F_{tabel}$  yaitu 3,24 ( $F_{tabel} > F_{hitung}$ ) sehingga kita dapat mengatakan bahwa bahwa  $H_0^3$  diterima, dan  $H_1^3$  ditolak. Hal ini berarti interaksi dari perlakuan panas *annealing* dan *die clearance* tidak berbeda nyata.

### 4.3 Pembahasan dan Grafik



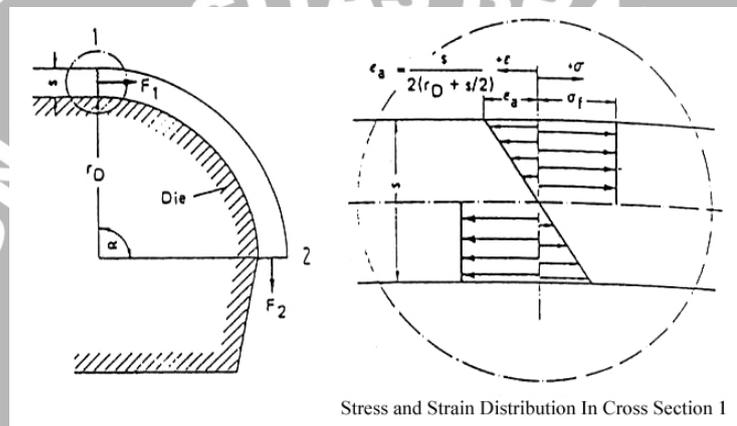
Gambar 4.1 Grafik Pengaruh *die clearance* terhadap sudut *springback*  $\alpha_1$  dengan variasi tanpa perlakuan dan perlakuan panas *annealing*

Gambar 4.1 merupakan grafik pengaruh *die clearance* terhadap sudut *springback*  $\alpha_1$ . Sudut  $\alpha_1$  merupakan sudut yang dibentuk antara *flange* dan dinding benda kerja. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa sudut *springback*  $\alpha_1$  semakin menurun dengan bertambahnya *die clearance*, dan penurunan ini terjadi pada kedua variasi, tanpa perlakuan dan dengan perlakuan panas *annealing*. Sudut terbesar terjadi pada material tanpa perlakuan dengan *die clearance* 10% sebesar 2,28° sedangkan sudut *springback*  $\alpha_1$  nilai terendah terjadi pada material dengan perlakuan panas *annealing* dengan *die clearance* 40% sebesar 1,58°.



Gambar 4.2 Hasil penelitian benda kerja dengan perlakuan panas *annealing* dengan *die clearance* 40% (4,2 mm)

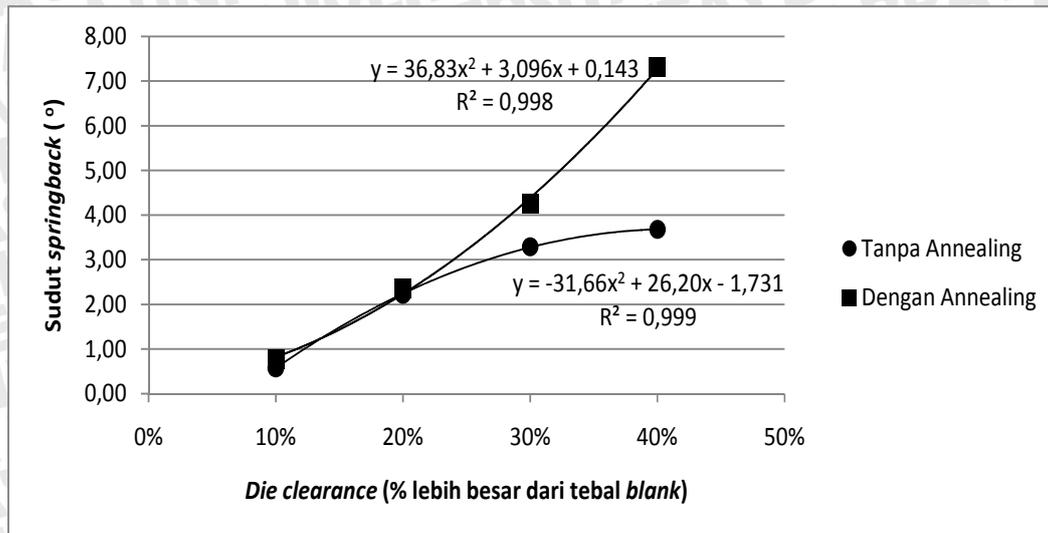
Menurunnya sudut *springback*  $\alpha_1$  dengan semakin bertambahnya *die clearance* terjadi pada kedua variasi material tanpa perlakuan dan material dengan perlakuan panas *annealing*. Tetapi penurunan yang terjadi relatif kecil. Penurunan nilai ini terjadi karena sudut yang dibentuk dipengaruhi oleh konsentrasi tegangan yang terjadi akibat proses *bending*. Konsentrasi tegangan yang terjadi pada permukaan benda kerja yang bersinggungan dengan radius *die* dan radius *punch* untuk *die clearance* yang sempit adalah lebih besar daripada *die clearance* yang semakin longgar. Seiring dengan mengalirnya lembaran logam benda kerja menuju dasar *die* karena terdorong oleh gaya *punch* maka konsentrasi tegangan yang terjadi akan menjadi normal akibat proses pelurusan pelat (*straightening*).



Gambar 4.3 Hubungan geometris *bending* dan *unbending* pada radius *die*  
Sumber : Kurt Lange, 1985 : 20.7

Gaya untuk meluruskan pelat menjadi semakin besar, begitu juga gaya penekanan yang dibutuhkan. Gaya tarik yang terjadi akibat tarikan benda kerja yang menyinggung *punch* dengan gaya tekan *blankholder* menjadi semakin besar, sehingga regangan yang timbul pada benda kerja ketika berada di *die clearance* semakin besar. Kondisi ini sebanding dengan hukum Hooke, yang mana semakin besar nilai tegangan yang ada maka regangan yang terjadi semakin besar pula :  $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ , dimana  $\sigma$  adalah tegangan yang terjadi,  $\epsilon$  adalah regangan, dan E adalah modulus elastisitas yang memiliki nilai konstan. Dengan semakin tinggi nilai tegangan dan regangan, maka tegangan yang terjadi semakin mendekati tegangan *yield* sehingga deformasi yang terjadi juga mendekati titik plastis (*springback* semakin kecil). Konsentrasi tegangan pada *clearance* yang longgar (lebih besar) adalah lebih kecil daripada pada *clearance* yang lebih kecil/sempit sehingga tegangan tarik dan regang yang terjadi semakin kecil.

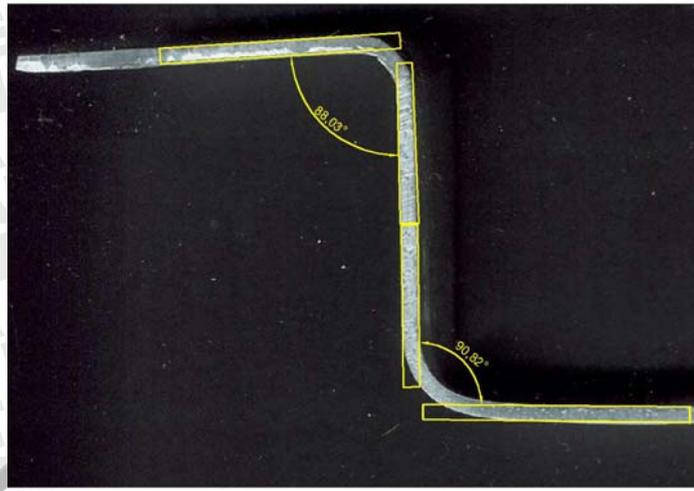
Dengan semakin kecilnya nilai tegangan dan regangan pada benda kerja, maka deformasi yang terjadi masih cenderung ke arah deformasi elastis.



Gambar 4.4 Grafik pengaruh *die clearance* terhadap sudut *springback*  $\alpha_2$  dengan variasi tanpa perlakuan dan perlakuan panas *annealing*.

Pada gambar 4.4, sudut *springback*  $\alpha_2$ , sudut tertinggi terjadi pada *die clearance* 40% material dengan perlakuan *annealing* sebesar  $7,32^\circ$ , sedangkan sudut *springback* terendah terjadi pada *die clearance* 10% material tanpa perlakuan panas *annealing* sebesar  $0,58^\circ$ .

Pada grafik, sudut yang dibentuk adalah  $\alpha_2$ , yaitu sudut antara dinding samping benda kerja terhadap dasar dari benda kerja. Dari grafik dapat dilihat bahwa dengan semakin besarnya *die clearance* maka sudut *springback* yang terjadi juga semakin besar. Terutama pada material yang diberi perlakuan *annealing*. Sudut *springback* semakin meningkat drastis dari *die clearance* 10% sebesar  $0,78^\circ$  menjadi  $2,37^\circ$  pada *die clearance* 20%, kemudian meningkat lagi menjadi  $4,25^\circ$  dan yang terakhir pada *die clearance* 40% sebesar  $7,32^\circ$ .



Gambar 4.5. Hasil penelitian benda kerja dengan perlakuan panas *annealing* dengan *die clearance* 10% (3,3 mm)

Ketika terjadi proses *straightening* atau pelurusan plat, permukaan dalam benda kerja yang sebelumnya telah mengalami tegangan tarik akibat pembengkokan, akan dikembalikan lagi posisinya menjadi lurus dimana tegangan tarik akan menjadi normal kembali, begitu juga tegangan tekan yang terjadi pada permukaan luar benda kerja. Ketika benda kerja semakin mengalir kedalam (mengikuti *punch*) maka akan terjadi gesekan antara radius *punch* dengan benda kerja. Pada kondisi *straightening* atau pelurusan pelat hingga benda kerja mulai terbentuk profil U, benda kerja akan mengalami tarikan yang mengakibatkan tegangan tarik pada benda kerja sehingga benda kerja akan mengalami peregangan pada radius *punch*. Peregangan yang semakin besar seiring dengan semakin kecilnya *die clearance* akan menimbulkan deformasi yang mengarah ke deformasi plastis. Jadi, semakin besar *die clearance* maka tegangan tarik akan semakin kecil sehingga regangan yang terjadi pada daerah radius *punch* juga semakin kecil. Pada diagram tegangan regangan dapat dikatakan bahwa material tersebut akan cenderung mengalami deformasi elastis. Untuk material *annealing* batas elastisnya lebih besar dibandingkan dengan material tanpa *annealing*, sehingga kemungkinan munculnya *springback* lebih besar.

Sedangkan pada material tanpa perlakuan panas *annealing*, peningkatan yang terjadi tidak seperti pada material *annealing*. Pada *die clearance* 10% sebesar  $0,58^\circ$ , menjadi  $2,23^\circ$  pada *die clearance* 20%. Kemudian pada *die clearance* 30% dan 40% peningkatan tidak begitu besar, dari  $3,29^\circ$  menjadi  $3,68^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada material tanpa perlakuan panas *annealing* tegangan *yield*-nya lebih kecil sehingga deformasi elastis yang terjadi lebih kecil.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil analisis data dan pembahasan, didapatkan kesimpulan bahwa semakin lebar *die clearance* akan memperbesar sudut *springback*  $\alpha_2$ , tetapi akan memperkecil sudut *springback*  $\alpha_1$ . perlakuan pemanasan *annealing* memberikan efek lunak pada material sehingga ketika proses berlangsung akan memperbesar sudut *springback* yang dihasilkan.

- Sudut *springback*  $\alpha_1$  terbesar dihasilkan oleh benda kerja tanpa perlakuan panas *annealing*, *die clearance* 10% dengan nilai penyimpangan sebesar  $2,28^\circ$ .
- Sudut *springback*  $\alpha_2$  terbesar dihasilkan oleh benda kerja dengan perlakuan panas *annealing*, *die clearance* 40% dengan nilai penyimpangan sebesar  $7,32^\circ$ .

#### 5.2. Saran

- Perlakuan panas *annealing* berpengaruh terhadap sudut *springback*, sehingga dalam penentuannya harus disesuaikan dengan sifat dari material agar didapatkan hasil produk dengan kualitas maksimal.
- Pemilihan *die clearance* dalam suatu proses produksi harus dipertimbangkan secara matang, karena dalam kenyataannya *die clearance* dapat mempengaruhi hasil akhir suatu produk. Selain itu, biaya pembuatannya memerlukan biaya yang tidak sedikit.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Zaenal. 2005. *Optimalisasi Kelonggaran Die Plat U Pada Proses Deep Drawing Dengan Simulasi 3-D*. Malang: Universitas Brawijaya Malang.
- Adi Prasetya, IGN. 2003. *Optimalisasi Kelonggaran Die Plat U Pada Proses Deep Drawing*. Malang: Universitas Brawijaya Malang.
- Aluminum Standart & Data*; 1998. *Aluminum for Automitive Body Sheet Panels*; The Aluminum Association Inc, Washington DC.
- ASM International. 1991. *ASM Handbook*. United State of America
- Buranathiti, Thaweeapat and Cao, Jian. 2004. *An effective analytical model for springback prediction*. Int. J. Materials and Product Technology, Vol. 21, Nos. 1/2/3, 2004. (diakses 28 Mei 2008).
- Chirita, Bogdan. 2003. *Experimental Study of The Influence of Blankholder Force on Spring-Back of Sheet Metal*. Romania: Archives Of Civil And Mechanical Engineering Vol III.
- Dieter, George E. 1988. *Mechanical Metalurgy: SI Metric Edition*. London: McGraw-Hill.
- Donaldson, Cyrill. 1969. *Tool Design*. New Delhi: Mc Graw Hill
- Eary, DF. 1974. *Techniques of Press Working Sheet Metal*. New Jersey: Prentice Hall.
- Emmens ,Wilko C. 1998. *Some Frictional Aspects of Aluminium in Deep Drawing*. Netherlands: International Congress on Tribology of Manufacturing Processes.
- Iriondo Plaza, Eburne. 2007. *Electromagnetical Impulsed Springback Calibration*. Bilbao: The University of the Basque Country
- Hosford, William. 1986. *Metal Forming*. New Jersey: Prentice Hall.
- Kalpakjian, Serope . 1990. *Manufacturing Engineering and Technology*. United State of America: Addition Wesley, Publishing Co.
- Keum, Y.T. and Han, B.Y.. 2002. *Springback of FCC Sheet in Warm Forming*. South Korea: Hanyang University.
- Lange, Kurt. 1985. *Handbook of Metal Forming*. Mc Graw Hill.
- Nuruddin, Abdul Wahid. 2005. *.Pengaruh Annealing Pada Material JIS G 3131 SPHC Terhadap Nilai Springback Dengan Berbagai Variasi Sudut Bending*. Malang: Universitas Brawijaya Malang.
- Schuler. 1998. *Metal Forming Handbook*. Germany: Springer – Vertag Berlin Heidelberg

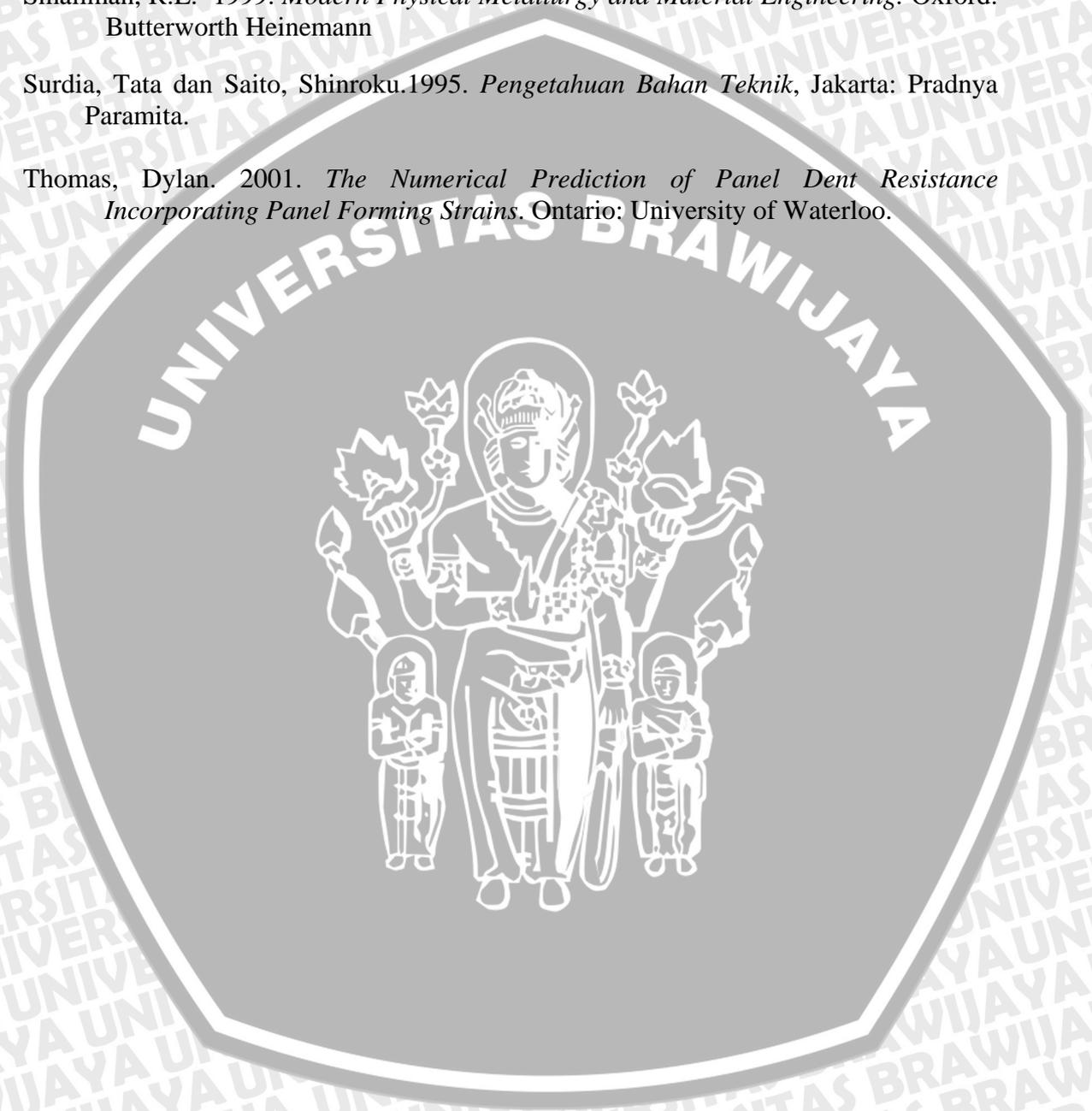
Setyafanani, Ahmad Hasnan. 2006. *Pengaruh Radius Die dan Kedalaman Drawing Terhadap Gaya Drawing Pada Die Keramik*. Malang: Universitas Brawijaya Malang.

Siswosuwarno, Mardjono. 1985. *Teknologi Pembentukan Logam*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Smallman, R.E. 1999. *Modern Physical Metallurgy and Material Engineering*. Oxford: Butterworth Heinemann

Surdia, Tata dan Saito, Shinroku.1995. *Pengetahuan Bahan Teknik*, Jakarta: Pradnya Paramita.

Thomas, Dylan. 2001. *The Numerical Prediction of Panel Dent Resistance Incorporating Panel Forming Strains*. Ontario: University of Waterloo.



Lampiran 1

Tabel Distribusi nilai F dengan  $\alpha = 5\%$ .

F - Distribution ( $\alpha = 0.05$  in the Right Tail)

df <sub>2</sub>	df <sub>1</sub>	Numerator Degrees of Freedom								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54
2		18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385
3		10.128	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123
4		7.7086	9.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	6.9988
5		6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725
6		5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990
7		5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767
8		5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881
9		5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789
10		4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204
11		4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962
12		4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964
13		4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144
14		4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458
15		4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876
16		4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377
17		4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943
18		4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563
19		4.3807	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227
20		4.3512	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928
21		4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3660
22		4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419
23		4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201
24		4.2597	3.4028	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002
25		4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821
26		4.2252	3.3690	2.9752	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655
27		4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501
28		4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360
29		4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2783	2.2229
30		4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107
40		4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240
60		4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2541	2.1665	2.0970	2.0401
120		3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2899	2.1750	2.0868	2.0164	1.9588
∞		3.8415	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799



Lampiran 2

Data Hasil Pengujian Komposisi Unsur Penyusun Material Aluminium Paduan

06-Mar-2009 09:19:07

**Sample results**

Page 1

Sample ident
Aluminium Paduan

Application	<Standardless>
Sequence	1 of 1
Measurement time	06-Mar-2009 09:16:13
Position	1

Compound	Al	P	Ca	Ti	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Ba	Yb	Re	Os
Conc	98.4	0.27	0.17	0.028	0.815	0.015	0.154	0.013	0.030	0.03	0.02	0.004	0.031
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

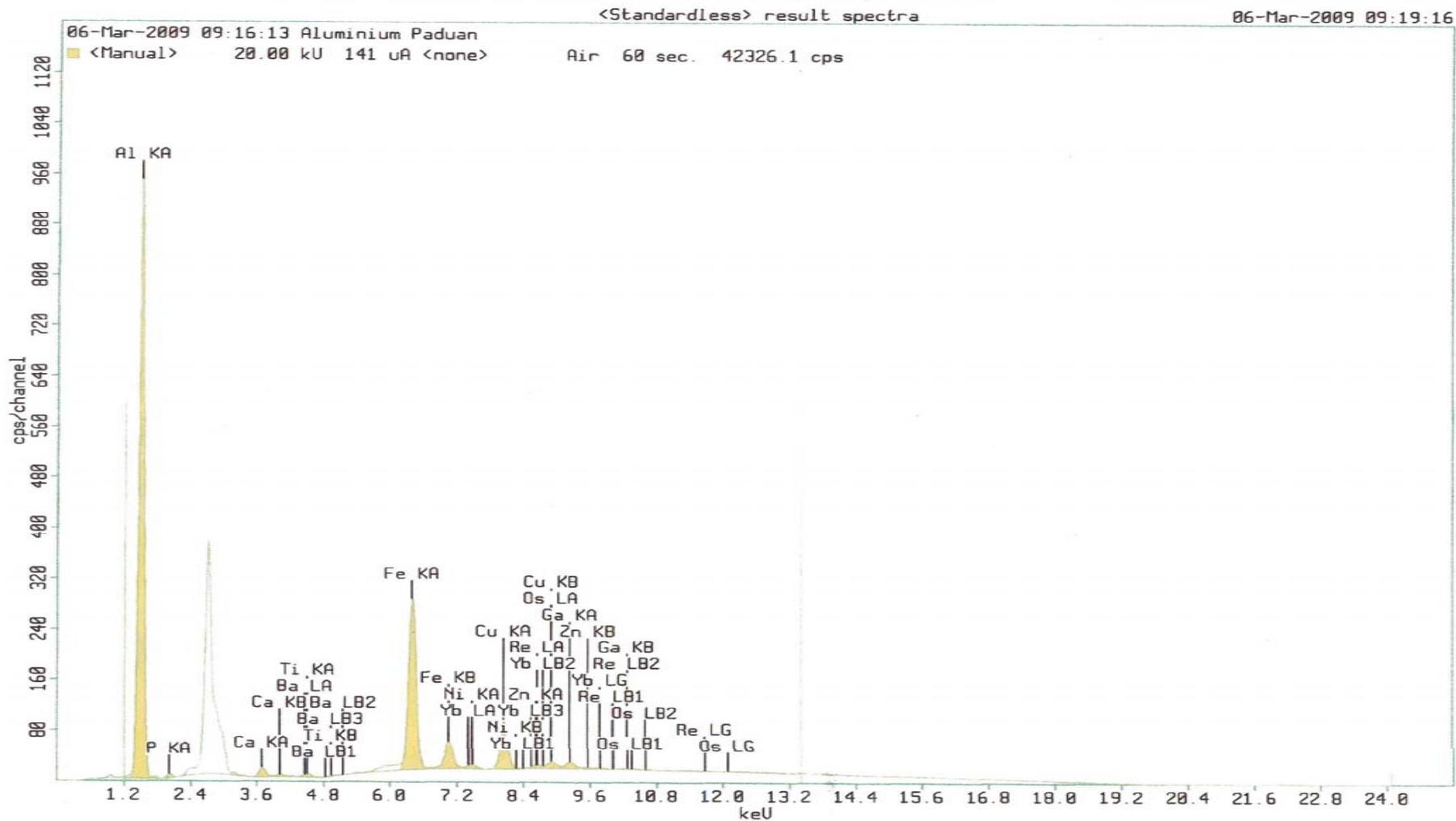


*[Handwritten Signature]*  
A. Firdaus



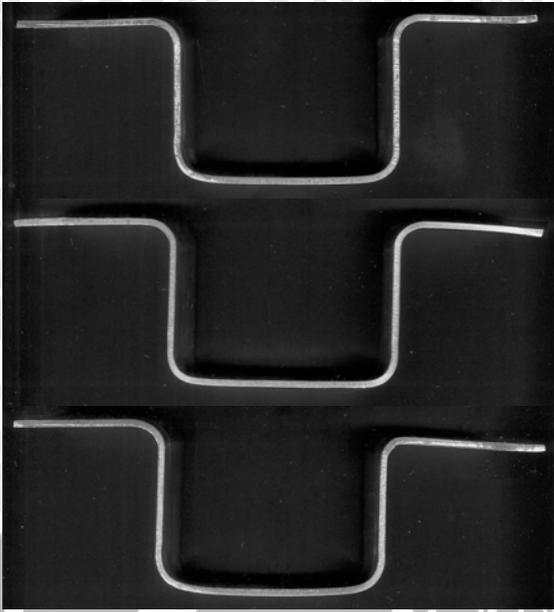
Lampiran 3

Spectra Hasil Pengujian Komposisi Unsur Penyusun Material Aluminium Paduan

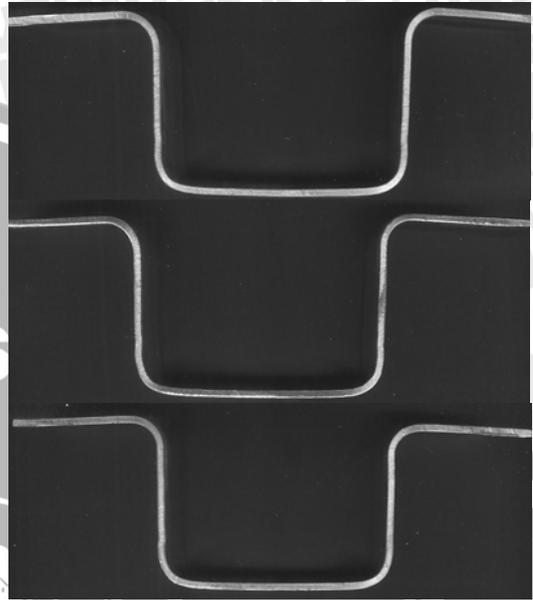


Lampiran 4 : Spesimen Hasil Pengujian

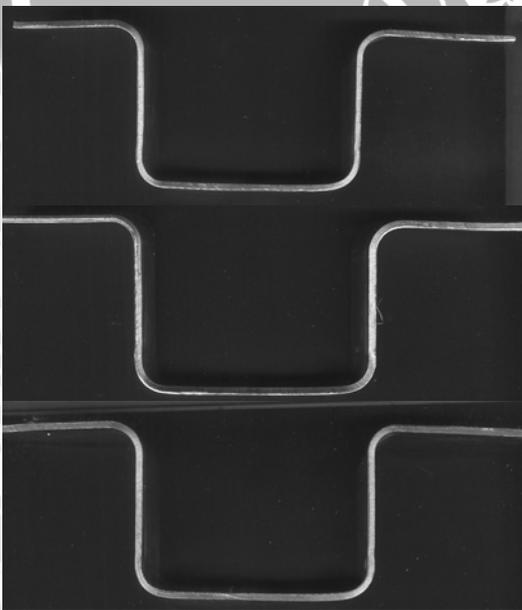
Aluminium dengan *annealing*  
(*die clearance* 10% dari tebal *blank*)



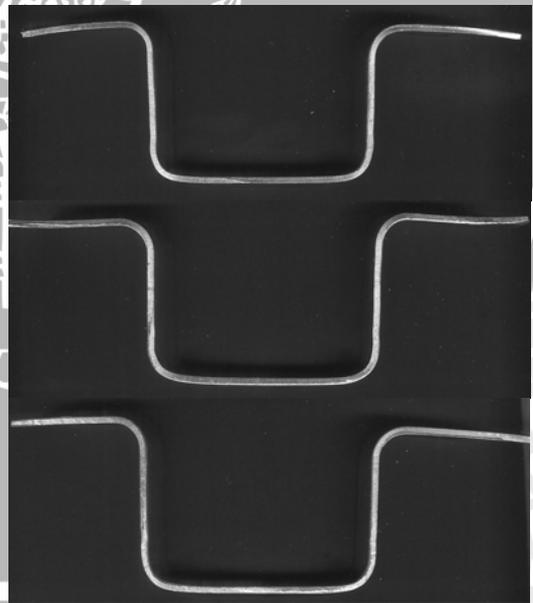
Aluminium dengan *annealing*  
(*die clearance* 20% dari tebal *blank*)



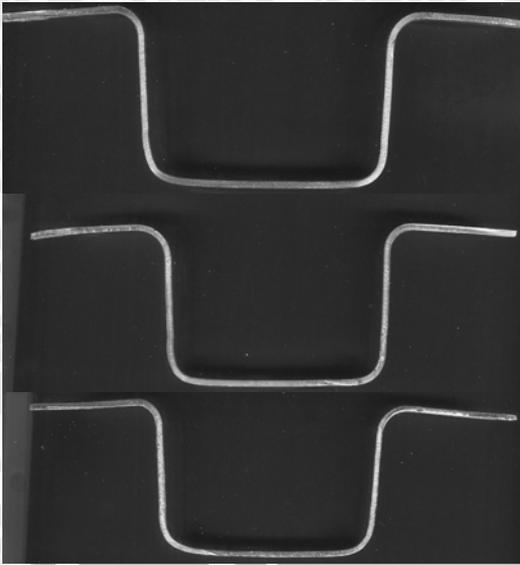
Aluminium tanpa *annealing*  
(*die clearance* 10% dari tebal *blank*)



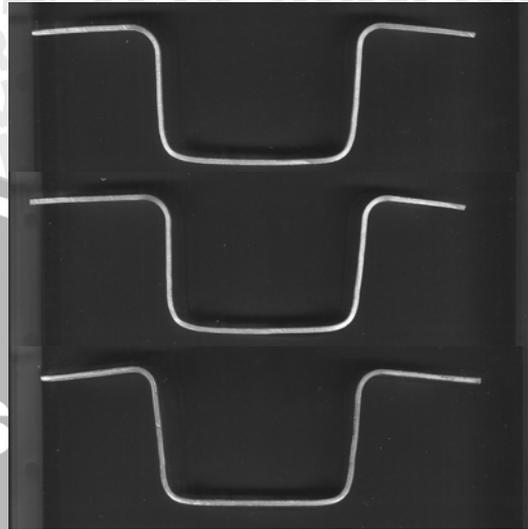
Aluminium tanpa *annealing*  
(*die clearance* 20% dari tebal *blank*)



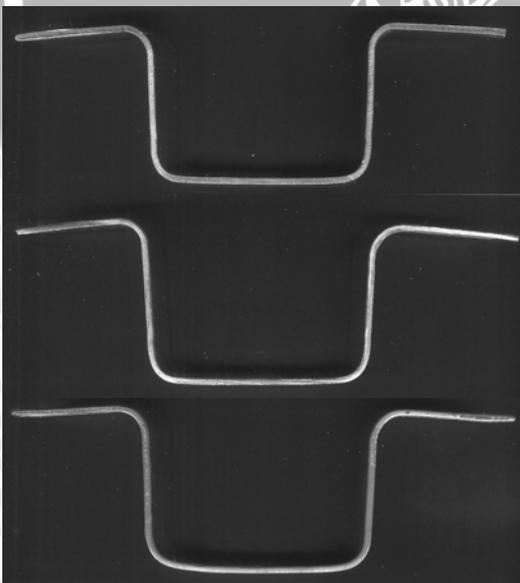
Aluminium dengan *annealing*  
(*die clearance* 30% dari tebal *blank*)



Aluminium dengan *annealing*  
(*die clearance* 40% dari tebal *blank*)



Aluminium tanpa *annealing*  
(*die clearance* 30% dari tebal *blank*)



Aluminium tanpa *annealing*  
(*die clearance* 40% dari tebal *blank*)

