

TUGAS AKHIR (NA 1701)

3100099010922

**ANALISA PENGGUNAAN  
METODE SOVIET TECHNIQUE  
UNTUK MENGESTIMASI DEFORMASI  
PADA PENGELASAN SAMBUNGAN TUMPUL  
PELAT SS - 41 PRODUKSI KS**



RSPe  
623.843 2  
Dha  
a-1  

---

1996

OLEH :

**B.R.M. DHAYAWARDHANA A.**  
NRP. 4914100405

**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
1996**

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	23 SEP 1996
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	<del>654</del> 6547



# JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

## FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN ITS

### SURAT KEPUTUSAN TUGAS AKHIR (NA 1701)

No. : 32 /PT12.FTK2/M/1995

Nama Mahasiswa : .BRM. Dhayawardhana A. ....

Nomor Pokok : .4914100405 .....  
Tanggal diberikan tugas : 21 September 1995 .....  
Tanggal selesai tugas : 01 Maret 1996 .....  
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Heri Supomo, M.Sc. ....  
2. ....

#### Uraian / judul tugas akhir yang diberikan :

ANALISA PENGGUNAAN METODE 'SOVIET TECHNIQUE' UNTUK MENGESTIMASI DEFORMASI PADA-  
PENGELASAN SAMBUNGAN TUMPUL PELAT SS 41 PRODUKSI KS $\frac{1}{2}$

sOn

Surabaya, 25 Oktober 1995 199 5  
Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS



#### Tembusan :

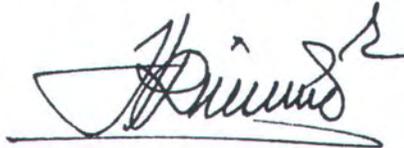
1. Yth. Dekan FTK-ITS.
2. Yth. Dosen Pembimbing.
3. Arsip.

# LEMBAR PENGESAHAN

Surabaya, Juli 1996

Mengetahui dan Menyetujui

Dosen Pembimbing Tugas Akhir,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Heri Supomo', written over a horizontal line.

Ir. Heri Supomo , M.Sc.

NIP. 131 842 506

PROSES VERBAL UJIAN TUGAS AKHIR (NA 1701)

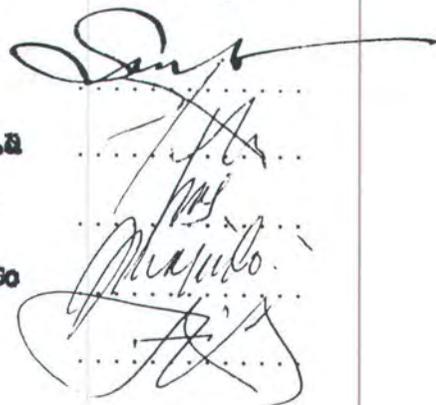
1. Nama mahasiswa : .BRM. Dhayawardhana . . . . .
2. N.R.P. : .4914100405. . . . .
3. Semester : ~~Genap~~ / Genap \*) 19 95 . . / 19 96 . .
4. Hari / Tanggal : . Selasa, 6 Agustus 1996 . . . . .
5. Waktu yang disediakan : 90 (sembilanpuluh) menit
6. Waktu ujian : Pukul . . 12.00 . . . . . s/d Pukul . . 13.30 . . . . .
7. Tim penguji :

N a m a

Tanda Tangan

K e t u a

: Ir. Soewidy, M.Eng . . . . .



Anggota

1. Ir. P. Eko Prasetyo, Ph.D . . . . .

2. Ir. Hari Supomo, M.Sc . . . . .

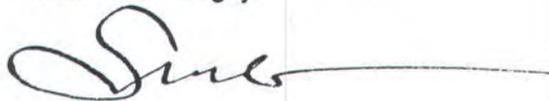
3. Ir. Setiyo Nugroho, M.Sc . . . . .

4. Ir. Dadio Santosa . . . . .

8. Kejadian-kejadian penting selama ujian berlangsung :

9. Perbaikan yang harus dilakukan (maksimum 2 minggu) :

Surabaya, 06 Agustus 19 96  
Ketua Tim Penguji



Ir. Soewidy, M.Eng . . . . .

\*) = Coret yang tidak perlu

## ABSTRAK

Pengelasan pelat dengan sambungan tumpul merupakan metode penyambungan antarpelat yang kerap kali digunakan. Namun, dampak yang kurang menguntungkan juga tidak jarang dijumpai. Akibat adanya pengelasan maka akan terjadi tegangan sisa. Dengan adanya tegangan sisa tersebut, bila dalam pengelasan dibiarkan bergerak leluasa pada saat pemanasan dan pendinginan maka benda kerja akan mengalami distorsi/ perubahan bentuk, akibat berkembangnya peregangan - peregangan (*strain*) rumit yang secara keseluruhan bergabung membentuk *internal stress* sehingga blok - blok kristal tergelincir yang satu terhadap yang lain sepanjang bidang kristalografi tertentu, yang disebut bidang slip. Dari sinilah awal timbulnya gejala - gejala *bending*, *mulet*, dan kepatahan (*buckling*). Gejala - gejala yang terkuifikasi di dalam distorsi berupa *deformasi angular*, pada suatu konstruksi, akan mengurangi ketelitian ukuran, keindahan, dan kekuatannya.

Prediksi terhadap kemungkinan adanya deformasi sebagai suatu upaya preventif, dilakukan dengan menggunakan suatu metode pendekatan semi empiris : "SOVIET TECHNIQUE" yang berpegangan pada prinsip *heat transfer* dan kekuatan material. Oleh karena prediksi ini akan berkaitan dengan kekuatan dari sambungan suatu las - lasan sebagai langkah pencegahan terhadap terjadinya kecacatan, maka analisa teknis dilakukan terhadap variasi deformasi yang bakal timbul dengan pelbagai input parameter.

Tingkat keakurasian hasil prediksi dianalisa dan disimpulkan berdasarkan analogi dengan hasil pengamatan visual-fisik pada akhir percobaan pengelasan.

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami haturkan kepada-Mu, Ya Tuhan Allah Bapa kami Yang Maha Kuasa, atas semua berkat dan kasih-Mu yang senantiasa menyertai dan mendampingi kami sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini, yang berjudul :

### **ANALISA PENGGUNAAN METODE *SOVIET TECHNIQUE* DALAM MENGESTIMASI TINGKAT DEFORMASI PADA PENGELASAN DENGAN SAMBUNGAN TUMPUL PELAT SS - 41 PRODUKSI KS.**

Tugas Akhir ini diajukan sebagai syarat akademis bagi mahasiswa untuk menyelesaikan kuliah dan mencapai gelar kesarjanaan di Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Sebagai suatu bentuk perjuangan dalam mewujudkan tugas akhir ini yang pasti tidak akan dapat lepas dari segala bantuan, dorongan, dan bimbingan, maka perkenankanlah penulis untuk menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Papa ( Alm. ) dan Mama yang tercinta, Mas Boy, dan Mbak Ita yang memotivasi dan menjadikan saya seperti sekarang ini, Mbeta, Mas Benny, Mbak Dewi, Mas Doddy, dan Maya, untuk semua rasa kebersamaan dalam ikatan persaudaraan di antara kita.
2. Bapak Ir. Heri Supomo , M.Sc., selaku dosen pembimbing tugas akhir, atas segala bantuan, kritik, maupun saran dan pengarahan yang diberikan selama penulisan.
3. Bapak Ir. Soejitno, selaku ketua Jurusan Teknik Perkapalan.
4. Bapak Ir. Achmad Zubaydi, ME., selaku sekretaris Jurusan Teknik Perkapalan.

5. Bapak Ir. Budi Santosa, selaku dosen wali atas segala perhatian dan bimbingan selama kuliah.
6. Bapak Ir. Triwilaswandio W.P., M.Sc., untuk kesempatan pengujian yang diberikan.
7. Seluruh pimpinan dan karyawan Laboratorium Las Politeknik Perkapalan Surabaya : Pak Sugiarto, Mas Pudji, Mas Mahfud, dan seluruh karyawan yang telah terlibat dalam eksperimen ini , yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.
8. Fenna, Vera, dan Siska, untuk semangat dan inspirasinya.
9. Semua rekan-rekan se-angkatan ( P-31) dan anak-anak J-7 , atas kerja sama dalam diskusi, kontribusi untuk masukan teknis dan non-teknisnya, hingga dukungan fasilitas baik perangkat keras maupun lunak.
10. Dan akhirnya kepada semua pihak, personal maupun lembaga, yang telah ikut berperan serta dalam mewujudkan karya tulis ini.

Penulis menyadari bahwa dalam laporan ini masih terdapat banyak kekurangan baik isi maupun tata bahasa yang ada di dalam tugas akhir ini. Hal ini disebabkan oleh karena keterbatasan kemampuan dari penulis. Untuk itu penulis membuka diri sepenuhnya terhadap segala kritik dan saran demi perbaikan dan pengembangan isi penulisan dalam tugas akhir ini. Semoga bermanfaat dan terima kasih.

Surabaya, Juli 1996,

B.R.M. Dhayawardhana A.

## DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	
LEMBAR SALINAN SK TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR NOTASI	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Dasar Pemikiran	1
1.2. Permasalahan	2
1.3. Tujuan Penulisan	3
1.4. Batasan Permasalahan	3
1.5. Metodologi dan Model Analisis	4
1.6. Sistematika Pembahasan	6
<b>BAB II KONSEP DASAR</b>	
2.1. Pendahuluan	8
2.2. Komposisi dan Struktur Baja	8
2.2.1. Baja Karbon	8
2.2.2. Diagram Fase Sistem Besi - Karbon ( Fe - Fe <sub>3</sub> C )	11
2.2.3. Transformasi Fase pada Saat Pemanasan	14

2.2.4. Transformasi Fase Pada Saat Pendinginan	16
2.2.5. Temperatur Austenit pada Temperatur Tetap	19
2.3. Sifat-Sifat Baja	24
2.3.1. Kepadatan	24
2.3.2. Konduktivitas Listrik	24
2.3.3. Konduktivitas Termal	25
2.3.4. Koefisien Ekspansi Termal	26
2.3.5. Titik Lebur	27
2.3.6. Panas Spesifik	28
2.4. Karakteristik Pengelasan Logam	29
2.4.1. Pengelasan Las Busur Listrik : Las Busur Redam	30
2.4.2. Jenis Sambungan dalam Pengelasan : Sambungan Tumpul	33
2.4.3. Pengelasan Baja Karbon	35
2.4.4. Siklus Termal Las	36
2.5. Deformasi Pelat	38
2.5.1. Deformasi Struktur Logam	38
2.5.2. Deformasi Elastis	39
2.5.3. Deformasi Plastis	40
2.6. Perubahan Bentuk dalam Pengelasan	
2.6.1. Klasifikasi Perubahan Bentuk dan Faktor yang Mempengaruhi	40
2.6.2. Perubahan Bentuk Sudut dalam Las Tumpul	41
<b>BAB III METODE ESTIMASI DEFORMASI ANGULAR : <i>SOVIET TECHNIQUE</i></b>	
3.1. Umum	45
3.2. Karakteristik Metode	45

3.3. Prosedur	49
3.4. Rancangan Hasil	57
3.4.1. Parameter - Parameter Masukan	57
3.4.2. Perhitungan	58
3.4.3. Keluaran Hasil	59
3.5. Contoh Numerik	60
<b>BAB IV PERSIAPAN DAN PELAKSANAAN PENGUJIAN</b>	
4.1. Pendahuluan	63
4.2. Pengujian Pengelasan dengan Variasi Lebar Pelat ( L )	64
4.2.1. Spesimen Uji	64
4.2.2. Persiapan Spesimen Uji	67
4.2.3. Pengelasan	68
4.3. Pengujian Pengelasan dengan Variasi Panjang Pelat ( P )	72
4.3.1. Spesimen Uji	73
4.3.2. Persiapan Speimen Uji	74
4.3.3. Pengelasan	75
4.4. Pengukuran Dimensi dan Deformasi	75
4.4.1. Spesimen Pengukuran	75
4.4.2. Alat - Alat Pengukuran	76
4.4.3. Prosedur Pengukuran Dimensi dan Deformasi	76
<b>BAB V HASIL PENGUJIAN DAN PERHITUNGAN</b>	
5.1. Hasil Pengujian	79
5.1.1. Hasil Pengujian Pengelasan dengan Variabel Lebar Pelat ( L )	80
5.1.2. Hasil Pengujian Pengelasan dengan Variabel Panjang Pelat ( P )	80

5.2. Hasil Perhitungan	81
<b>BAB VI ANALISA HASIL PENGUJIAN DAN PERHITUNGAN</b>	
6.1. Umum	83
6.2. Akurasi Metode terhadap Pengaruh Lebar Pelat Pengelasan	83
6.3. Akurasi Metode terhadap Pengaruh Panjang Pelat pengelasan	86
6.4. Analisa Metode terhadap Pengaruh Tebal Pelat Pengelasan	88
6.5. Kesimpulan Penggunaan Metode	90
<b>BAB VII PEMBAHASAN MASALAH</b>	
7.1. Umum	91
7.2. Hubungan Pengujian dengan Pembuktian Perhitungan Hasil Metode	91
7.3. Tinjauan Analisis terhadap Penggunaan Metode Pendekatan Soviet Technique	92
7.4. Hambatan - Hambatan Penulisan	96
<b>BAB VIII KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
8.1. Kesimpulan	98
8.2. Saran	99
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>LAMPIRAN - LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

- 2.1. : diagram fase sistem besi - karbon
- 2.2. : bagian kiri bawah dari diagram fase besi - karbon
- 2.3. : skema perubahan struktur mikro
- 2.4. : skema pertumbuhan perlit
- 2.5. : struktur mikro perlit
- 2.6. : struktur mikro baja hypoeutetoid
- 2.7. : digram TTT untuk baja karbon eutektoid
- 2.8. : model susunan atom pada transformasi austenit - martensit
- 2.9.: pengaruh kadar karbon terhadap kekerasan martensit dan prosentase kenaikan terhadap kekerasan
- 2.10: pengaruh kadar karbon dalam austenit terhadap temperatur Ms dan Mf
- 2.11: titik lebur dari pelbagai logam dalam dua derajat temperatur
- 2.12: skema pengelasan busur redam
- 2.13: hubungan kecepatan pemindahan logam dengan arus pengelasan dalam las busur redam
- 2.14: mesin las busur redam
- 2.15: alur sambungan las tumpul
- 2.16: pengaruh perbandingan Mn/ C terhadap kurva transisi
- 2.17: kekuatan takik dari baja rim, baja kil, dan baja semi-kil
- 2.18: siklus termal las pada beberapa jarak dari batas las
- 2.19: siklus termal dalam las busur tangan

- 2.20: perubahan bentuk pada lasan
- 2.21: diagram skematik hubungan antara perubahan sudut dan tebal pelat pada kondisi las yang tetap
- 2.22: terjadinya perubahan sudut selama siklus termal
- 2.23: diagram skematik hubungan antara perubahan sudut dan kondisi pengelasan
- 2.24: hubungan antara perubahan sudut dan kondisi pengelasan dalam batang uji manik pada pelat
- 2.25: pengaruh bentuk alur terhadap perubahan sudut pada las tumpul
- 3.1. : geometri pelat sambungan las tumpul tanpa penahanan sisi
- 3.2. : geometri pelat sambungan las tumpul dengan penahanan sisi
- 3.3. : kurva koefisien energi panas flux  $K_f$  terhadap diameter elektrode las  $d_e$
- 3.5. : sketsa tinggi potongan melintang kampuh las tumpul  $t_i$  untuk variasi bentuk persiapan sisi
- 3.6. : sketsa daerah pengelasan
- 3.7. : kurva koefisien kontraksi pelat akibat panas  $K_t$  terhadap parameter intensitas panas  $P$
- 3.8. : kurva efisiensi transfer panas  $\eta_o$  terhadap parameter transmisi panas  $\epsilon$
- 3.9. : kurva parameter pass las terhadap jumlah pass pengelasan  $m$
- 4.1. : model sambungan antardimensi pelat
- 4.2. : proses pemotongan pelat dengan mesin semi-otomat
- 4.3. : pola bentuk tanda/ marker dan simpul pada permukaan pelat uji
- 4.4. : bentuk-bentuk persiapan sisi dan sudut bevel  $\theta$
- 4.5. : las titik/ tig weld pada spesimen uji
- 4.6. : mesin las SAW dan spesimen uji yang siap dilas
- 4.7. : proses pengelasan dengan metode SAW

- 4.8. : spesimen uji hasil pengelasan
- 4.9. : model sambungan antardimensi pelat
- 4.10: skema penampang spesimen untuk pengukuran deformasi
- 4.11: spesimen uji yang diklem/ dijepit pada meja perata
- 5.1. : bentuk dan sudut deformasi pada spesimen uji
- 5.2. : bentuk geometri 3-D deformasi sudut pelat 350 x 200 x 15
- 6.1. : hubungan tebal pelat dengan sudut deformasi
- 6.2. : kecenderungan akurasi metode terhadap hasil pengujian untuk tebal pelat
- 7.1. : analisa hasil eksperimen terhadap kurva hasil teori
- 7.2 : hubungan antara  $W_A - W$  dan tebal pelat

## DAFTAR TABEL

- 2.1 : klasifikasi baja karbon
- 2.2. : spesifikasi baja lunak
- 2.3. : nilai kepadatan untuk pelbagai logam
- 2.4. : nilai konduktivitas listrik logam
- 2.5. : nilai konduktivitas termal logam
- 2.6. : nilai koefisien ekspansi termal untuk pelbagai logam
- 2.7. : nilai panas spesifik untuk untuk pelbagai logam
- 2.8. : ukuran diameter kawat terhadap besar arus las
- 3.1. : rangkuman data - data masukan
- 4.1. : spesifikasi prosedur dan tipe sambungan las pengelasan
- 5.1. : hasil pengujian untuk variasi lebar pelat ( L )
- 5.2. : hasil pengujian untuk variasi panjang pelat ( P )
- 5.3. : hasil perhitungan sudut deformasi untuk tebal pelat 7 mm
- 6.1. : tabel hubungan harga  $f_{\beta}$  hasil perhitungan dan pengukuran
- 6.2. : tabel akurasi metode terhadap variabel tebal pelat

## DAFTAR NOTASI

- $a$  = jangkauan panjang pelat
- $a_0$  = rata-rata perpindahan panas dalam pelat
- $b$  = lebar pelat pengelasan
- $c$  = kapasitas panas spesifik dalam pelat
- $d_e$  = diameter elektrode
- $f_\beta$  = tinggi deformasi maksimum
- $I$  = arus pengelasan
- $K_f$  = koefisien energi panas flux
- $K_m$  = koefisien
- $K_t$  = koefisien kontraksi
- $l$  = panjang pelat
- $m$  = nomor pass
- $P$  = intensitas panas
- $p$  = koefisien
- $q_p$  = energi panas per unit panjang pelat pengelasan
- $q_p'$  = energi panas efektif per unit panjang
- $q_{pf}$  = energi panas yang terserap oleh flux
- $S$  = parameter
- $T_0$  = temperatur yield pelat
- $t_i$  = tinggi potongan melintang pelat pengelasan untuk setiap pass ke- $i$
- $t_p$  = ketebalan pelat

$U$  = tegangan busur las

$V$  = kecepatan pengelasan

$v$  = volume pengurangan memanjang pengelasan untuk setiap unit panjang

$v_m$  = volume pengurangan memanjang untuk setiap satu pass pengelasan

$\alpha$  = koefisien ekspansi linier

$\beta$  = sudut deformasi angular

$\gamma$  = kerapatan jenis material

$\epsilon$  = parameter transmisi panas

$\epsilon_{cr}$  = deformasi kritis

$\epsilon_s$  = prosentase kemuluran material sampai batas yield

$\eta$  = efisiensi efektif

$\eta_o$  = efisiensi perpindahan panas

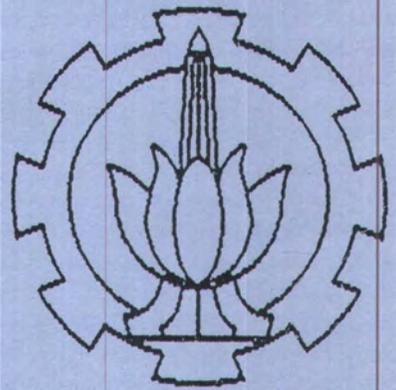
$\theta$  = koefisien

$\lambda$  = konduktivitas termal

$\psi_o$  = koefisien pemanasan relatif

## DAFTAR LAMPIRAN

- LAMPIRAN A spesifikasi prosedur pengelasan SAW untuk 4 variabel tebal pelat
- LAMPIRAN B tabel pengukuran titik - titik uji deformasi untuk variasi lebar pelat
- LAMPIRAN C gambar bentuk deformasi sudut pelat untuk variasi lebar pelat
- LAMPIRAN D tabel pengukuran titik - titik uji deformasi untuk variasi panjang pelat
- LAMPIRAN E gambar bentuk deformasi sudut pelat untuk variasi panjang pelat
- LAMPIRAN F tabel pengukuran tinggi deformasi maksimum  $f_{\beta}$  dan sudut deformasi  $\beta$
- LAMPIRAN G tabel dan gambar variasi lebar pelat terhadap sudut deformasi
- LAMPIRAN H tabel dan gambar variasi panjang pelat terhadap sudut deformasi
- LAMPIRAN I perhitungan fungsi persamaan garis grafik S -  $\beta$  dengan metode regresi polinomial orde 2
- LAMPIRAN J tabel proses perhitungan sudut deformasi dengan metode pendekatan
- LAMPIRAN K gambar grafik akurasi perhitungan terhadap tinggi deformasi maksimum dan lebar pelat hasil pengujian
- LAMPIRAN L perhitungan prosentase kecenderungan grafik regresi linier orde satu
- LAMPIRAN M perhitungan pengujian tingkat akurasi dengan metode koefisien korelasi *spearman* untuk taraf signifikansi (  $\alpha$  ) 0.05
- LAMPIRAN N *mill certificate* baja SS - 41 ( *mild steel* ) PT. KRAKATAU STEEL



*B.A.B.* **I**

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. DASAR PEMIKIRAN

Perekayasaannya suatu format dari konstruksi baja pada saat ini hampir keseluruhannya menggunakan teknik pengelasan logam dan pada dasarnya teknik pengelasan logam ini sudah bukan lagi merupakan suatu hal yang baru, tetapi telah menjadi suatu kebutuhan pokok untuk mencapai hasil yang optimal dalam perekayasaannya. Dalam perekayasaannya suatu konstruksi banyak dituntut suatu hasil yang benar-benar memenuhi persyaratan baik dari segi kekuatan maupun dalam segi ekonomisnya dan teknologi pengelasan logam adalah jawaban yang tepat pada saat ini.

Sebagai metode penyambungan logam yang pada dasarnya adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair maka teknologi pengelasan logam mempunyai keistimewaan dan keuntungan jika dibandingkan dengan metode lain yang juga telah berkembang, sistem keling misalnya.

Tetapi di samping kelebihan-kelebihan yang dipunyainya, teknologi pengelasan logam mempunyai ciri yang tidak bisa dihindarkan selama ini dan merupakan ciri utamanya, yaitu dengan teknik ini dapat menimbulkan bermacam bentuk deformasi struktur dan metalurgi yang berakibat pada perubahan bentuk struktur yang dikarenakan panas pengelasan dan proses pendinginan yang tidak merata baik pada logam las maupun pada logam induk.

Deformasi yang terjadi pada suatu konstruksi akan mengurangi ketelitian ukuran, keindahan, dan kekuatan dari konstruksi tersebut. Apabila deformasi ini telah terbentuk,

untuk memperbaiki kembali diperlukan waktu dan tenaga yang cukup banyak. Seperti yang selama ini dikembangkan dengan metode-metode yang lebih bersifat kuratif/ perbaikan untuk mengeliminir pengaruh distorsi, misalnya dengan pemberian gaya awal yang berlawanan arah dengan kemungkinan terjadinya distorsi dan dikenal dengan metode *clamping*, kemudian perlakuan panas yang diberikan setelah suatu konstruksi mengalami distorsi akibat proses pengelasan, dikenal dengan nama *line heating*, *spot heating*, dll.

## 1.2. PERMASALAHAN

Deformasi harus sedapat mungkin harus dihindari sejak dari awal, yaitu sebelum proses pengelasan dilaksanakan. Hal ini jelas membutuhkan nilai-nilai parameter dari suatu proses pengelasan yang sangat jamak dan kompleks untuk dikupas satu per satu. Sementara teori-teori matematis secara eksak tidak tersedia dan jalur pengujian secara eksperimental tidak mungkin dilakukan. Kompleksitas masalah semakin tajam ketika untuk satu jenis parameter memiliki tingkat variansi yang berbeda-beda.

Pengalaman selama ini di lapangan menunjukkan kecenderungan bahwa cara penanggulangan deformasi, baik itu saat sebelum proses pengelasan maupun pada saat proses pengelasan berlangsung, lebih bersifat coba-coba (*trial and error*). Hal ini dikarenakan tidak adanya akurasi data deformasi yang melandasinya. Sehingga hasilnya pun jauh dari yang diharapkan.

Berdasar permasalahan yang ada, tuntutan akan solusi dikembangkan melalui upaya penerapan suatu metode pendekatan empiris atau semi-empiris tertentu yang jelas lebih mengarah kepada kegiatan kontrol dan pengendalian terhadap pencegahan akan terjadinya fenomena deformasi pada pelat hasil pengelasan.

### I.3. TUJUAN PENULISAN

- 1). Memperoleh hasil perbandingan antara metode yang dipakai dengan hasil dari pengujian eksperimental yang dituangkan dalam bentuk pemetaan gambar kurva/grafik, beserta prosentase tingkat keakurasian metode yang digunakan sebagai analisa keandalan dalam penggunaan.
- 2). Mengetahui korelasi antara tingkat perubahan parameter data masukan terhadap besar deformasi yang akan terjadi.

### I.4. BATASAN PERMASALAHAN

Dengan tujuan untuk lebih memperjelas persoalan dan mempertajam pemahaman dari penekanan masalah yang ditulis dalam tugas akhir ini, maka perlu dilakukan pembatasan masalah sehingga tujuan dari penulisan tugas akhir ini dapat tercapai, yaitu :

- 1). Material yang digunakan adalah jenis baja lunak ( mild steel ) SS-41 produksi PT. KRAKATAU STEEL ( KS ), dengan 4 variasi untuk : panjang, lebar, tebal.
- 2). Sifat-sifat termal material yang digunakan tidak dipengaruhi oleh proses panas hasil pemotongan ( cutting ), sehingga permukaan pelat sebelum pengelasan diasumsikan rata.
- 3). Asumsi deformasi yang terjadi hanya diakibatkan oleh deformasi sudut ( angular ).
- 4). Percobaan dilaksanakan dengan memakai metode pengelasan SAW ( Submerged Arc Welding ), otomatis penuh, pelat tanpa penahanan sisi ( unrestricted edges ).
- 5). Kemungkinan terjadinya cacat las lain diabaikan.
- 6). Titik berat pembahasan pada perbandingan hasil perhitungan metode pendekatan terhadap hasil percobaan. Pembahasan tentang struktur, kekuatan, dan mekanisme pengelasan logam tidak dibahas secara mendalam.

## 1.5. METODOLOGI DAN MODEL ANALISIS

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini :

### 📁 Studi literatur sebagai landasan analisa

Untuk mendapatkan teori-teori yang digunakan dalam menganalisa pengaruh pengelasan setempat ( *post welded* ) terhadap deformasi pelat material. Literatur-literatur hasil penelitian berupa metode penyelesaian digunakan sebagai pembanding dan gambaran awal mengenai hasil percobaan.

### 📁 Pengumpulan data-data parameter dan data-data hasil pengujian di bengkel.

Data-data parameter berupa : geometri pelat, data material, dan data pengelasan, digunakan sebagai input bagi penyelesaian empiris. Untuk data material baja SS-41 ( *mild steel* ), berupa :

- *strain at yield point,*
- *strain corresponding to the yield limit,*
- *modulus of elasticity*
- *yield temperatur.*

diperoleh dengan didahului pengujian berupa uji tarik yang ditentukan dengan mengikuti standar JIS ( *Japanese Industrial Standar* ) Z2201. Material specimen diperoleh dari PT. PAL Indonesia. Specimen untuk pengujian tarik dibuat dengan dimensi yang sesuai dengan JIS Z2201. Dalam pembuatan specimen uji tarik, dimensi material, gauge length dan paralel length tergantung pada luas penampang specimen. Sehingga untuk ketebalan yang berbeda, dimensi specimen uji tarik juga akan berbeda. Penentuan ini juga didasarkan pada kekuatan maksimum mesin uji tarik ( *Universal Test Machine* ) yang digunakan, luas penampang specimen dengan ketebalan yang terbesar serta kekuatan tarik material SS-41 (antara 41kg/ mm

sampai 52 kg/ mm ). Material yang dipakai dalam pengujian adalah baja SS-41 produksi PT. KRAKATAU STEEL ( KS ). Dalam JIS, yaitu JIS G-3101, baja SS-41 disebutkan sebagai *rolled steel* yang digunakan secara umum untuk struktur komersial. Material untuk pengujian dan pengelasan ( *base metal* ) diperoleh dari PT. PAL Indonesia, dari pelat yang akan dipakai untuk pembuatan konstruksi badan kapal. Sehingga data-data spesifikasi material, untuk :

- *density of material,*
- *specific heat capacity,*
- *thermal conductivity,*
- *melting point.*

Dari jenis material SS-41 ( mild steel ) produksi KS untuk 4 variabel yang ketebalan pelat yang direncanakan ( 7,10,12,15 mm )diperoleh melalui *Mill Certificate* yang dikeluarkan oleh PT. KRAKATAU STEEL melalui PT. PAL Indonesia selaku pihak pemesan, dan juga diperoleh dari literatur.

Kelengkapan data untuk welding, meliputi :

- *electrode diameter,*
- *weld velocity,*
- *current & voltage*

direncanakan dipakai dengan menggunakan metode pengelasan SAW ( *Submerged Arc Welding* ), multi pass, semi-otomat, pada pengelasan sambungan tumpul ( *butt-joint* ) dengan standar pengerjaan dari karakteristik mesin las. Teknis pelaksanaan pengelasan sambungan tumpul dibedakan untuk variansi pengujian : variansi lebar pelat dan variansi panjang pengelasan. Variansi ini diperlukan sebagai pertimbangan

analisa selain perbedaan/ variasi dari tingkat ketebalan dari data geometri pelat yang diperhitungkan.

#### 📁 Perhitungan prediksi dengan metode pendekatan

Metode *Soviet Technique* dipakai sebagai langkah penyelesaian secara empiris berdasar input-input data di atas. Dari Perhitungan tahap ini akan diperoleh prediksi untuk deformasi angular pada specimen uji yang dituangkan dalam bentuk hasil analisa grafis.

#### 📁 Pengujian perbandingan antara hasil perhitungan dengan hasil pengukuran tingkat deformasi

Specimen-specimen yang telah mengalami perlakuan panas akibat pengelasan setempat duji secara visual tingkat deformasi angularnya dengan menggunakan alat : *dial gauge* untuk tiap-tiap variasi specimen uji. Kemudian hasil-hasil ini dituangkan ke dalam suatu model grafis yang akan dianalogikan dengan bentuk grafis dari hasil prediksi/ perhitungan. Berangkat dari sinilah analisa untuk pemecahan masalah dipakai sebagai acuan dalam menentukan sebuah kesimpulan.

## 1.6. SISTEMATIKA PEMBAHASAN

### ➤ BAB I : PENDAHULUAN

Berisi tentang dasar pemikiran/ latar belakang, permasalahan, tujuan penulisan, batasan masalah, metodologi dan model analisis, serta sistematika pembahasan.

### ➤ BAB II : KONSEP DASAR

Berisi tentang konsep-konsep dasar yang mendasari penganalisaan dan pembahasan masalah, yaitu: struktur dan sifat bahan uji yang dipakai, karakteristik pengelasan

yang diterapkan, perilaku strukturmikro pelat dalam deformasi, dan perubahan bentuk fisik pelat akibat pengelasan atau proses laku panas yang diberikan.

⇒ **BAB III : METODE ESTIMASI DEFORMASI ANGULAR: *SOVIET TECHNIQUE***

Berisi tentang karakteristik dan komposisi metode yang diuraikan mulai dari bagaimana persamaan-persamaan dalam metode itu didapat dan jalan pemikirannya, hingga pada contoh penggunaan untuk kasus di lapangan.

⇒ **BAB IV : PERSIAPAN DAN PELAKSANAAN PENGUJIAN**

Berisi tentang variasi pengujian yang dilakukan, prosedur pengujian, dan pelaksanaan pengujian.

⇒ **BAB V : HASIL PENGUJIAN DAN PERHITUNGAN**

Berisi tentang susunan hasil-hasil yang didapat dari pengujian di lapangan dan hasil perhitungan secara teoritik, yaitu dengan metode pendekatan.

⇒ **BAB VI : ANALISA HASIL**

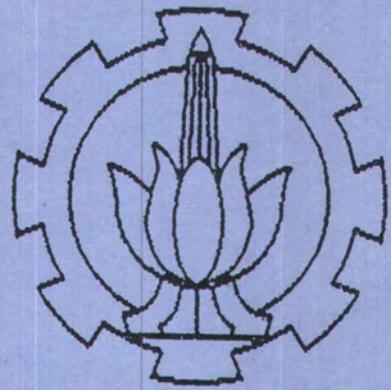
Berisi tentang proses pengolahan data hasil pengujian dan hasil perhitungan yang kemudian dianalisa berdasarkan konsep dasar sehingga diperoleh suatu kesimpulan sementara.

⇒ **BAB VII : PEMBAHASAN MASALAH**

Berisi tentang pemecahan masalah dengan konsep dasar, hasil pengujian lapangan dan hasil perhitungan dengan metode pendekatan dijadikan sebagai narasumber pembahasan, hingga diperoleh suatu kesimpulan yang menyeluruh terhadap kegiatan penulisan.

⇒ **BAB VIII : KESIMPULAN DAN SARAN**

Berisi tentang rangkuman yang diperoleh dari kegiatan penulisan.



*B.A.B* **II**

## **BAB II**

### **KONSEP DASAR**

#### **2.1. PENDAHULUAN**

Pengetahuan akan material bermula dari dua sumber utama. Pertama, sebagai hal yang paling mendasar dalam hukum-hukum fisika, adalah bagaimana material berperilaku dan mengapa material dapat berperilaku demikian. Kedua, adalah kuantitas informasi data yang diperoleh dari kegiatan eksperimen untuk menjelaskan dan menguatkan maksud di atas ( M.M. Eisenstadt, 1971 ). Kedua sumber itu acapkali digunakan untuk membahas permasalahan material maupu proses laku kerja yang dibebankan.

Perubahan sifat mekanis dan fisis dari material akan selalu terjadi pada material pelat yang mengalami proses pekerjaan panas seperti pemotongan pelat atau pengelasan. Perubahan ini harus dicermati agar material tetap memiliki keunggulan, meski sifat mekanis dan sifat fisisnya harus berubah. Dari sini tampak bahwa proses laku panas dapat digunakan untuk melakukan manipulasi sifat mekanik dan beberapa sifat fisik sesuai dengan kebutuhan/ keperluan. Proses laku-panas sangat menentukan sifat dari suatu produk logam/ paduan.

Deformasi pelat pada proses pengelasan misalnya, merupakan kecacatan yang setidaknya dapat dihindari, atau meskipun harus terjadi masih dalam batas-batas toleransi/ *allowance* yang dipersyaratkan.

#### **2.2. KOMPOSISI DAN STRUKTUR BAJA**

##### **2.2.1. Baja Karbon**

Baja (*steel*) adalah suatu produksi besi yang mengandung kadar karbon berkisar sekitar 1.7 %. Produk ini secara teknis dinyatakan sebagai baja karbon (*carbon steel*). Baja paduan (*alloy steel*) adalah suatu baja karbon yang telah dtambahkan satu atau lebih unsur-unsur tambahan dalam jumlah yang cukup untuk menghasilkan sifat-sifat yang dikehendaki, yang tidak dimiliki oleh baja karbon. Sedang baja karbon adalah paduan antara besi dan karbon dengan sedikit Si, Mn, P,S, dan Cu. sifat baja karbon sangat tergantung pada kadar karbon, karena itu baja ini dikelompokkan berdasarkan kadar karbonnya. Baja karbon rendah adalah baja dengan kadar karbon kurang dari 0.3 %, baja karbon sedang mengandung 0.30 % sampai 0.45 % C, dan baja kadar karbon tinggi berisi karbon antara 0.45 % sampai 1.70 %. Bila kadar karbon naik, kekuatan dan kekerasannya juga bertambah tinggi tetapi perpanjangan menurun. Klasifikasi dari baja karbon dapat dilihat dalam tabel 2.1.

Besi murni (*ferit*) tentulah tidak mengandung karbon. Besi ini relatif lunak dan liat serta mampu tempa, tetapi tidak kuat. Hampir semua besi murni mempunyai suatu kekuatan tarik batas sekitar 40.000 psi. Penambahan karbon ke dalam besi murni dalam jumlah yang berkisar dari 0,05 % sampai 1,7 %, menghasilkan apa yang disebut baja. Karbon menaikkan kekuatan dan kekerasan, tetapi juga mengurangi keliatan dan keuletan. Suatu kandungan karbon sekitar 0,1 % menghasilkan apa yang dikatakan baja lunak (*soft steel*) dengan kekuatan tarik batas sekitar 50.000 psi, yang cocok untuk dirol menjadi pelat. Baja struktur (*struktural steel*) umumnya digunakan untuk dirol menjadi bentuk-bentuk struktur seperti siku, balok, dan kolom yang mengandung sekitar 0,25 % C yang menghasilkan suatu baja yang cukup liat dan ulet dengan kekuatan batas sekitar 64.000 sampai 72.000 psi. Kenaikan karbon sekitar 0,40 % menghasilkan baja mesin (*machine steel*) dengan kekuatan tarik

Jenis dan Kelas	Kadar Karbon ( % )	Kekuatan Luluh ( kg/ mm <sup>2</sup> )	Kekuatan Tarik ( kg/ mm <sup>2</sup> )	Perpanjangan ( % )	Kekerasan Brinell	Penggunaan
A : baja lunak khusus	0.08	18-28	32-36	40-30	95-100	pelat tipis
baja sangat lunak	0.08-0.12	20-29	36-42	40-30	80-120	batang kawat
baja lunak	0.12-0.20	22-30	38-48	36-24	100-130	konstruksi umum
baja setengah lunak	0.20-0.30	24-36	44-55	32-22	112-145	konstruksi umum
B : baja setengah keras	0.30-0.40	30-40	50-60	30-17	140-170	alat - alat mesin
C : baja keras	0.04-0.50	34-46	58-70	26-14	160-200	perkakas, rel, pegas, dan kawat piano
baja sangat keras	0.50-0.80	36-47	65-100	20-11	180-235	perkakas, rel, pegas, dan kawat piano

A = Baja karbon rendah ; B = Baja karbon sedang ; C = Baja karbon tinggi

**tabel 2.1. KLASIFIKASI BAJA KARBON [ Wiryosumarto, Okumura, 19991 ]**

batas sekitar 80.000 psi, sementara 0,75 % C menghasilkan baja pegas ( *spring steel* ) dengan kekuatan tarik batas 100.000 psi dan 0,90 sampai 1 % karbon menghasilkan baja pahat ( *tool steel* ) yang sangat keras dengan kekuatan tarik batas 120.000 sampai 130.000 psi ( Jensen, 1983 ).

Kelompok baja lunak mempunyai kekuatan tarik antara 40 sampai 50 kg/ mm<sup>2</sup> dan pada umumnya dalam bentuk hasil pengerolan. Baja ini mempunyai sifat-sifat pengerjaan dan kekuatan yang sangat baik. Berdasarkan standar-standar yang ada biasanya baja lunak dikelompokkan dalam baja rol panas untuk konstruksi umum dan baja rol panas untuk konstruksi las. Perbedaan antara kelompok kedua terhadap kelompok pertama adalah bahwa pada kelompok kedua batas kadar karbon maksimum ditentukan dengan ketat untuk menjamin sifat mampu las dari baja tersebut. Dalam tabel 2.2. menunjukkan beberapa contoh spesifikasi baja lunak menurut standar JIS. Baja-baja yang terdapat dalam daftar adalah campuran antara struktur ferit perlit yang pada proses pembuatannya selalu diusahakan agar kadar C, P, S, O<sub>2</sub>, dan N<sub>2</sub> sehingga sifat tumbuknya lebih baik.

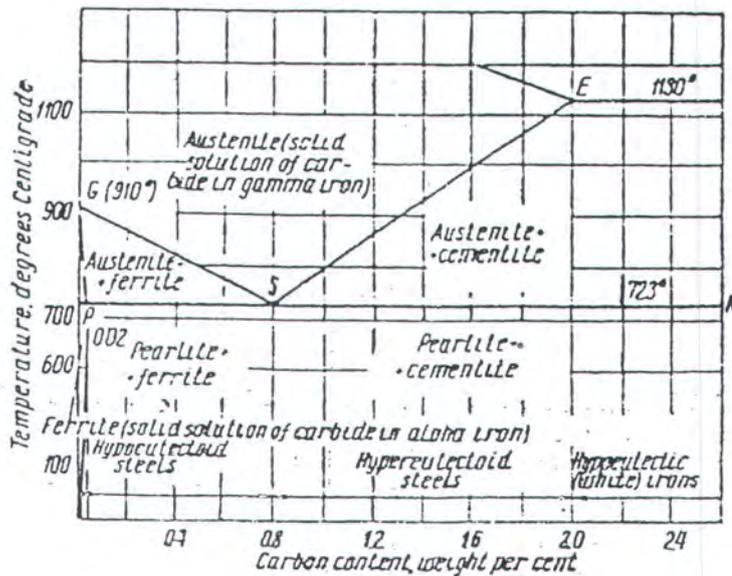
Standar	Jenis	Tebal Pelat t (mm)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Kekuatan Luluh (kr/mm <sup>2</sup> )	Kekuatan Tarik (kg/mm <sup>2</sup> )	Perpanjangan (%)
G3101-1976	SS - 41	t ≤ 5	---	----	----	≤ 0.05	≤ 0.05	≥ 25	41 - 52	≥ 21
		5 < t ≤ 16	----	----	----	----	----	----	41 - 52	≥ 17
		16 < t ≤ 40	----	----	----	----	----	≥ 24	41 - 52	≥ 21
		40 < t	----					≥ 22	41 - 52	≥ 23

**tabel 2.2. SPESIFIKASI BAJA LUNAK** [ Wiryosumarto, Okumura, 1991 ].

### 2.2.2. DIAGRAM FASE SISTEM BESI - CARBON ( Fe - Fe<sub>3</sub>C )

Pada umumnya baja komersial terdiri dari bahan jenis hipoeutektoid, yaitu dengan kadar karbon kurang dari 0,8 %. Jarang dijumpai baja komersial jenis eutektoid, dengan

kadar karbon 0,8 % atau hipereutektoid, dengan kadar karbon lebih dari 0,8 %. Untuk mengetahui transformase fase yang terjadi pada baja selama berlangsungnya proses perlakuan panas, diperlukan suatu diagram fase untuk sistem besi-karbon yang bentuknya dapat dilihat dalam gambar berikut ini ( Zakharov, 1962 ).



**gambar 2.1. DIAGRAM FASE SISTEM BESI-KARBON**

Diagram di atas menunjukkan suatu sistem untuk paduan besi karbon. Diagram ini berhubungan dengan kondisi paduan besi - karbon apabila selama proses kristalisasi primer dan sekundernya karbon memisahkan diri dari larutan padat atau larutan cair tidak ke dalam bentuk murninya, tetapi sebagai suatu komposisi kimia yaitu sebagai karbida besi atau sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Sebenarnya diagram fase ini bukanlah diagram fase yang sebenarnya, karena pada saat kesetimbangan ( equilibrium ) tidak akan terbentuk karbida melainkan akan terbentuk karbon bebas yang berupa grafit, sehingga akan didapat diagram besi - grafit. Akan tetapi diagram Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  ini masih dapat disebut diagram yang equilibrium

karena proses pemanasan dan pendinginan berlangsung sangat lambat. Batasan - batasan ini dapat dapat dijelaskan sebagai sebagai berikut, pertama, diagram fase besi - karbon tidak dapat menerangkan proses proses pembentukan struktur baja tertentu pada kondisi perlakuan panas yang sebenarnya, dan kedua, suhu sebenarnya saat terjadinya transformasi fase pada kondisi yang sama, berbeda dengan seperti yang ditunjukkan oleh diagram fase.

Dari gambar tersebut tampak bahwa diagram fase ini memiliki tiga garis mendatar, yang menandakan adanya reaksi yang berlangsung secara isothermal di garis *HB* berlangsung reaksi peritektik, pada garis *ED* berlangsung reaksi eutektik dan pada garis *PK* berlangsung secara eutektoid.

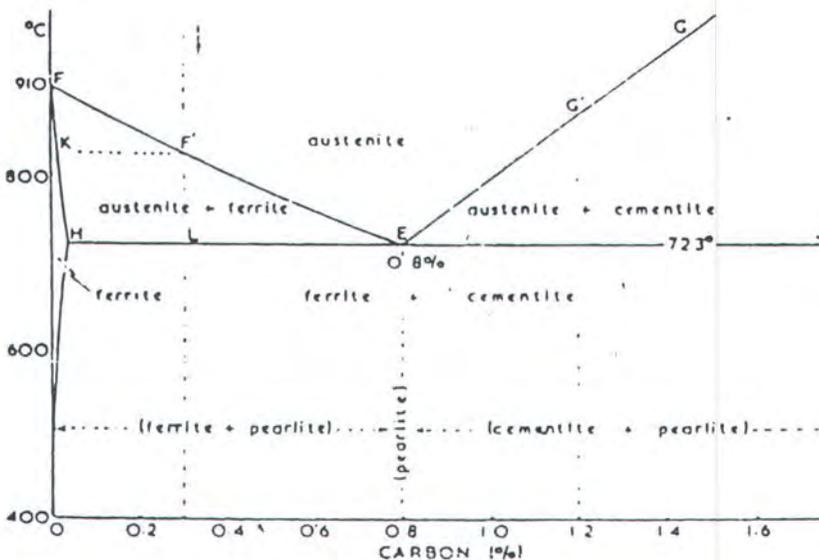
Fase-fase yang terdapat dalam diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C adalah sebagai berikut :

1. Cementite adalah karbida besi Fe<sub>3</sub>C, merupakan senyawa interstisial yang mengandung 6,67 % C. Sangat keras ( +/- 650 BHN ), getas dan kekakuan rendah ( +/- 350 kg/ cm<sup>3</sup>). Zat arang bebas yang hanya terdapat pada besi tuang ( grafit ).
2. Ferrit adalah larutan padat karbon ( besi  $\alpha$  ), dapat melarutkan karbon sampai 0,025 % pada temperatur 727 ° C dan 0,008 % pada temperatur kamar. Sifat mekanis yang dimiliki lunak dan ulet, kekuatan rendah dan memiliki kekerasan 90 R<sub>B</sub>.
3. Austenite adalah larutan padat karbon ( besi  $\gamma$  ), dapat melarutkan karbon sampai 2,11 % pada temperatur 1148 ° C. Sifat mekanis yang dipunyai lunak dan ulet pada temperatur kamar. Kekuatan tarik +/- 1050 kg/ cm<sup>2</sup> , kekerasan 40 R<sub>B</sub>, dan ketangguhan tinggi.
4. Pearlite adalah suatu eutektoid mixture dari cementite dan ferrite. Pearlite dapat melarutkan karbon sampai 0,8%. terbentuk pada suhu 723 ° C.
5. Ledeburite adalah eutectic mixture dari austenite dan cementite.

6. Lower Critical Temperatur ( temperatur kritis bawah )  $A_1$ , temperatur eutectoid. Pada diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C tampak berupa garis mendatar di temperatur 723 ° C. Pada temperatur ini terjadi reaksi eutektoid : austenite  $\rightarrow$  ferrite + cementite .
7. Upper Critical Temperatur ( temperatur kritis atas )  $A_3$ , temperatur awal terjadinya perubahan allotropik dari  $\gamma$  ke  $\alpha$  ( pada pendinginan ) atau akhir perubahan allotropik dari  $\alpha$  ke  $\gamma$  ( pada pemanasan ).
8. Garis Solvus  $A_{cm}$  merupakan batas kelarutan karbon dalam Austenite.

### 2.2.3.TRANSFORMASI FASE PADA SAAT PEMANASAN

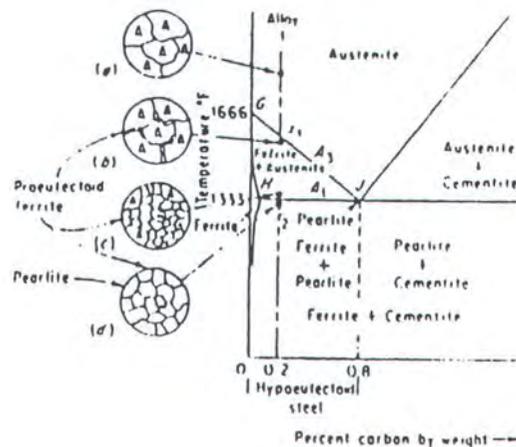
Untuk mengetahui transformasi ini diambil contoh macam baja, yaitu baja hypoeutektoid, yang telah mendapat pendinginan equilibrium dan akan dipanaskan secara equilibrium pula, transformasi fase selama pemanasan dapat diamati dalam diagram keseimbangan besi - karbida besi ( terutama di daerah kiri bawah ) gambar 2.2.,berikut ini :



**gambar 2.2.**

*BAGIAN KIRI BAWAH DARI DIAGRAM FASE BESI-KARBON ( DAERAH BAJA )*

Baja hypoeutektoid ( 0,2 % C ) yang terdiri dari butir-butir kristal ferrit dan perlit, akan mengalami perubahan struktur mikro pada masa pemanasan/ pendinginan equilibrium pada temperatur kamar, seperti pada gambar 3.3., yang disajikan di bawah ini.



**gambar 2.3. SKEMA PERUBAHAN STRUKTUR MIKRO ( 0.2% C )**

Kalau baja ini dipanaskan hanya sampai temperatur di bawah temperatur kritis  $A_1$ , maka belum akan tampak adanya perubahan struktur mikro. Namun bila pemanasan dilanjutkan hingga tepat pada temperatur kritis  $A_1$ , maka perlit akan mengalami reaksi eutektoid, lamel - lamel ferrit dan sementite dari perlit akan bereaksi dan menjadi austenit.

Reaksi eutektoid pada pemanasan :



Reaksi ini akan berlangsung pada temperatur konstan, temperatur tidak akan naik sebelum reaksi eutektoid selesai, temperatur tidak akan naik sebelum seluruh ferrit dan sementit di dalam perlit habis menjadi austenit. Setelah perlit habis dan mulai terjadi kenaikan temperatur, maka ferrit - proeutektoid akan mulai mengalami transformasi allotropik, ferrit yang BCC akan menjadi austenit yang FCC. Transformasi ini berlangsung berlangsung dengan bersamaan naiknya temperatur, makin tinggi temperatur pemanasan makin banyak ferrit yang bertransformasi menjadi austenit, sehingga pada saat temperatur mencapai

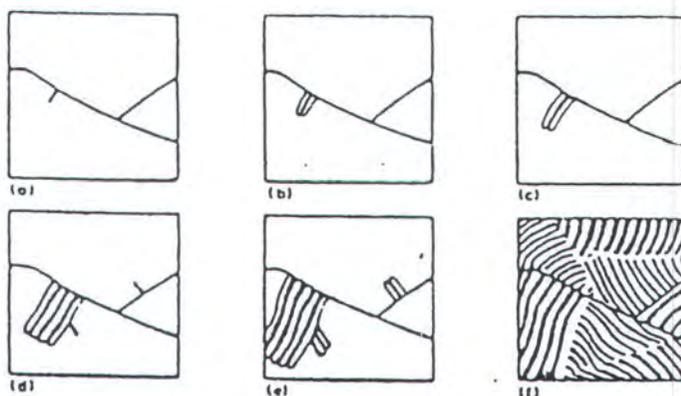
temperatur kritis  $A_3$ , seluruh ferrit - proeutektoid sudah menjadi austenit. Austenit yang baru terjadi masih belum homogen. Pada baja hypoeutektoid misalnya, austenit yang berasal dari perlit yang mengandung 0,8 % C sedang yang bersal dari ferrit masih mengandung karbon yang jauh lebih sedikit. Di samping itu austenit yang baru terjadi masih merupakan butiran-butiran yang kecil. Butiran kristal austenit ini akan tumbuh makin besar bila diberi cukup waktu untuk bertumbuh. Dan pertumbuhan ini makin cepat bila temperatur makin tinggi.

#### 2.2.4. TRANSFORMASI FASE PADA SAAT PENDINGINAN

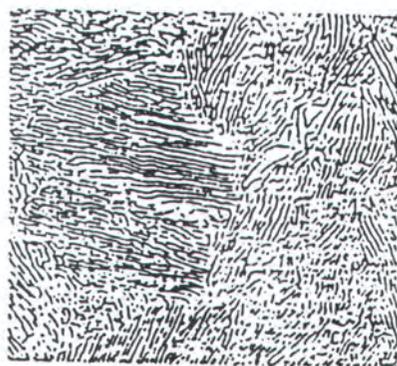
Setelah pemanasan mencapai temperatur yang ditentukan dan diberi holding time secukupnya, maka di dalam suatu proses laku panas dilakukan pendinginan dengan laju tertentu. Struktur mikro yang terjadi setelah pendinginan akan tergantung pada laju pendinginan. Karenanya sifat mekanik dari baja setelah akhir suatu proses laku panas akan banyak ditentukan oleh laju pendinginan.

Transformasi austenit pada pendinginan memegang peranan penting terhadap sifat baja yang dikenal suatu proses laku panas. Austenit dari baja hypoeutectoid bila didinginkan dengan lambat, pada temperatur kritis  $A_3$  mulai membentuk inti kristal ferrit. Inti ferrit ini tumbuh pada batas-batas butir kristal austenit. Transformasi ini terjadi karena perubahan allotropik dari besi gamma ke besi alpha. Karena besi alpha ( ferrit ) hanya dapat melarutkan karbon dalam jumlah yang sangat kecil maka kandungan karbon dalam austenit ( besi gamma ) akan semakin besar bila ferrit yang tumbuh makin banyak/ besar ( yaitu dengan makin turunnya temperatur ), besarnya kandungan karbon dalam austenit dengan menurunnya temperatur mengikuti garis temperatur kritis  $A_3$ , sehingga pada saat temperatur mencapai temperatur kritis  $A_1$  komposisi sisa austenit sama dengan komposisi

eutectoid dan pada temperatur ini austenit bertransformasi menjadi perlit. Pertumbuhan perlit ini dimulai dengan tumbuhnya inti sementit pada batas butir austenit. Untuk tumbuhnya sementit, yang kaya karbon ( 6,67 % ) ini, diperlukan sejumlah besar karbon, yang akan diperoleh dari austenit di sekitarnya, yang mengeluarkan karbonnya untuk dapat menjadi ferrit. Karbon ini keluar ke kiri kanannya, sebagian mengumpul pada sementit untuk bertumbuhnya sementit yang sudah ada, yang keluar ke sisi lain akan membentuk lapisan sementit baru. Demikian seterusnya, sehingga terjadi struktur yang berlapis-lapis ( lamellar ) terdiri dari ferrit dan sementit, yang disebut perlit. Skema pertumbuhan perlit dan gambar struktur mikro perlit terlihat pada gambar 2.4. dan 2.5. , berikut:

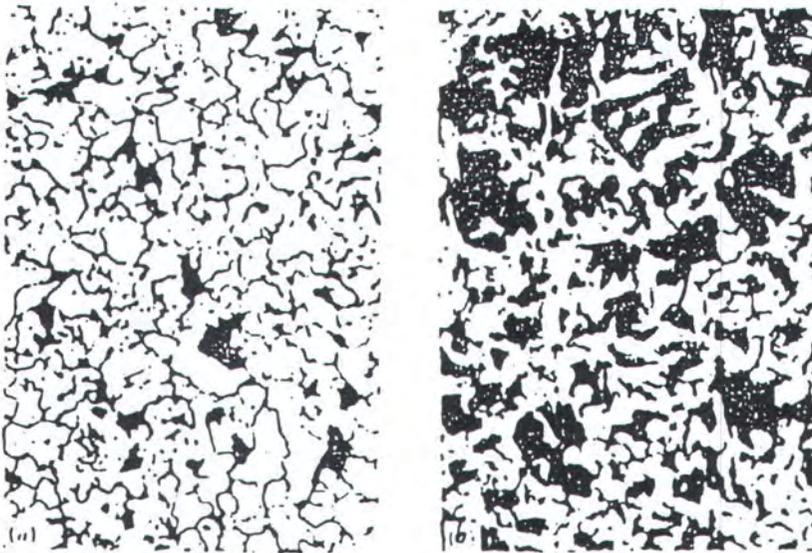


**gambar 2.4. SKEMA PERTUMBUHAN PERLIT**



**gambar 2.5. STRUKTURMIKRO PERLIT**

Transformasi dari austenit menjadi perlit ini berlangsung dengan mengeluarkan sejumlah panas sehingga reaksi eutektoid itu berlangsung pada temperatur tetap. Temperatur akan turun lagi bila reaksi eutektoid sudah selesai. Pada temperatur yang lebih rendah lagi sudah tidak terdapat perubahan fase. perubahan fase yang terjadi pada temperatur kritis  $A_1$  hanya transformasi dari austenit menjadi perlit, sedang ferrit yang sudah terjadi sebelumnya ( disebut ferrit proeutektoid), tidak mengalami perubahan. Struktur mikro baja ini pada temperatur kamar terdiri dari ferrit ( proeutektoid) dan perlit ( gambar 2.6.).

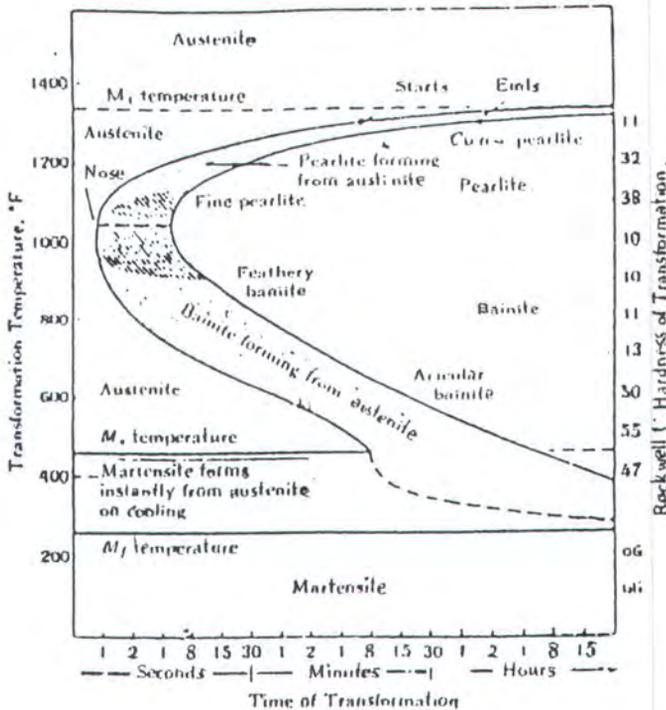


**gambar 2.6. STRUKTURMIKRO BAJA HYPOEUTEKTOID ( 100 X )**

Tentunya makin tinggi kadar karbon dari baja ini, makin banyak jumlah perlitnya dibandingkan dengan jumlah ferritnya, dan struktur akan terdiri dari perlit seluruhnya pada baja dengan komposisi eutektoid ( baja eutektoid, 0,8% C ).

### 2.2.5. TEMPERATUR AUSTENIT PADA TEMPERATUR TETAP

Sifat - sifat transformasi austenit pada temperatur tetap dipelajari dengan mengambil sejumlah spesimen baja. Seluruh spesimen ini dipanaskan sampai diperoleh austenit homogen. Satu per satu spesimen ini didinginkan dengan cepat ke suatu temperatur di bawah temperatur kritisnya. Dari masing-masing spesimen kemudian kemudian diamati waktu yang diperlukan untuk mulai dan berakhirnya transformasi austenit, serta strukturmikro yang terjadi sesudah transformasi selesai. kemudian seluruh data ini diplot ke dalam suatu grafik, dan menghasilkan suatu diagram yang dinamakan TTT diagram ( Time Temperature Transformasi diagram ). Diagram ( gambar 2.7.) ini bersifat khusus, artinya hanya berlaku untuk satu jenis logam yang diamati ( Smaalman, 1991 ).



**gambar 2.7.**

*TTT - DIAGRAM UNTUK BAJA KARBON EUTEKTOID (DEKOMPOSISI AUSTENIT)*

Di bawah temperatur kritis pada daerah di sebelah kiri kurva awal transformasi, austenit tidak stabil dan di sebelah kanan kurva akhir transformasi terdapat hasil transformasi isothermal dari austenit, sedang pada daerah di antara kedua kurva tersebut terdapat sisa austenit yang belum bertransformasi dan hasil transformasi isothermalnya.

Titik paling kiri dari kurva awal transformasi disebut 'hidung' ( nose) diagram tersebut. Transformasi austenit pada temperatur di atas 'hidung' akan menghasilkan perlit sedang pada temperatur di bawah 'hidung' akan menghasilkan suatu struktur lain yaitu bainit. Tetapi bila transformasi berlangsung pada temperatur yang lebih rendah lagi ( di bawah garis  $M_3$ ) akan diperoleh martensit.

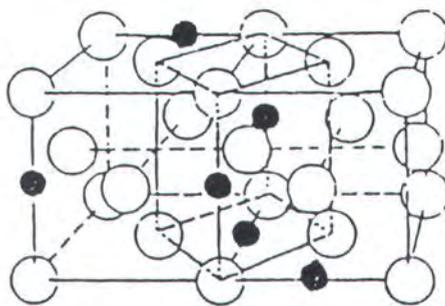
Untuk semua baja, kecuali eutektoid, TTT diagramnya akan mempunyai dua kurva awal transformasi pada daerah di atas hidungnya. Kurva pertama menunjukkan awal transformasi dari austenit menjadi ferrit ( pada baja hypoeutektoid ) atau menjadi sementit ( pada baja hypereutektoid) dan kurva yang kedua menunjukkan awal transformasi austenit menjadi perlit.

Transformasi yang terjadi pada temperatur sedikit di bawah temperatur kritis  $A_1$  akan menghasilkan perlit kasar, butir kristal besar, dan jarak antar lamel besar, kekerasannya rendah, sekitar Rockwell C 15. Dengan temperatur transformasi yang lebih rendah akan diperoleh butir kristal yang lebih halus dan jarak antar lamel pada perlit yang lebih kecil, akibatnya kekerasannya meningkat.

Dalam pendinginan, waktu melewati temperatur kritis  $A_1$  austenit ( besi gamma, FCC ) akan mengalami perubahan allotropik menjadi besi alpha ( BCC), dan karena besi alpha tidak mampu melarutkan karbon sebanyak besi gamma maka karbon yang tadinya berada dalam besi gamma akan keluar dari larutan dan membentuk inti sementit di batas butir austenit. Sementara makin banyak karbon yang keluar dari austenit membentuk

sementit, austenit di sekitar sementit makin miskin karbon dan akan menjadi ferrit ( besi alpha ). Untuk berubahnya austenit menjadi ferrit ini harus dikeluarkan sejumlah karbon, dan karbon ini menjadi sementit. Dengan demikian akan diperoleh struktur yang berlapis-lapis ( lamellar) yang dinamakan perlit. Perpindahan atom-atom ini berlangsung secara difusi, karenanya memerlukan waktu yang cukup panjang. Oleh karena itulah perlit akan terjadi pada pendinginan yang berlangsung cukup lambat.

Bila pendinginan berlangsung sangat cepat maka driving force inipun akan menjadi sangat besar sehingga seolah-olah pergeseran atom-atom untuk mengubah FCC menjadi BCC dapat terjadi tanpa difusi, hanya karena dorongan driving force. Tetapi karena austenit mengandung sejumlah karbon, sedang ferrit hanya mampu melarutkan sedikit sekali karbon, maka karbon yang seharusnya keluar dari larutan akan terperangkap ( atom karbon sudah tidak lagi dapat berdifusi keluar karena ia sudah tidak lagi memiliki cukup energi untuk berdifusi, temperatur sudah terlalu rendah ) dalam struktur baru ( yang seharusnya BCC ) dan menyebabkan struktur baru itu terdistorsi, tidak menjadi BCC tetapi menjadi BCT ( body centered tetragonal ), yaitu martensit.

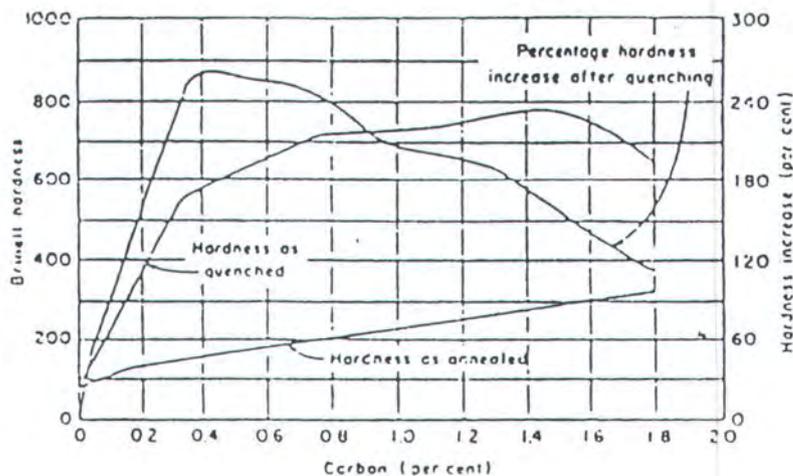


**gambar2.8.**

*MODEL SUSUNAN ATOM PADA TRANSFORMASI AUSTENIT- MARTENSIT*

Karena adanya karbon yang terperangkap ini struktur itu menjadi tegang dan karenanya menjadi sangat keras ( dapat sampai Rockwell C 65 ), tetapi juga getas. Martensit akan mulai terjadi bila austenit langsung didinginkan hingga mencapai temperatur  $M_s$ , martensit start. Banyaknya austenit yang bertransformasi menjadi martensit tidak tergantung pada waktu, tetapi tergantung pada temperatur, makin rendah makin banyak dan berakhir pada temperatur  $M_f$ , martensit finish ( gambar 2.9).

Kadar karbon dalam austenit sangat berpengaruh terhadap kekerasan martensit, makin tinggi kadar karbonnya makin tinggi pula kekerasan martensit, hanya saja kenaikan ini tidak berbanding lurus ( gambar 2.10 )

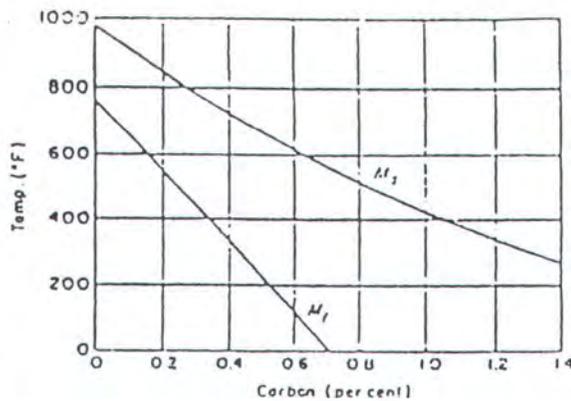


**gambar 2.9.**

**PENGARUH KADAR KARBON TERHADAP KEKERASAN MARTENSIT DAN PROSENTASE KENAIKAN KEKERASAN**

Pada kadar karbon yang rendah, kenaikan kadar karbon sangat menaikkan kekerasan baja ( setelah proses pengerasan, pembentukkan martensit ). Sampai batas kadar karbon tertentu kenaikan kekerasan ini mulai melandai, bahkan menurun.

Kadar karbon dan unsur paduannya berpengaruh terhadap temperatur  $M_s$  dan  $M_f$ , makin tinggi kadar karbon ( dan unsur paduan ) makin rendah temperatur  $M_s$  dan  $M_f$ . Pada



**gambar 2.10.**

**PENGARUH KADAR KARBON DALAM AUSTENIT TERHADAP TEMPERATUR  $M_s$  DAN  $M_f$**

kadar karbon yang tinggi temperatur  $M_f$  sudah berada di bawah temperatur kamar, berarti setelah selesai pendinginan cepat dan mencapai temperatur kamar masih tersisa austenit yang belum bertransformasi. Strukturnya akan terdiri dari martensit dan austenit sisa (retained austenite). Adanya austenit sisa yang lunak ini, menyebabkan kenaikan kekerasan menjadi berkurang.

Transformasi austenit menjadi martensit tergantung pada temperatur dan tidak tergantung pada lamanya waktu pada suatu temperatur (karena transformasi ini berlangsung tanpa ada difusi). Transformasi ini juga tidak pernah selesai, selalu saja ada retained austenite walaupun dalam jumlah yang sangat sedikit.

Martensit bukanlah suatu struktur yang stabil, namun tidak lebih merupakan suatu struktur transisi antara austenit yang tidak stabil pada temperatur kamar dengan campuran ferrit dan sementit yang stabil dan dikatakan sebagai suatu struktur yang metastabil. Oleh karena bila martensit dipanaskan kembali, sedikit demi sedikit akan menuju strukturnya yang lebih stabil, dengan diikuti berkurangnya kekerasan dan bertambahnya keuletan/ketangguhan.

## 2.3.. SIFAT - SIFAT FISIK BAJA

Dari pengetahuan akan susunan atomik, kristal, atau struktur fase memungkinkan dalam penentuan nilai-nilai sifat ( *property values* ) suatu material. Meski ada beberapa aspek struktur yang harus dipilah-pilah untuk setiap paduan ( *alloy* ) yang menjadikan jumlah sifat-sifatnya menjadi tak terbatas, namun pendekatan perekayasaan dalam penyampaian informasi data masukan akan sifat-sifat material telah mengurangi sebagian besar kegiatan penelitian dan pengujian di laboratorium.

### 2.3.1. Kepadatan ( density )

Perbandingan antara berat dan volume suatu material disebut dengan kepadatan ( density). Dalam perencanaan material adalah merupakan suatu hal yang sangat penting dengan mengetahui terlebih dahulu kepadatan materialnya ( tabel 2.3 ).

### 2.3.2. Konduktivitas listrik ( electrical conductivity )

Adalah efisiensi material dalam menghantarkan arus listrik. Karakteristik logam ditentukan oleh tingkat konduktivitas yang menurun akibat naiknya temperatur. Arus listrik dalam logam dihantarkan oleh partikel elektron yang bebas bergerak menembus struktur kristal. ( Brick, Robert, M., 1977 ). Perak dan tembaga memiliki relativitas konduksi listrik yang tinggi dibandingkan dengan jenis logam-logam yang lain, perak sedikit lebih tinggi

Alloy	g / cu cm	lb / cu in
pure iron	7,874	0,2845
ingot iron	7,866	0,2842
wrought iron	7,7	0,28
gray cast iron	7,15	0,258
maileable iron	7,27	0,262
0.06% C steel	7,871	0,2844
0.23% C steel	7,859	0,2839
0.435% C steel	7,844	0,2834
1.22% C steel	7,830	0,2829

Data dari : *ASM Handbook Volume I*

**tabel 2.3. NILAI KEPADATAN UNTUK PELBAGAI LOGAM**

dibandingkan tembaga. Konduktivitas *electrolytic tough pitch copper* ( ETP ) sebesar 101 % berdasar *International Annealed Copper Standard* ( IACS ). Logam-logam lain sebagai perbandingan :

Material	Konduktivitas Listrik (% IACS)
electrolytic copper ( ETP )	101
fine silver	106
low carbon iron	17,5
1010 steel	14,5
mild steel	15
aluminum ( 99.99 % pure)	65
aluminum alloy 5052	35
stainless steel type 400	3
stainless steel type 300	2,5

Data dari : *ASM Handbook Volume I*

**tabel 2.4. NILAI KONDUKTIVITAS LISTRIK UNTUK PELBAGAI LOGAM**

### 2.3.3. Konduktivitas Termal

Jika pada suatu benda terdapat gradien suhu ( temperature gradient ), maka menurut pengalamannya akan terjadi perpindahan energi dari bagian suhu tinggi ke bagian suhu yang rendah. Dikatakan bahwa energi berpindah secara konduksi ( conduction ) atau hantaran dan bahwa laju perpindahan kalor itu berbanding dengan gradien suhu normal ( Holman, J.P., 1981).

Mekanisme konduksi termal pada gas cukup sederhana. Energi kinetik molekul ditunjukkan oleh suhunya, jadi pada bagian bersuhu tinggi molekul-molekul mempunyai kecepatan yang lebih tinggi daripada yang berada pada bagian yang bersuhu rendah. Molekul-molekul itu selalu berada dalam gerakan rambang, saling bertumbukan satu sama lain, di mana terjadi pertukaran energi dan momentum. Molekul-molekul itu selalu berada itu suatu molekul daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah, maka molekul itu

mengangkut energi kinetik ke bagian sistem yang suhunya lebih rendah, dan dari sini menyerahkan energinya pada waktu bertumbukkan dengan molekul yang energinya lebih rendah.

Rata-rata kecepatan perambatan panas di dalam material dikenal dengan istilah konduktivitas termal. Antara besi dan tembaga memiliki perbedaan yang sangat jauh, konduktivitas termal tembaga kurang lebih lima kali besarnya dibandingkan besi. Pada umumnya konduktivitas termal itu sangat tergantung pada suhu.

Tingginya konduktivitas termal dari tembaga menerangkan bahwa mengapa tembaga merupakan material yang sangat sesuai untuk *backup bars*. Hal ini juga menjelaskan bahwa mengapa tembaga harus dilas dengan *heat input* yang tinggi atau *preheating* yang tinggi pula guna mendapatkan hasil pengelasan yang optimal.

Alloy	Konduktivitas Termal pada suhu kamar cal/ cm <sup>2</sup> / cm/ ° C/ sec
Copper ETP	0,934
Pure iron	0,178
Cast iron ( 3,16 TC, 1, 54 Si, 0,57 Mn )	0,112
Carbon steel ( 0,23 C, 0,64 Mn )	0,124
Carbon steel ( 1,22 C, 0,35 Mn )	0,108
Alloy steel ( 0,34 C, 0,55 Mn, 0,78 Cr, 3,53 Ni, 0,39 Mo, 0,05 Cu )	0,079
Type 410	0,057
Type 304	0,036
T1 tool steel	0,058

Data dari : *ASM Handbook Volume I*

**tabel 2.5. NILAI KONDUKTIVITAS TERMAL UNTUK PELBAGAI LOGAM**

#### 2.3.4. Koefisien Ekspansi Termal

Logam akan memuai bila dikenai laku panas. Perubahan panjang diekspresikan sebagai sebagai koefisien ekspansi linier ( coefficient of linier expansion ) dan di

dalam satuan Inggris ditulis *inches per inch per degree F* ( in./ in/ ° F). Pada suhu kamar, koefisien untuk baja adalah .0000065 in./ in/ ° F atau dapat ditulis  $6,5 \times 10^{-6}$  in./ in/ °F.

Nilai koefisien untuk ekspansi termal tidak konstan untuk seluruh interval titik temperatur, sebagai contoh, dari suhu kamar ke suhu titik leburnya ( *melting point* ). Oleh karena itu, nilai koefisien diberikan dengan interval temperatur tertentu.

Logam dengan koefisien ekspansi yang tinggi akan memiliki masalah dengan kelengkungan ( *warping* ), terutama bila konduktivitas termal rendah.

Alloy	Temperatur ° C	Koefisien Ekspansi Termal in./ in/ ° C
Pure iron	20 - 100	11,7
Fe - C Alloy : 0,06% C	20 - 100	11,7
0,22% C	20 - 100	11,7
0,40% C	20 - 100	11,3
0,56% C	20 - 100	11,0
1,08% C	20 - 100	10,8
1,45% C	20 - 100	10,1

Data dari : *ASM Handbook Volume I*

**tabel 2.6. NILAI KOEFISIEN EKSPANSI TERMAL UNTUK PELBAGAI LOGAM**

### 2.3.5. Titik Lebur

Suatu logam murni memiliki titik lebur ( *melting point*) pada temperatur yang tetap sebagaimana pada titik bekunya( *freezing point*) ( gambar 2.11.). Paduan-paduan ( *alloys*) dan campuran ( *mixtures*) logam akan melebur pada satu temperatur tertentu ( *solidus*), namun proses peleburan belum tuntas sebelum mencapai temperatur maksimum ( *liquidus*).

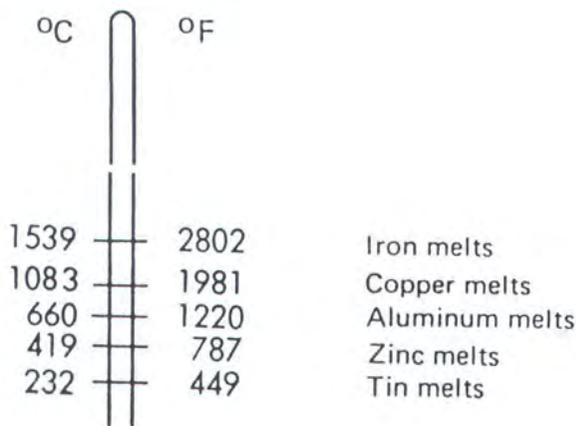
Pengelasan busur pada sebuah logam dengan titik lebur yang rendah ( *low solidus*) membutuhkan hanya sedikit *heat input* dan akurasi kontrol yang lebih tinggi guna

mencegah peleburan menyeluruh, khususnya bila logam yang digunakan relatif tipis( The Lincoln Electric Company, 1973).

### 2.3.6. Panas Spesifik

Panas spesifik adalah sifat termal yang juga berperan penting dalam operasi metalurgi pengecoran atau perlakuan panas, karena menentukan jumlah panas yang dibutuhkan dalam proses. Hal ini berarti panas spesifik mengendalikan kenaikan temperatur yang disebabkan penambahan sejumlah panas terhadap satu gram logam. Jika logam dipasok dengan energi panas sebagian akan diserap oleh kisi untuk menaikkan amplitudo getaran ion, tetapi sebagian kecil akan diserap oleh elektron-elektron pada puncak lingkaran energi( Smallman, R.E., 1991).

Menurut teori lingkaran, kontribusi faktor elektronik terhadap panas spesifik adalah linier dalam temperatur dan konstanta perbandingannya. Pengetahuan panas spesifik adalah penting untuk mengetahui struktur elektronik dan struktur kisi logam ( tabel 2.7. ).



**gambar 2.11.**

*TITIK LEBUR DARI PELBAGAI LOGAM DALAM DUA DERAJAT TEMPERATUR*

Material	Temperatur, °C	Panas Spesifik, cal/ g/ °C
aluminum	0	0,222
	100	0,230
	400	0,253
	600	0,268
copper	0	0,090
	100	0,094
	500	0,103
	1000	0,114
iron	0	0,104
	100	0,114
	500	0,163
	700	0,230

Data dari : *Physical Metallurgy for Engineers*, 1962

**tabel 2.7. NILAI PANAS SPESIFIK UNTUK PELBAGAI LOGAM**

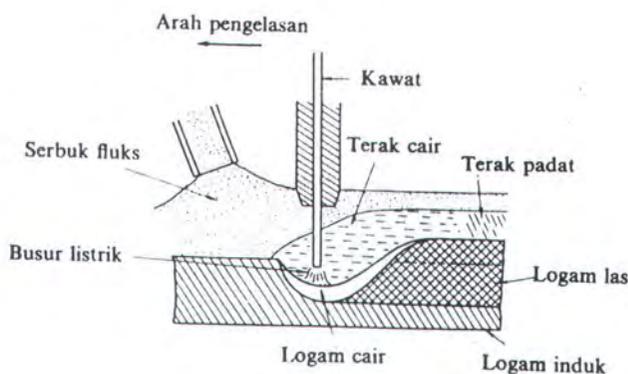
#### 2.4.KARAKTERISTIK PENGELASAN LOGAM

Di samping untuk pembuatan, proses las dapat juga dipergunakan untuk reparasi misalnya untuk mengisi lubang-lubang pada coran, membuat lapisan keras pada perkakas, mempertebal bagian-bagian yang sudah aus dan macam-macam reparasi lainnya. pengelasan bukanlah tujuan utama dalam pengelasan, tetapi hanya merupakan sarana untuk mencapai ekonomi pembuatan yang lebih baik. Karena itu rancangan las dan cara pengelasan harus betul-betul memperhatikan kesesuaian antara sifat-sifat las dengan kegunaan konstruksi serta keadaan di sekitarnya.

Berdasarkan definisi dari *Deutche Industrie Norman (DIN)* las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dari definisi tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas. Pada waktu ini telah digunakan lebih dari 40 jenis pengelasan termasuk pengelasan yang dilaksanakan dengan hanya menekan dua logam yang disambung sehingga terjadi ikatan antara atom-atom atau molekul-molekul dari logam yang disambungkan.

#### 2.4.1. Pengelasan Las Busur Listrik : Las Busur Redam

Las busur redam adalah suatu cara mengelas di mana logam cair ditutup dengan flux yang diatur melalui suatu penampung flux dan logam pengisi yang berupa kawat pejal yang diumpankan secara terus menerus. Dalam pengelasan ini busur listriknya terendam dalam fluks seperti terlihat dalam gambar 2.12. Karena menggunakan prinsip ini maka cara ini dinamakan las busur redam. Hal-hal penting dalam cara pengelasan ini adalah sebagai berikut:

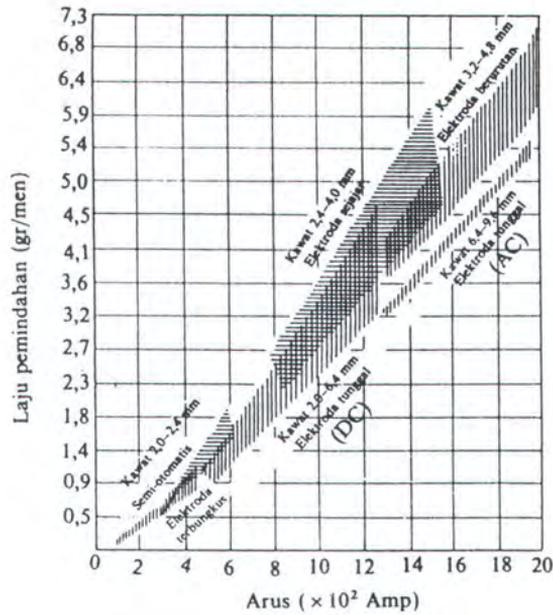


**gambar 2.12. SKEMA PENGELASAN BUSUR REDAM**

- 1). Karena seluruh cairan tertutup oleh flux maka kualitas daerah las sangat baik.
- 2). Karena dapat digunakan kawat las yang besar, maka arus pengelasan juga besar sehingga penetrasi cukup dalam dan efisiensi pengelasan tinggi.
- 3). Karena kampuh las dapat dibuat kecil, maka bahan las dapat dihemat.
- 4). Karena prosesnya secara otomatis maka tidak diperlukan ketrampilan juru las yang tinggi dan perubahan-perubahan teknik pengelasan yang dilakukan oleh juru las tidak banyak pengaruhnya terhadap kualitas las.
- 5). Karena busur yang tidak kelihatan, maka penentuan pengelasan yang salah dapat menggagalkan seluruh hasil pengelasan.
- 6). Posisi pengelasan hanya terbatas pada posisi horisontal.
- 7). Karena prosesnya otomatis, maka penggunaannya lebih terbatas bila dibanding dengan las dengan tangan atau semi-otomatis.

Dari hal-hal yang tersebut di atas keadaan yang paling menguntungkan adalah dalam pengelasan ini adalah besarnya arus yang dapat digunakan. Bila menggunakan beberapa elektroda dalam waktu yang bersamaan arus las dapat dinaikkan sampai kira-kira 3000 Ampere. Hubungan antara efisiensi dan arus dalam pengelasan busur rendam ditunjukkan dalam gambar 2.13. (Wiryosumarto, Okumura., 1991).

Karena dalam pengelasan ini busur listriknya tidak kelihatan, maka sangat sukar untuk mengatur jatuhnya ujung busur. Di samping itu karena mempergunakan kawat elektrode yang besar maka sangat sukar untuk memegang alat pembakar dengan tangan tepat pada tempatnya. Karena hal tersebut maka pengelasan selalu dilaksanakan secara otomatis penuh. Mesin las otomatis pelaksanaannya bermacam-macam, salah satu di antaranya ditunjukkan dalam gambar 2.14. Pada jenis ini kepala las dibawa oleh kereta yang



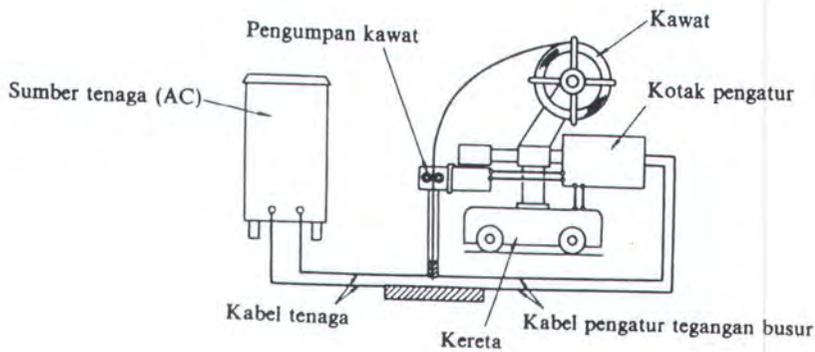
gambar 2.13.

*HUBUNGAN KECEPATAN PEMINDAHAN LOGAM DENGAN ARUS PENGELASAN DALAM LAS BUSUR REDAM*

berjalan melalui rel penuntun sepanjang garis las. Fluks yang diperlukan diumpankan melalui pipa penyalur dari penampung fluks yang juga terletak di tas kereta. Biasanya mesin las ini melayani satu elektrode saja, tetapi untuk memperbaiki efisiensi pengelasan kadang-kadang satu mesin melayani dua atau tiga elektrode.

Mesin las ini dapat menggunakan sumber listrik arus bolak-balik yang lamban dan arus searah dengan tegangan tetap. Bila menggunakan listrik AC perlu adanya pengaturan kecepatan pengumpanan kawat las yang dapat berubah-ubah untuk mendapatkan panjang busur yang diperlukan. Hal ini dapat diatur dengan mengukur tegangan busur yang kemudian dipakai dasar untuk menentukan kecepatan pengumpanan kawat.

Bila menggunakan sumber arus listrik arus searah dengan tegangan tetap kecepatan pengumpanan dapat dibuat tetap dan biasanya memakai polaritas balik. Mesin las dengan listrik DC ini kadang-kadang digunakan untuk mengelas pelat tipis dengan kecepatan tinggi



**gambar 2.14 MESIN LAS BUSUR REDAM**

atau untuk pengelasan dengan elektrode lebih dari satu. Sifat-sifat daerah las yang dihasilkan dengan las busur redam sangat dipengaruhi oleh kualitas logam induk, bahan dari kawat las dan fluks yang digunakan.

#### 2.4.2. Jenis Sambungan dalam Pengelasan: Sambungan Tumpul

Sambungan tumpul (*butt joint*) adalah jenis sambungan yang paling efisien. Sambungan ini dibagi lagi menjadi dua yaitu sambungan penetrasi penuh dan sambungan penetrasi sebagian seperti yang terlihat dalam gambar berikut ini (Wiryosumarto, Okumura., 1991):

sambungan penetrasi penuh dibagi lebih lanjut menjadi sambungan tanpa pelat pembantu dan sambungan dengan pelat pembantu yang masih dibagi lagi dalam pelat pembantu yang turut menjadi bagian dari konstruksi dan pelat pembantu yang hanya sebagai penolong pada waktu proses pengelasan saja.

Bentuk alur dalam sambungan tumpul sangat mempengaruhi efisiensi pengerjaan, efisiensi sambungan dan jaminan sambungan. Karena itu pemilihan bentuk alur sangat penting. Bentuk dan ukuran alur sambungan datar ini sudah banyak distandarkan dalam standar AWS, BS, DIN, GOST, JSSC, dan lain-lain.

Jenis lasan Jenis alur	Lasan dengan alur		
	Lasan Penetrasi penuh tanpa pelat penahan	Lasan penetrasi penuh dengan pelat penahan	Lasan penetrasi sebagian
Persegi (I)			
V tunggal (V)			
Tirus tunggal (V)			
U tunggal (U)		—	
V ganda (X)		—	
Tirus ganda (K)		—	
U ganda (H) (DU)		—	
J tunggal (J)		—	
J ganda (DJ)		—	

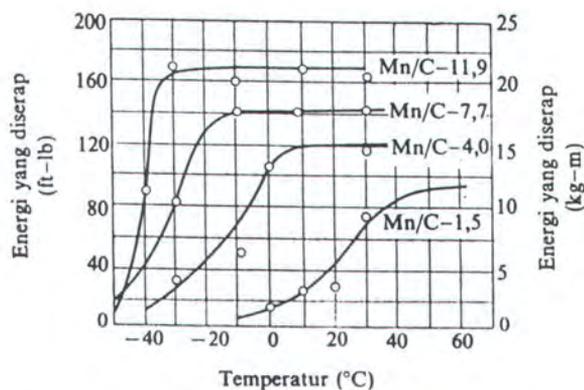
**gambar 2.15. ALUR SAMBUNGAN LAS TUMPUL**

Pada dasarnya dalam memilih bentuk alur harus menuju pada penurunan masukan panas dan penurunan logam las sampai kepada harga terendah yang tidak menurunkan mutu

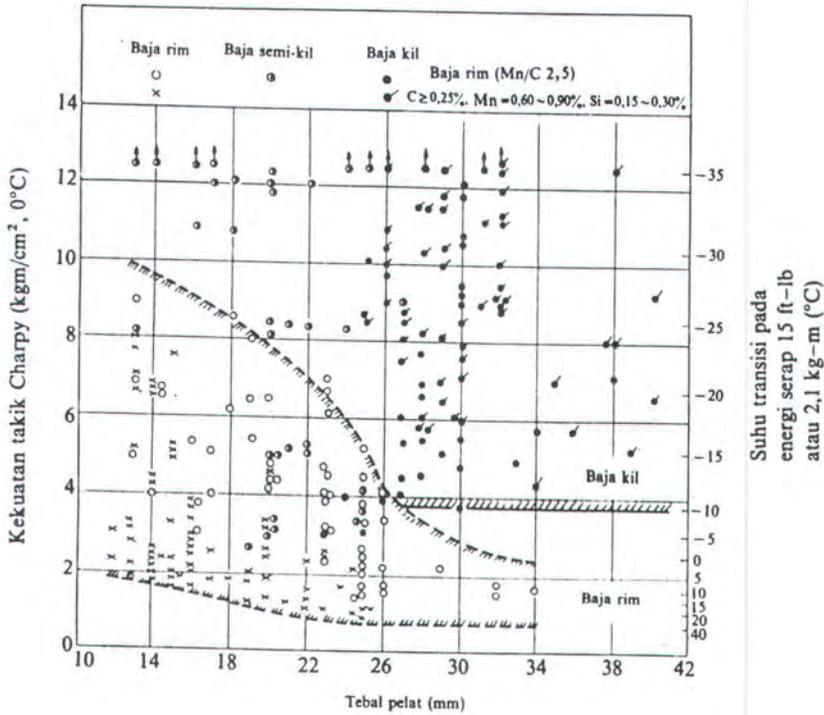
sambungan. Karena hal ini maka dalam pemilihan bentuk alur diperlukan kemampuan dan pengalaman yang luas. Bentuk-bentuk yang telah distandarkan pada umumnya hanya meliputi pelaksanaan pengelasan yang sering dilakukan sehingga dalam pengelasan khusus bentuk alur las harus ditentukan sendiri berdasarkan pengalaman yang dapat dibuktikan tingkat keakurasiannya.

### 2.4.3. Pengelasan Baja Karbon

Faktor-faktor yang sangat mempengaruhi mampu-las dari baja karbon rendah adalah kekuatan takik dan kepekaan terhadap retak las. Kekuatan takik pada baja karbon rendah dapat dipertinggi dengan menurunkan kadar karbon C dan menaikkan kadar mangan Mn. Suhu transisi dari kekuatan takik menjadi turun dengan naiknya harga perbandingan Mn/C . Perubahan kekuatan takik ini ditunjukkan dalam gambar 2.16. Di dalam baja rim terdapat pemisahan antara kulit dan bagian dalam yang menyebabkan kekuatan takik baja ini lebih rendah bila dibandingkan dengan baja kil dan baja semi-kil ( gambar 2.17.) ,( Wiryosumarto, Okumura, 1991) :



gambar 2.16 . PENGARUH PERBANDINGAN Mn/ C TERHADAP KURVA TRANSISI

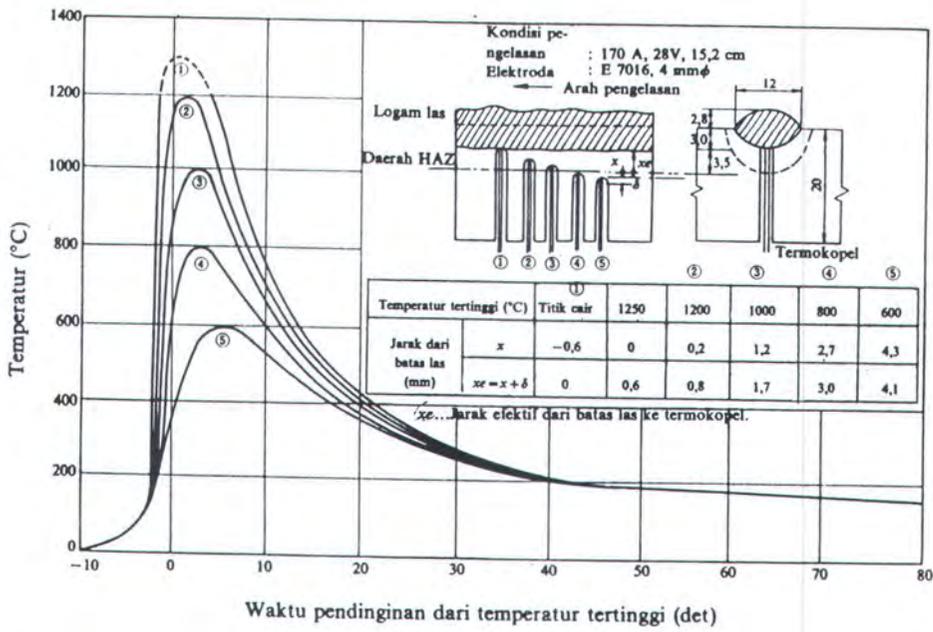


**gambar 2.17. KEKUATAN TAKIK DARI BAJA RIM, BAJA KIL, DAN BAJA SEMI-KIL**

**2.4.4. Siklus Termal Las**

Siklus termal las adalah proses pemanasan dan pendinginan di daerah lasan. Sebagai contoh dalam gambar 2.18. dan 2. 19 ( Wiryosumarto, Okumura, 1991), ditunjukkan siklus termal daerah lasan dari las busur listrik dengan elektrode terbungkus. Dalam gambar 2.18, dapat dilihat siklus termal dari beberapa tempat dalam daerah HAZ dengan kondisi pengelasan tetap, sedang gambar 2.19 menunjukkan siklus termal di sekitar lasan dengan kondisi pengelasan yang berbeda.

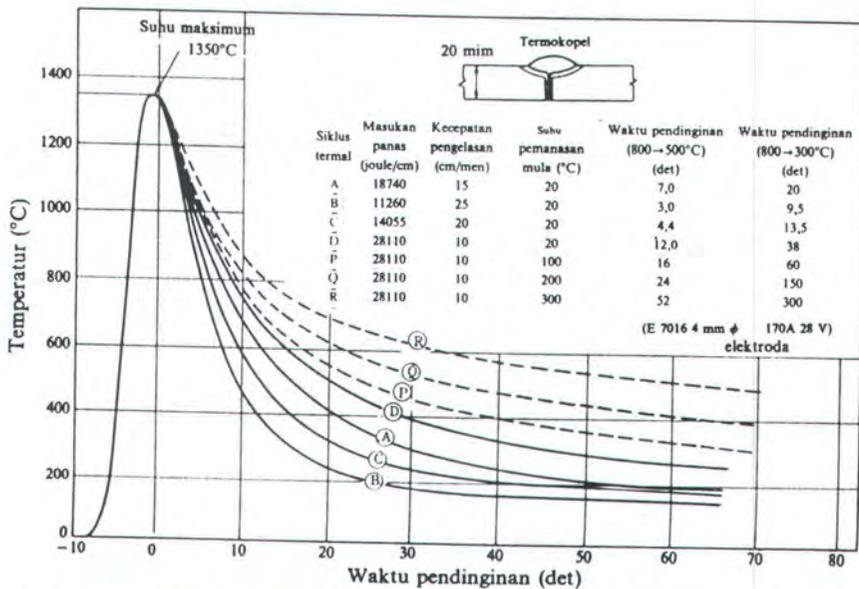
Lamanya pendinginan dalam suatu daerah temperatur tertentu dari suatu siklus termal las sangat memengaruhi kualitas sambungan. Karena itu banyak sekali usaha-usaha pendekatan untuk menentukan lamanya waktu pendinginan tersebut.



**gambar 2.18.**

*SIKLUS TERMAL LAS PADA BEBERAPA JARAK DARI BATAS LAS ( 20 mm, 170 A, 28 V, 15,2 cm/ men )*

Struktur mikro dan sifat mekanik dari daerah HAZ sebagian besar tergantung kepada lamanya pendinginan dari temperatur 800 °C sampai 500 °C. Sedangkan retak dingin, di mana hidrogen memegang peranan penting, terjadinya sangat tergantung oleh lamanya pendinginan dari temperatur 800 °C sampai 300 °C atau 100 °C.



**gambar 2.19.** *SIKLUS TERMAL DALAM LAS BUSUR TANGAN*

## 2.5. DEFORMASI PELAT

Deformasi merupakan perubahan dimensi atau bentuk akibat adanya beban atau gaya yang bekerja pada material. Jadi deformasi dapat terjadi apabila material mengalami pembebanan sehingga terjadi perubahan struktur atau susunan logam pada material tersebut. Perubahan tersebut dapat berupa pemuaian, pengkerutan, dan pergeseran struktur logam. Perubahan struktur yang terjadi pada logam menyebabkan perubahan dimensi atau deformasi juga berbeda-beda untuk setiap material.

Pada pemotongan logam, terjadi proses laku panas pada sebagian kecil material yang dipotong sedangkan pada bagian lainnya tidak mengalami proses ini. Akibat adanya proses pemotongan logam ini maka terjadi perubahan sifat mekanis dan perubahan dimensi/deformasi pada logam tersebut.

### 2.5.1. Deformasi Struktur Logam

Deformasi apabila ditinjau dari struktur material tidaklah tepat dikatakan deformasi, melainkan perubahan pada struktur kristalnya. Perbedaan struktur kristal yang terdapat dalam logam juga mengakibatkan adanya perbedaan sifat fisis dan mekanis dari struktur kristal. Oleh karena itu perubahan sifat fisis dan mekanis ini akan mengakibatkan perubahan atau transformasi yang terjadi antara struktur kristal.

Struktur material terdiri dari atom-atom yang mempunyai ikatan antara satu dengan yang lainnya. Untuk atom logam, ikatan yang terjadi dinamakan *ikatan metalik*. Atom-atom dalam ikatan ini memiliki beberapa elektron yang mengitari seluruh atom untuk mendapatkan keseimbangan ikatan atom ini. Elektron-elektron ini bergerak bebas dalam orbitnya yang berbentuk awan elektron. Ikatan atom-atom ini membentuk struktur kristal dari material tertentu, yaitu berupa unit sel.

Material yang mempunyai dua atau lebih bentuk kristal dapat terjadi pada fase tertentu, dan ditandai dengan adanya perbedaan sifat yang dinamakan *allotrop*. Adanya sifat ini amat berperan dalam proses pengerjaan yang dikenakan pada material tersebut.

Pada pengelasan material, terjadi perubahan suhu akibat Bergeraknya sumber panas, sehingga sumber panas yang dihasilkan tidak merata. Adanya panas ini maka akan terjadi pengembangan termal pada bagian lasan, sedangkan pada bagian yang dingin terjadi penahanan yang mengakibatkan terbentuknya peregangan. Akibat tegangan ini maka terjadilah deformasi tersebut.

### 2.5.2. Deformasi Elastis

Deformasi elastis adalah deformasi yang tidak menyebabkan perubahan pada material yang bersifat tetap. Deformasi ini ada, selama beban luar bekerja pada material tersebut. Dengan bekerjanya beban maka terjadi perpindahan atom secara elastis ke tingkat yang lebih tinggi relatif terhadap yang lainnya. Karena selama deformasi bahan menyerap energi akibat gaya yang bekerja terhadap material.

Deformasi ini berbanding lurus dengan beban. Selama beban bekerja tegangan akan sepadan dengan regangan, hubungan ini dikenal dengan *Hukum Hooke's*. Bila beban yang bekerja berupa gaya tarik benda akan bertambah panjang, dan apabila beban berupa gaya tekan maka material akan menjadi pendek. Setelah beban dihilangkan maka material akan kembali ke bentuk semula. Regangan elastis merupakan hasil dari perpanjangan sel satuan dalam arah tegangan tarik, atau kontraksi sel satuan dalam arah tekanan. Jika terjadi deformasi elastis maka regangan akan sebanding dengan tegangan.

### 2.5.3. Deformasi Plastis

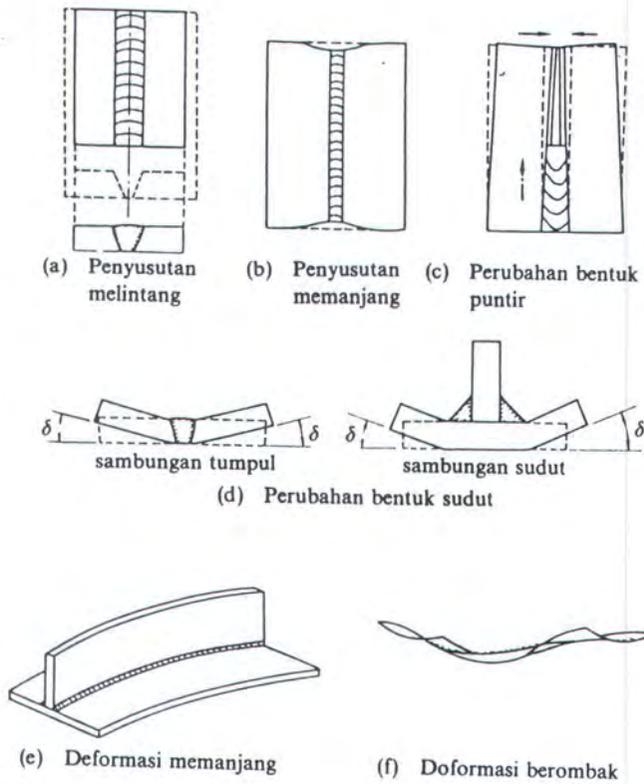
Deformasi plastis adalah deformasi yang menyebabkan perubahan permanen pada suatu material akibat perpindahan atom-atom di dalam logam. Deformasi plastis merubah struktur intern dari logam, oleh karena itu deformasi ini dapat merubah sifat-sifat dari suatu logam. Untuk logam kubik dan paduannya terutama yang berdeformasi dengan geseran plastis atau *slip*, bidang atom akan bergeser terhadap bidang atom yang berdekatan.

## 2.6. Perubahan Bentuk dalam Pengelasan

### 2.6.1. Klasifikasi Perubahan Bentuk dan Faktor yang Mempengaruhi

Adanya pencairan, pembekuan, pengembangan termal, perpendekan, dan penyusutan, maka pada konstruksi las selalu terjadi perubahan bentuk yang sangat rumit. Walaupun demikian secara kasar perubahan bentuk yang terjadi masih dapat dipisahkan. Untuk las tumpul dan las sudut pengelompokkan dari perubahan bentuk yang terjadi dapat dilihat dalam gambar 2.20.

Faktor yang mempengaruhi terbentuknya deformasi las dapat dibagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok pertama yang erat hubungannya dengan masukan panas pengelasan dan kelompok kedua yang disebabkan oleh adanya penahan atau penghalang pada sambungan las. Faktor yang termasuk dalam kelompok pertama adalah : masukan panas pengelasan ( yang ditentukan oleh tegangan listrik, aliran listrik, kecepatan, dan ukuran, serta jenis elektrode), cara pengelasan, suhu pemanasan mula, tebal pelat, geometri sambungan dan jumlah lapisan dari lasan. Sedangkan yang tercakup dalam kelompok yang kedua adalah : bentuk, ukuran, serta susunan dari batang-batang penahan dan urutan pengelasan.

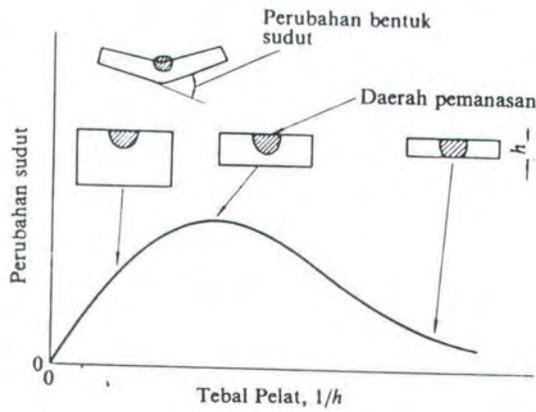


**gambar 2.20. PERUBAHAN BENTUK PADA PENGELASAN**

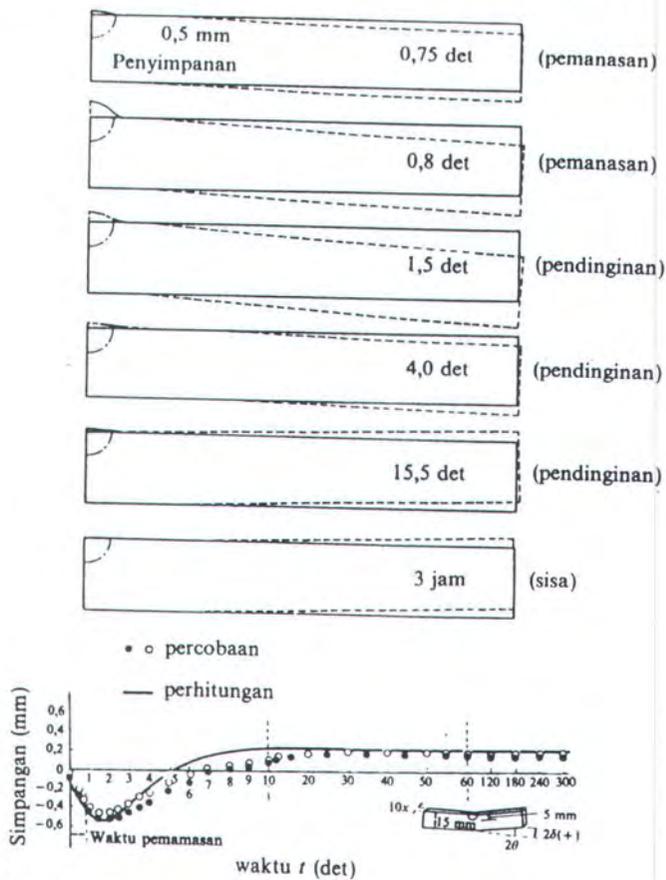
### 2.6.2. Perubahan Bentuk Sudut dalam Las Tumpul

Perubahan sudut disebabkan karena adanya perbedaan temperatur antara permukaan yang dilas dan permukaan sebaliknya. Proses terjadinya perubahan sudut ini dapat dilihat dalam gambar 2.22 ( Wiryosumarto, Okumura., 1991). Bila pelat yang dilas tipis, perubahan sudut yang terjadi juga kecil ( gambar 2.21 ).

Perubahan sudut menjadi lebih besar bila pelat yang dilas makin tebal, tetapi sampai pada suatu batas ketebalan tertentu perubahan sudutnya menurun dengan makin tebalnya pelat. Hal ini disebabkan oleh penahanan yang kuat dari logam yang tebal. Hubungan antara perubahan sudut dan kondisi pengelasan ditunjukkan dalam gambar 2.23. Untuk batang uji manik pada pelat spesimen dapat dilihat pada gambar 2.24. .



**gambar 2.21. DIAGRAM SKEMATIK HUBUNGAN ANTARA PERUBAHAN SUDUT DAN TEBAL PELAT PADA KONDISI LAS YANG TETAP.**



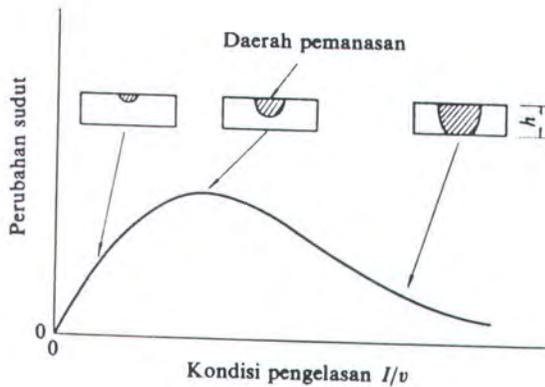
**gambar 2.22. TERJADINYA PERUBAHAN SUDUT SELAMA SIKLUS TERMAL**

Perubahan sudut akan mencapai harga tertinggi pada suatu harga  $I/h \sqrt{vh}$  ( di mana

:  $I$  = arus las,  $h$  = tebal pelat, dan  $v$  = kecepatan las ) di tengah-tengah dari sumbu di atas.

Harga tertinggi ini pada dasarnya tidak dipengaruhi oleh ukuran elektrode tetapi harga  $I/h$

$\sqrt{vh}$



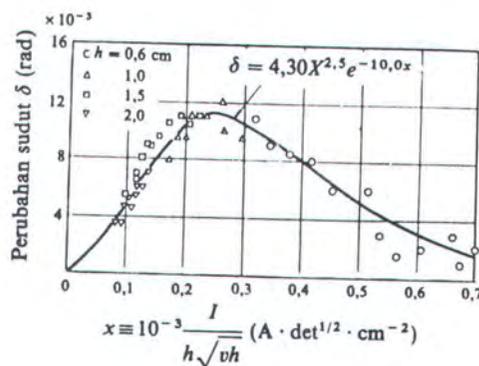
**gambar 2.23**

**DIAGRAM SKEMATIK HUBUNGAN ANTARA PERUBAHAN SUDUT DAN KONDISI PENGELASAN**

untuk perubahan sudut tertinggi menjadi lebih besar dengan bertambah besarnya diameter elektrode sesuai tabel 2.8.( Wiryosumarto, Okumura,1991).

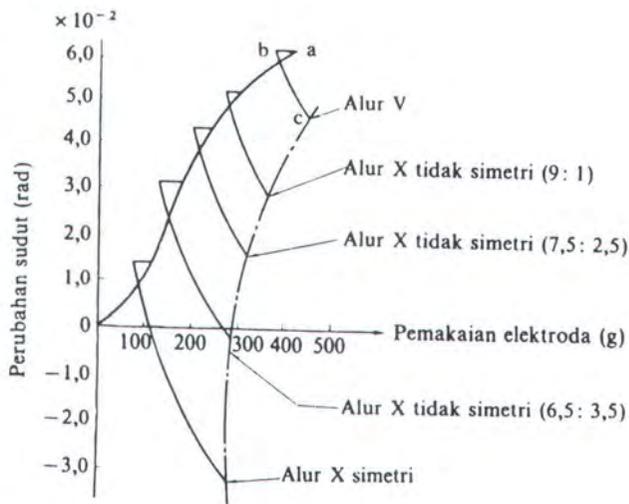
diameter kawat ( mm )	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4
besar arus ( Ampere )	<400	300-500	350-800	500-1100	700-1600
	8,0				>1000

**tabel 2.8. TABEL UKURAN DIAMETER KAWAT TERHADAP BESAR ARUS LAS**



**gambar 2.24. HUBUNGAN ANTARA PERUBAHAN SUDUT DAN PENGELASAN DALAM BATANG UJI MANIK PADA PELAT ( elektrode JIS D4301 Ø 4 mm )**

Dalam las tumpul perbedaan berat bahan lasan pada permukaan las dengan permukaan sebaliknya sangat mempengaruhi besarnya perubahan sudut. Dalam gambar 2.25 dapat dilihat pengaruh dari bentuk alur terhadap perubahan sudut. Dalam hal perubahan sudut, percobaan-percobaan menunjukkan hasil yang memuaskan pada pengelasan dengan tebal antara 10 sampai 15 mm dengan alur bentuk V, pada pengelasan tebal pelat antara 15 sampai 30 mm dengan alur bentuk X tidak simetri dan pada pelat tebal antara 30 sampai 40 mm dengan alur bentuk X yang simetri.



**gambar 2.25.**  
**PENGARUH BENTUK ALUR TERHADAP PERUBAHAN SUDUT PADA LAS TUMPUL**  
**( Tebal Pelat 19 mm )**



*BAB*

**III**

## BAB III

### METODE ESTIMASI DEFORMASI ANGULAR :

#### *SOVIET TECHNIQUE*

##### 3.1. UMUM

Hampir keseluruhan dari pelat badan kapal mengalami proses pengelasan, oleh karena itu prediksi terhadap deformasi akibat pengelasan setempat amatlah penting. Parameter - parameter yang secara langsung mempengaruhi proses pengelasan sangat jamak dan kompleks sehingga teori eksak matematik untuk memprediksikannya tidak tersedia. beberapa pakar telah berupaya untuk mengestimasi deformasi akibat pengelasan setempat berdasar pada persamaan empiris dan semi-empiris. Dari pelbagai literatur mengenai studi deformasi akibat pengelasan setempat, langkah awal penelitian diletakkan pada geometri dan material pelat. batasan nilai-nilai parameter kritis dipenuhi dari kegiatan-kegiatan eksperimental yang sulit untuk didata secara sistematis. Hal ini yang setidaknya menjadi sedikit kendala dalam membuat sebuah penghantar kerangka kerja guna mengestimasi pengaruh deformasi akibat faktor-faktor pengelasan, seperti: kecepatan arus, nomor pass, ukuran elektrode, material, dan sebagainya. metode pendekatan ini diambil dari USSR dan dikembangkan, dengan disertai penerbitan beberapa buku dengan referensi utama dari *Kuzminov* (1974). Dari titik pandang (*standpoint*) pembangunan badan kapal, hal ini jelas sangat berguna.

##### 3.2. KARAKTERISTIK METODE

Dengan latar belakang pengelasan pada bangunan kapal, metode ini menjadi sangat penting dalam mengontrol bentuk-bentuk defleksi yang bakal terjadi setelah pelat hasil pengelasan mendingin. Perilaku akibat pengelasan setempat ini akan mempengaruhi kekuatan dari struktur pelat. Perhatian terhadap hal ini telah membawa konsekuensi pada beberapa pendekatan dengan titik berat pada masalah :

1. Deformasi pada pengelasan setempat hasil pengujian di laboratorium.
2. Deformasi pada pengelasan setempat pada pelat badan kapal hasil pengamatan secara aktual.
3. Pengembangan dari formula semi-empirik untuk mengestimasi akibat pengelasan setempat pada kondisi pengelasan yang telah diberikan.
4. Pengembangan dari kode-kode numerik untuk mengestimasi deformasi pelat akibat pengelasan setempat.

Para peneliti telah mengidentifikasi lebih dari 15 parameter penentu yang sangat berpengaruh dalam menghitung seberapa besar hasil estimasi dari defleksi maksimum pengelasan setempat. Parameter ini, termasuk di dalamnya data-data dimensi material, sifat-sifat fisik material dan pekerjaan pengelasan dapat diamati dalam tabel 3.1.

Nilai-nilai yang besar untuk setiap parameter menyebabkan deformasi akibat pengelasan setempat tidak mudah untuk dipakai dengan menggunakan suatu metodologi dalam menghitung seluruh dari parameter-parameter pengelasan. Sehingga oleh Antonio nilai-nilai yang berlebihan besarnya dari parameter pengelasan pelat-pelat kapal tersebut telah dipelajari dengan mencoba menghubungkannya antara bentuk-bentuk akibat pengelasan setempat pada deformasi dengan geometri pelat dan ketebalannya berdasar pada asumsi bahwa pengelasan merupakan suatu proses yang berulang.

Sementara pendekatan-pendekatan ini dicoba diterapkan, namun kemampuan dalam menyelesaikan parameter-parameter yang ada tidak dapat dipenuhi. Di lain pihak, peneliti

Jenis Data	Sub - Sub Data
Data dimensi material	<ul style="list-style-type: none"> <li>- panjang</li> <li>- lebar</li> <li>- tebal</li> </ul>
Data sifat-sifat fisik material	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coefficient of Linier Expansion</li> <li>- Density</li> <li>- Spesific Heat Capacity</li> <li>- Strain at Yield Point</li> <li>- Modulus Of Elasticity</li> <li>- Poisson's Ratio</li> <li>- Thermal Conductivity</li> <li>- Melting Point</li> <li>- Yield Temperature</li> <li>-Strain Corresponding to The Yield Limit</li> </ul>
Data pekerjaan pengelasan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- diameter elektrode</li> <li>- kecepatan pengelasan</li> <li>- arus dan tegangan mesin las</li> </ul>

**tabel 3.1.**

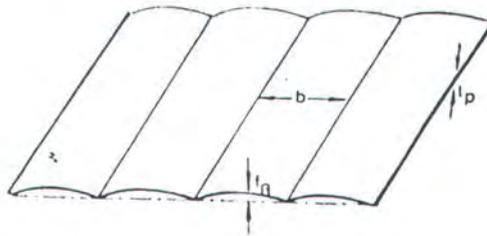
*RANGKUMAN DATA-DATA MASUKAN*

masalah-masalah teknologi las dari USSR. Mencoba menganalisa dan memprediksi untuk tiap data-data parameter pengelasan, melalui terobosan-terobosan pengembangan khusus yakni dengan melihat pengaruh kontribusi proses pengelasan terhadap timbulnya defleksi. Metodologi Soviet ini dipresentasikan ke dalam suatu format semi-empirikal yang dijabarkan di dalam buku karangan S.A. *Kuzminov*. Buku ini menitikberatkan pada rangkuman hasil eksperimen yang didasai oleh prinsip-prinsip heat transfer dan kekuatan material. Pemahaman dari metode ini dapat diperdalam pada tabel di bawah ini, di mana parameter-parameter dipakai sebagai input dalam menentukan defleksi pelat akibat proses

pengelasan sambungan tumpul antar 2 buah pelat. Penggunaan data input di atas, angka-angka pada grafik dan formula semi-empiris dipakai untuk menghitung:

1. Pengurangan memanjang dari struktur pengelasan. Bila nilai ini melebihi nilai kritis, struktur menjadi tidak stabil dan hal ini berakibat pada bertambahnya defleksi pelat.
2. Energi panas untuk setiap unit panas. Energi ini bergantung pada nomor pass, karakter flux, dan sebagainya. Energi panas ini dan parameter-parameter tambahan digunakan untuk mendapatkan nilai deformasi angular dari struktur sambungan tumpul pengelasan setelah tiap-tiap pass pengelasan.
3. Total dari nilai deformasi angular dan defleksi normal. Nilai ini merupakan jumlah kumulatif dari deformasi angular untuk tiap-tiap pass. Bila pelat hasil pengelasan diketahui tidak stabil, deformasi-deformasi yang berhubungan dengannya dapat juga ditambahkan di sini.

Outline dari metode *Kuzminov* ini diaplikasikan untuk deformasi pada pengelasan setempat dari pelat dengan pengelasan sambungan tumpul. Dengan ini diharapkan adanya pemahaman tentang hubungan antara proses pengelasan dengan defleksi akhirnya.



**gambar 3.1.**  
*GEOMETRI PELAT SAMBUNGAN LAS TUMPUL TANPA PENAHANAN SISI*

### 3.3. PROSEDUR

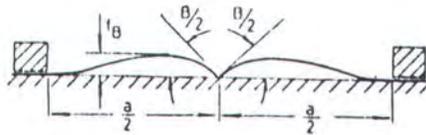
Gambar 3.1. menerangkan bahwa potongan melintang dari suatu ketebalan pelat  $t_p$  yang tersusun dari pengelasan sambungan tumpul dengan lebar  $b$ . Deformasi yang terjadi akibat pengelasan setempat adalah deformasi angular ( sudut ) yang dinotasikan sebagai  $\beta$ .  
diberikan :

$$f_{\beta} = \frac{\beta b}{8} \quad (1)$$

Dalam beberapa kasus, tepi-tepi pelat ditahan, seperti nampak dalam gambar 3.2 untuk keadaan yang umum, defleksi pelat maksimum, diberikan sebagai berikut :

$$f_{\beta} = 0,037 \beta a \quad (2)$$

dimana  $a$  adalah jarak di antara kedua penahan.



**gambar 3.2.**

#### *GEOMETRI PELAT SAMBUNGAN LAS TUMPUL DENGAN PENAHANAN SISI.*

Pelat dapat menjadi tidak stabil dengan timbulnya pengurangan memanjang ( *longitudinal shortening* ) pada sepanjang *weld metal* setelah penahan dilepaskan. Kondisi dari instabilitas ini diberikan dengan :

$$\frac{v}{b t_p} > \varepsilon_{cr} \quad (3)$$

$v$  = volume pengurangan memanjang untuk pengelasan sambungan tumpul setiap unit panjang (  $\text{cm}^3 / \text{cm}$  )

$bt_p$  = lebar bagian dari pelat untuk pengelasan sambungan tumpul

$\epsilon_{cr}$  = nilai deformasi kritis

Nilai deformasi kritis  $\epsilon_{cr}$  dapat dirumuskan, sebagai berikut :

$$\epsilon_{cr} = 0,9 \frac{t_p}{l} \left( 1 + 0,448 \frac{f_b^2}{t_p^2} \right) \quad (4)$$

di mana  $l$  adalah panjang pelat.

Volume pengurangan memanjang untuk setiap unit panjang diberikan sebagai berikut:

$$v = K_m V_m \quad (5)$$

di mana  $K_m$  adalah suatu koefisien yang diberikan, sebagai berikut :

$$K_m = 1 + \frac{8 \epsilon_s^m}{(a_0 / c \gamma) \theta} \quad (6)$$

di mana :

$m$  = nomor pass

$\epsilon_s$  = prosentase kemuluran tarik untuk kondisi *yield limit* dari material

$\gamma$  = density material (  $g/cm^3$  )

$c$  = kapasitas panas spesifik pelat (  $cal/g \text{ } ^\circ C$  )

$a_0$  =  $\lambda / c\gamma$  = rata-rata perpindahan panas dalam pelat (  $cm^2/s$  )

$\lambda$  = konduktivitas thermal (  $cal/cm \cdot s \cdot ^\circ C$  )

$\theta$  = koefisien proporsionalitas antara energi panas untuk setiap unit panjang dan luas potongan melintang dari pengelasan (  $cal/cm^3$  ).

$V_m =$  volume pengurangan untuk 1 pass.

Bila nomor pass sama dengan 3 atau kurang,  $K_m \approx 1$  dan

$$v \approx V_m \approx 0,29 \frac{\alpha g_p}{C\gamma} \quad (7)$$

untuk pelat mild steel :

$$v \approx V_m \approx 3,6 \times 10^{-6} g_p \quad (8)$$

Bila persamaan ( 3 ) terpenuhi, maka pelat deformasi  $f$  untuk pelat yang menjadi tidak stabil adalah :

$$f = 0,6.1 \sqrt{((v/bt_p) - \epsilon_s)} \quad (9)$$

Energi panas setiap unit panjang dari pelat dengan pengelasan sambungan tumpul diestimasikan dengan :

$$q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V} \quad (\text{cal/cm}) \quad (10)$$

di mana :  $I =$  Arus pengelasan ( Ampere )

$U =$  Voltase ( Volt )

$V =$  kecepatan pengelasan ( cm/s)

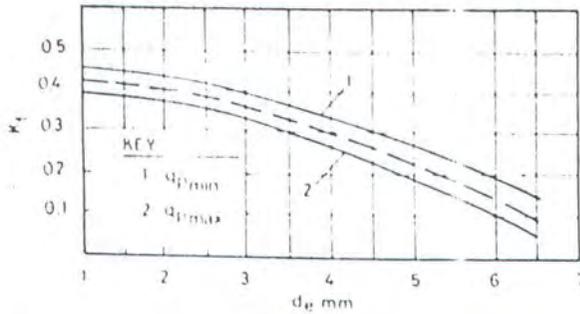
$\eta =$  efektivitas efisiensi material pengelasan (  $0,65 \leq \eta \leq 0,80$  )

Bila pengelasan terjadi di bawah flux, sebagai dari energi panas diserap oleh proses panas dan peleburan dari flux. Kehilangan energi panas  $q_{pf}$  ini dapat diestimasikan berdasar pada energi panas yang diberikan berdasar pada persamaan ( 10 ) :

$$q_{pf} = K_f. q_p \quad (11)$$

Koefisien  $K_f$  diberikan berdasar dalam gambar 3.3 sebagai suatu fungsi diameter elektrode  $d_e$ . Bentuk kurva dapat diindikasikan bahwa nilai  $K_f$  menurun menurut kurve 1,2 dalam

gambar 3.3 Garis putus-putus dalam gambar 3.3 dapat digunakan untuk mendapatkan nilai  $K_f$  yang lebih representatif ketika dilakukan perhitungan.

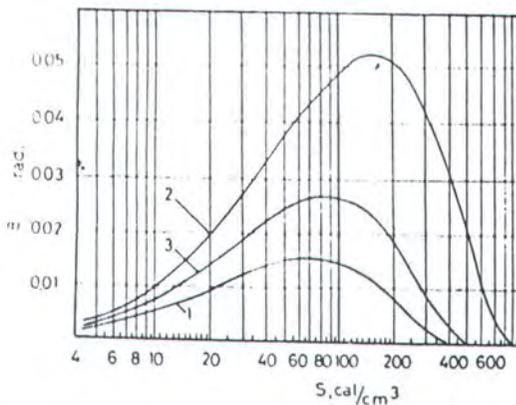


**gambar 3.3. KURVA KOEFISIEN ENERGI PANAS FLUX  $K_f$  TERHADAP DIAMETER ELEKTRODE LAS  $d_e$ .**

Deformasi angular  $\beta$  untuk pengelasan multipass pelat dengan sambunag tumpul dapat diuraikan sebagai berikut :

$$\beta = \sum_{i=1}^m (\pm \beta_i) \tag{12}$$

di mana  $m$  adalah nomor pass dan  $\beta_i$  dapat ditentukan dengan menggunakan gambar 3.4. Tanda “ + “ dalam persamaan 12 dipakai bila sudut di antara permukaan pelat pengelasannya berkurang. Tanda “ - “ dipakai bila sudut bertambah.



**gambar 3.4. KURVA DEFLEKSI SUDUT  $\beta$  PELAT TERHADAP PARAMETER INTENSITAS PANAS  $S$  ( 1 = pengelasan dengan penahanan sisi, 2 = pengelasan tanpa penahanan sisi, 3 = pengelasan multipass ).**

Parameter  $S$  dalam gambar 3.4 dihitung berdasar persamaan :

$$S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} \quad (\text{cal/ cm}^3) \quad (13)$$

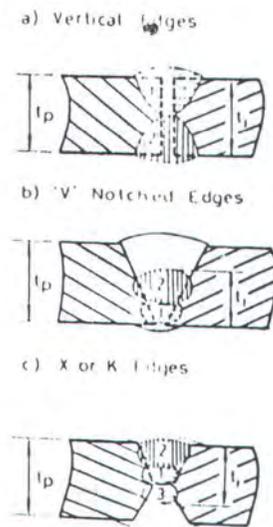
di mana :

$q_p'$  = energi panas efektif untuk setiap unit panjang ( cal/ cm )

$\psi_0$  = koefisien pemanasan relatif

$\eta_0$  = efisiensi transfer panas

$t_1$  = tinggi dari potongan melintang pengelasan sambungan tumpul setelah nomor pass ke- $i$  seperti pada gambar 3.5.



**gambar 3.5. SKETSA TINGGI TINGGI POTONGAN MELINTANG KAMPUH LAS TUMPUL  $t_1$  UNTUK VARIASI BENTUK PERSIAPAN SISI.**

Penting kiranya untuk mendapatkan nilai  $S$  dari suatu proses pengelasan. Pada pengelasan busur diameter elektrode  $d_e$ , jarak pemisah ( gap ) di antara pelat dan elektrode, dan arus  $I$  merupakan parameter kritis. Gambar 3.6a menunjukkan daerah ( zone ) yang terkontaminasi akibat proses panas pengelasan. Untuk dapat memperoleh karakteristik

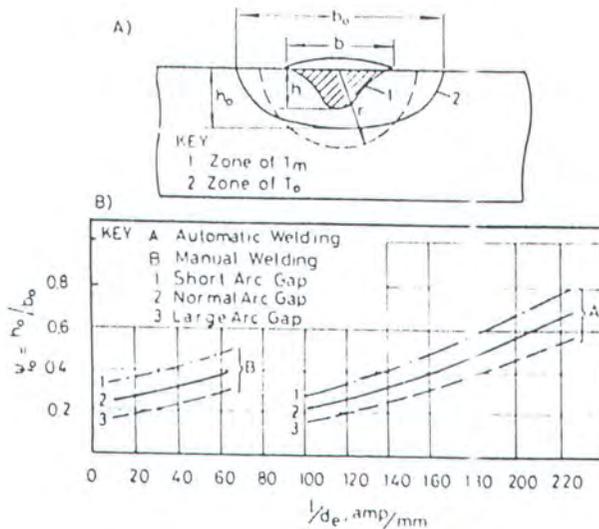
perluasan pengaruh, lebar  $b_0$  dan tinggi  $h_0$  dipakai dalam mendefinisikan koefisien relatif panas  $\psi_0$ .

$$\psi_0 = h_0 / b_0 \tag{14}$$

Angka-angka hasil pengujian pada pelat-pelat lambung menunjukkan bahwa rasio dari  $h_0 / b_0$  berada dalam batas :

$$1,1 h/b \leq h_0 / b_0 \leq 1,2 h/b \tag{15}$$

Gambar 3.6b menunjukkan hasil pengujian bahwa untuk arus dan diameter elektrode yang bervariasi akan didapat harga  $\psi_0$  yang berbeda pula.



**gambar 3.6.**

**SKETSA DAERAH PENGELASAN : ( a ) DAERAH YANG SAMA DENGAN PENGARUH TEMPERATUR YIELD  $T_0$ ,  $T_m$  = TEMPERATUR LEBUR, ( b ) KURVA KOEFISIEN PANAS RELATIF  $\omega_0$  TERHADAP RATIO ARUS LAS DAN UKURAN DIAMETER ELEKTRODE  $[ I / d_e ]$ .**

Telaah yang lebih jauh lagi menunjukkan bahwa penambahan panas selama pengelasan berlangsung dapat dikarakteristikkan dengan parameter  $\epsilon$ .

$$\epsilon = \frac{q_p' V^2}{C\gamma T_0 a_0^2} = \frac{q_p' V^2}{\lambda T_0 a_0} \tag{16}$$

di mana  $V$  adalah kecepatan pengelasan ( cm/s) dan  $T_0$  adalah temperatur *yield* pelat ( °C).

Nilai  $q_p'$  memiliki hubungan yang kompleks dengan karakter pengelasan dan geometri dari pelat pengelasan. Hubungan ini diekspresikan melalui suatu formula yang dibatasi untuk tiap tipe pengelasan, seperti :

a). 1 atau 2 pass, pengelasan manual :

$$q_p' = q_p \tag{17}$$

b). 1 atau 2 pass, pengelasan dengan flux :

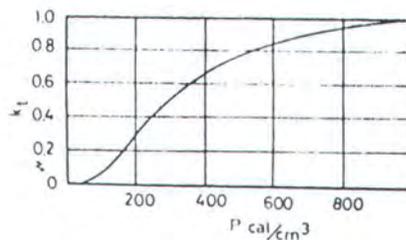
$$q_p' = ( 1 - K_t K_f )q_p \tag{18}$$

c). Pengelasan multipass; manual :

$$q_p' = K_{p_i} q_p \tag{19}$$

d). Pengelasan multipass, dengan flux :

$$q_p' = K_{p_i}( 1 - K_t K_f )q_p \tag{20}$$



**gambar 3.7. KURVA KOEFISIEN KONTRAKSI PELAT AKIBAT PANAS  $K_t$  TERHADAP PARAMETER INTENSITAS PANAS  $P$**

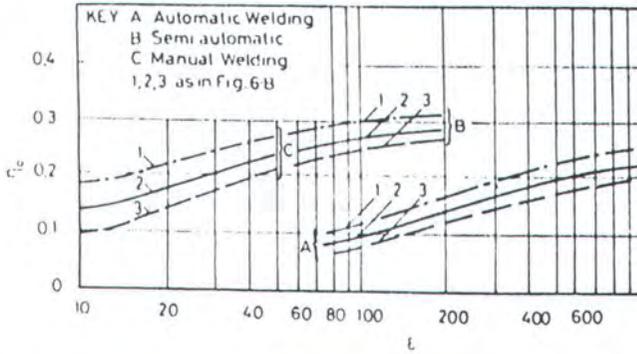
Pada persamaan (18) dan (20), muncul koefisien  $K_t$ , untuk mengestimasi koefisien tersebut, sebagai akibat dari faktor ketebalan pelat, intensitas panas  $P$  digunakan.

Intensitas panas  $P$  dalam gambar 3.7 dihitung berdasarkan :

$$P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} \quad ( \text{cal/ cm}^3 ) \tag{21}$$

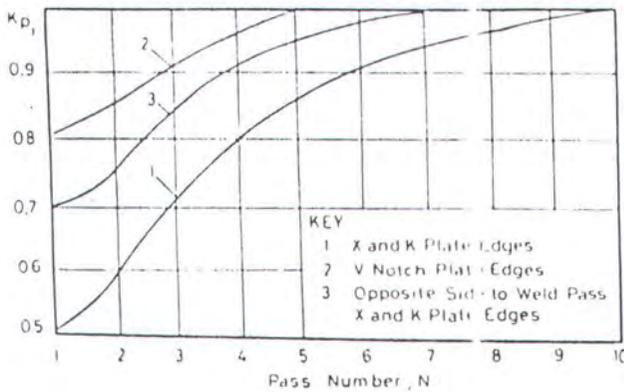
di mana  $p$  adalah koefisien berdasar formula:

$$p = \frac{1450}{C\gamma T_m} \quad (22)$$



**gambar 3.8.** KURVA EFISIENSI TRANSFER PANAS  $\eta_0$  TERHADAP PARAMETER TRANSMISI PANAS  $\epsilon$ .

$\eta_0$  diberikan menurut gambar 3.8 sebagai fungsi dari  $\epsilon$  ( persamaan 16).  $\psi_0$  diberikan dalam gambar 3.6b. Koefisien  $K_{p1}$  diperoleh dari gambar 3.9 berdasar fungsi dari nomor pass pengelasan N. Kurva 1 berhubungan dengan nilai-nilai koefisien  $K_{p1}$  untuk bentuk persiapan sisi X dan K. Kurva 2 memberikan koefisien untuk bentuk persiapan sisi V, sementara kurva 3 berhubungan dengan bentuk-bentuk persiapan sisi selain bentuk X dan K.



**gambar 3.9.** KURVA PARAMETER PASS LAS TERHADAP JUMLAH PASS PENGELASAN  $m$ .

Nilai-nilai koefisien  $\eta_0$  dapat diperoleh setelah menyelesaikan beberapa langkah iterasi karena nilai  $P$  berbanding lurus dengan nilai  $q_p'$ , di mana fungsi  $K_t$  diberikan dalam gambar 3.7.

Koefisien  $s$  dalam persamaan 13 diformulasikan sebagai berikut:

$$s = \frac{100 \alpha}{C\gamma\epsilon_s} \quad (23)$$

di mana  $\alpha$  adalah koefisien ekspansi linier.

### 3.4. RANCANGAN HASIL

Sebagai aplikasi dari metode pendekatan ini dicoba suatu betuk rancangan hasil yang dianggap cukup representatif. Dengan mengambil langkah-langkah sistematis: parameter-parameter masukan, perhitungan empiris matematik, dan keluaran hasil, maka diharapkan penggunaan metode pendekatan ini efektif dan efisien dalam penggunaannya.

#### 3.4.1. Parameter-parameter masukan:

- tebal pelat ( $t_p$ ); ( mm)
- diameter elektrode ( $d_e$ ); ( mm)
- arus mesin las ( $I$ ); ( Ampere )
- tegangan mesin las ( $V$ ); ( Volt )
- kecepatan pengelasan ( $V$ ); ( cm/s )
- jenis dan metode pengelasan
- koefisien ekspansi linier ( $\alpha$ ); (  $1/^\circ\text{C}$  )

- kapasitas panas spesifik dari pelat ( C );  
( cal/ g °C ).
- kerapatan material (  $\gamma$  ); ( g/ cm<sup>3</sup> )
- kemuluran tarik terhadap batas *yield* material  
(  $\epsilon_s$  )
- temperatur *yield* pada pelat ( T<sub>0</sub> ); ( ° C )
- rata-rata transfer panas dalam pelat( a<sub>0</sub> );  
( cm<sup>2</sup>/ s )
- koefisien ( p );
- efisiensi efektivitas (  $\eta$  );
- temperatur lebur material ( T<sub>m</sub> ); ( ° C )

### 3.4.2. Perhitungan

Persamaan dan gambar fungsi kurva yang dipakai:

$$- q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V} \quad ( \text{ cal/ cm} ) \quad ( 10 )$$

$$- K_f \quad ( \text{ gambar 3.3 } )$$

$$- q_p' = ( 1 - K_f ) q_p$$

$$- \frac{q_p'}{t^2}$$

$$- I/ d_e ; \psi_0 \quad ( \text{ gambar 3.6b } )$$

$$- \epsilon_s = \frac{q_p' V^2}{C\gamma T_0 a_0^2} ; \eta_0 \quad ( \text{ gambar 3.8 } )$$

$$C\gamma T_0 a_0^2$$

$$- P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} \quad (\text{ cal/ cm}^3)$$

$$p = \frac{1450}{C\gamma T_m}$$

$$K_t$$

( gambar 3.7 )

$$- q_p' = ( 1 - K_t K_f ) q_p \quad ( 18 )$$

dari sini dapat diperoleh nilai  $\eta_0$  yang sebenarnya ( *corrected* ):

$$\text{untuk nilai persamaan : } \epsilon = \frac{q_p' V^2}{C\gamma T_0 a_0^2} \text{ baru ; } \eta_0 \text{ baru ; } \frac{q_p'}{t^2} \text{ baru}$$

$$- s = 100 \frac{\alpha}{C\gamma \epsilon_s} \quad ( 23 )$$

$$- S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} \quad (\text{ cal/ cm}^3) \quad ( 13 )$$

### 3.4.3. Keluaran Hasil

Hasil yang diharapkan adalah seberapa besar sudut sari deformasi angular yang terjadi berdasar data-data masukan sebelumnya. sudut yang terbentuk dinotasikan dalam  $\beta$  dengan satuan radian. Besar nilai  $\beta$  didapat setelah persamaan 13 terselesaikan, yaitu untuk memperoleh nilai parameter  $S$  (  $\text{ cal/ cm}^3$  ). berdasar gambar grafik 3.4, nilai parameter  $S$  digunakan untuk mencari besar nilai  $\beta$ . Pilihan dalam grafik terbagi untuk 3 kondisi pengelasan yang dapat disesuaikan menurut kondisi pengerjaannya. Kurva nomor 1 adalah untuk pengelasan dengan penahanan, kurva nomor 2 adalah untuk pengelasan tanpa penahanan, dan kurva nomor 3 adalah untuk pengelasan multipass.

### 3.5. CONTOH NUMERIK

Untuk memperjelas dasar penggunaan dari metode pendekatan ini dalam menentukan besar deformasi angular suatu material pelat, digunakan sebuah contoh numerik dengan data-data sebagai berikut ( Birman, V., Latorre, R., 1989 ) :

- 1) tebal pelat ;  $( t_p ) = 14 \text{ mm}$
- 2) diameter elektrode ;  $( d_e ) = 5 \text{ mm}$
- 3) arus mesin las ;  $( I ) = 990 \text{ Ampere}$
- 4) tegangan mesin las ;  $( U ) = 40 \text{ Volt}$
- 5) kecepatan pengelasan ;  $( V ) = 0.9722 \text{ cm/s}$
- 6) jenis dan metode pengelasan = *SAW, automatic welding under flux, butt joint*
- 7) koefisien ekspansi linier ;  $( \alpha ) = 12,7 \times 10^{-6} \text{ 1/ }^\circ\text{C}$
- 8) kapasitas panas spesifik dari pelat ;  $( C ) = 0,13 \text{ cal/ g }^\circ\text{C} .$
- 9) kerapatan material ;  $( \gamma ) = 7,85 \text{ g/ cm}^3$
- 10) kemuluran tarik terhadap batas *yield* material ;  $( \epsilon_s ) = 12 \times 10^{-4}$
- 12) temperatur *yield* pada pelat ;  $( T_0 ) = 75 \text{ }^\circ\text{C}$
- 13) rata-rata transfer panas dalam pelat ;  $( a_0 ) = 0,068 \text{ cm}^2/\text{s}$
- 14) koefisien ;  $( p ) = 1$
- 15) efisiensi efektivitas ;  $( \eta ) = 0,85$
- 16) temperatur lebur material ;  $( T_m ) = 1548 \text{ }^\circ\text{C}$
- 17) kondisi pengelasan = tanpa penahanan ( *unrestrained edges* ).

Langkah-langkah perhitungan selanjutnya( nilai dalam parameter sesuai dengan masukan data di atas ),

1).  $q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V}$  ( cal/ cm ) ,  $q_p = 8300$  cal/ cm.

2).  $K_f = 0,25$  ( gambar 3.3 )

$$q_p' = (1 - K_f)q_p = 6230 \text{ cal/ cm}$$

$$\frac{q_p'}{t^2} = 3180 \text{ cal/ cm}^3$$

3).  $I/ d_e = 198$  A/ mm ;  $\psi_0 = 0,56$  ( gambar 3.6b )

4).  $\epsilon = \frac{q_p' V^2}{C\gamma T_0 a_0^2} = 1270$  ;  $\eta_0 = 0,23$  ( gambar 3.8 )

5).  $t_1$  diperoleh berdasarkan gambar 5 ,  $t_1 = t_p$  ( gambar 3.5 )

$$P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} = 410 \text{ cal/ cm}^3$$

$$p = \frac{1450}{C\gamma T_m}$$

$K_f = 0,72$  ( gambar 3.7 )

6)  $q_p' = (1 - K_f K_f)q_p = 6800$  cal/ cm

dari sini dapat diperoleh nilai  $\eta_0$  yang sebenarnya ( *corrected* ):

untuk nilai persamaan :  $\epsilon = \frac{q_p' V^2}{C\gamma T_0 a_0^2}$  baru ;  $\eta_0$  baru ;  $\frac{q_p'}{t^2}$  baru

7).  $s = 100 \frac{\alpha}{C\gamma \epsilon_s} = 1$

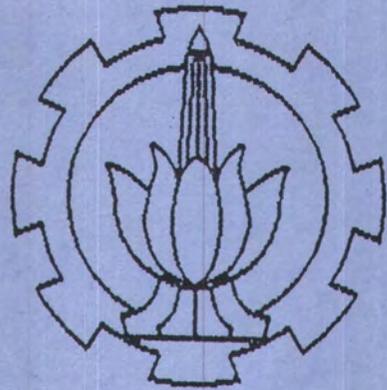
8)  $S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} = 450$  cal/ cm<sup>3</sup>

Sesuai dengan nilai kapasitas panas per satuan volume material di atas ( S ) dan dengan mengacu pada gambar 3.4, besar kuantitas sudut deformasi ( radian ) yang akan terjadi (  $\beta$  ) dapat diketahui:

$$S = 450 \text{ cal/ cm}^3$$

$$\beta = 0,025 \text{ radian .}$$

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pelat yang memiliki data-data material dan data-data pengelasan yang akan dikerjakan seperti tertulis di atas, diperkirakan akan mempunyai peluang kecacatan berupa deformasi angular sebesar 0,025 radian atau sebesar 1,5 °.



*BAB*

**IV**

## BAB IV

### PERSIAPAN DAN PELAKSANAAN PENGUJIAN

#### 4.1. PENDAHULUAN

Pada percobaan ini akan dilakukan pengamatan untuk mengetahui besar sudut deformasi angular  $\beta$  pelat SS-41/ KS akibat pengaruh pengelasan jenis sambungan tumpul (*butt joint*). Untuk itu diperlukan suatu pengujian pengelasan dan pengukuran. Pengujian pengelasan yang dilakukan terbagi menjadi 2 bagian pengerjaan utama, masing-masing dengan variasi untuk empat ketebalan pelat. Pertama, pengelasan dengan variasi lebar pelat/ base metal dan yang kedua, variasi panjang pelat/ base metal atau juga berarti variasi panjang alur pengelasan. Keseluruhan kegiatan pengujian dilakukan dengan batasan : metode pengelasan otomatis SAW (*submerged arc welding*), tanpa penahanan (*unrestricted edges*), jenis sambungan las tumpul (*butt joint*), arah alur pengelasan adalah menurut nilai parameter yang disebut sebagai panjang pelat uji. . Sedangkan pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran deformasi sudut ( angular).

Urutan pengerjaan di dalam pengelasan baik itu mulai dari proses penandaan (*marking*), pemotongan (*cutting*), hingga pengelasan (*welding*) sampai pada pengerjaan pengukuran deformasi dilakukan sepenuhnya di Laboratorium Las Politeknik Perkapalan Surabaya. Bentuk dan ukuran spesimen serta semua proses pengujian dan pengukuran telah disesuaikan dengan kondisi dan keadaan yang ada di laboratorium dengan mengacu pada standar dan acuan yang dipakai.

Jenis material yang digunakan dalam pengujian adalah baja SS-41 produksi PT. Krakatau Steel yang merupakan jenis *mild steel*. Dalam JIS ( *Japanese Industrial Standard*) yaitu JIS G-3101, baja SS-41 disebutkan sebagai *rolled steel* yang digunakan secara umum pada struktur bangunan, jembatan, konstruksi kapal, dan struktur komersial lainnya. Material ini diperoleh dari PT. PAL Indonesia, dari pelat yang akan dipakai untuk pembuatan konstruksi badan kapal.

#### 4.2. PENGUJIAN PENGELASAN DENGAN VARIASI LEBAR PELAT ( L )

Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk mengetahui pengaruh pengelasan dengan jenis sambungan tumpul ( *butt joint*) terhadap tinggi rendahnya nilai deformasi sudut yang akan terjadi pada suatu pelat yang memiliki variasi bentangan atau lebar ( span antara panjang sisi pelat terluar yang sejajar dengan arah alur pengelasan) berbeda-beda dan ketebalan yang berbeda-beda pula.

##### 4.2.1. Spesimen uji

Material pelat yang dibutuhkan beserta dimensinya untuk membuat spesimen pengujian adalah sebagai berikut :

- a). Jenis material : SS-41 ( *mild steel* ) produksi KS ( lihat lampiran N )
- b). Dimensi :

Untuk satu jenis ketebalan ( T ) :

$$1). L \times P \times T = 200 \times 200 \times T \quad (\text{mm})$$

$$2). L \times P \times T = 250 \times 200 \times T \quad (\text{mm})$$

$$3). L \times P \times T = 300 \times 200 \times T \quad (\text{mm})$$

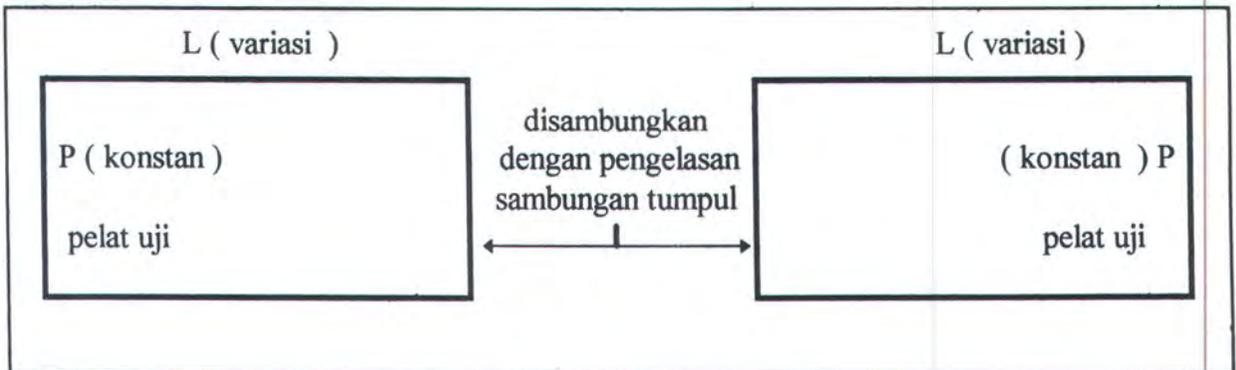
$$4). L \times P \times T = 350 \times 200 \times T \quad (\text{mm})$$

Masing-masing dimensi tersebut membutuhkan 2 buah pelat dengan ukuran yang sama. Mengingat di sini akan dilakukan pengujian dengan pengelasan untuk menghubungkan kedua buah pelat tersebut dalam sambungan tumpul ( butt joint), seperti yang terlihat dalam gambar 4.1.

c). Variasi pengujian :

- Lebar pelat/ base metal ( L ) : 200, 250, 300, 350 ( mm ) dengan ukuran panjang ( P ) tetap ( 200 mm).
- Ketebalan pelat/ base metal ( T ) : 7, 10, 12, 15 ( mm ).

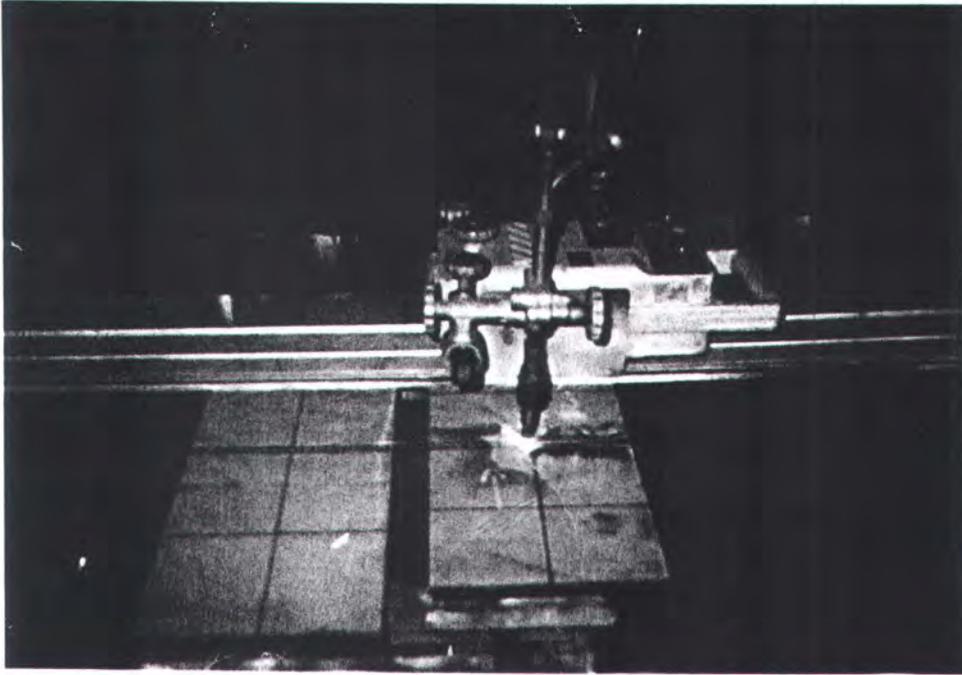
Jadi masing-masing variasi lebar memiliki empat variasi ketebalan. Jumlah kebutuhan pelat menjadi 2 ( 1 pasang ) x 4 ( variasi lebar ) x 4 ( variasi tebal ), atau keseluruhannya menjadi 32 buah pelat uji.



**gambar 4.1. MODEL SAMBUNGAN ANTARDIMENSI PELAT**

Untuk mendapatkan ukuran pelat uji yang sesuai dengan yang telah direncanakan, maka material yang akan digunakan harus melalui proses pemotongan terlebih dahulu. Pemotongan material dilakukan setelah ditandai ( *marking* ) dengan kapur/ spidol tulis sesuai dengan dimensi. Pemotongan dilakukan dengan menggunakan mesin potong semi-

otomatis *Imp, Hancock manufactured, seri no.11214-2, 220/ 240 V, 0.5 A, 50/ 60 Hz, single phase*. Proses pemotongan itu sendiri dapat dilihat pada gambar 4.2



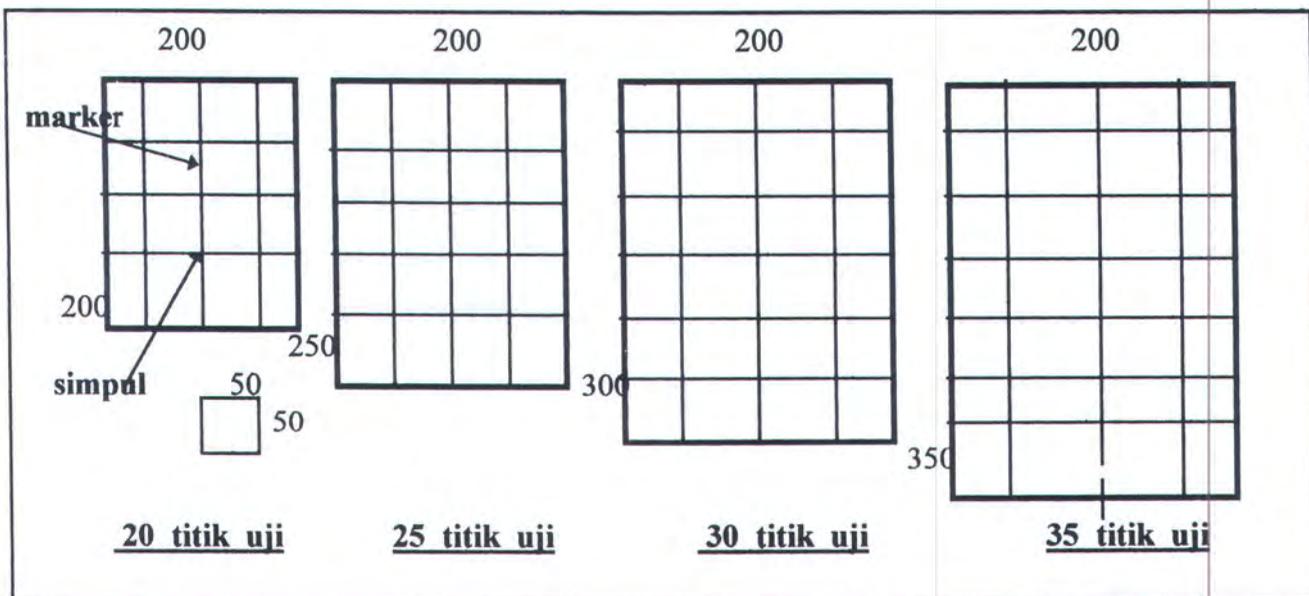
**gambar 4.2. PROSES PEMOTONGAN PELAT DENGAN MESIN SEMI-OTOMAT**

Spesimen uji akibat proses panas pemotongan jelas akan mengalami perubahan bentuk terhadap kerataan permukaannya. Karena hal itulah dilakukan proses perataan dengan menggunakan mesin press baja. Karakteristik mesin yang dipakai adalah jenis mesin press hidrolik *Ageo (Hydraulische Presse), Type HEPT 10H/ K, Nr. 17926*, dengan kapasitas kemampuan gaya tekan 125 kN. Untuk memastikan bahwa pelat telah benar-benar rata, dilakukan pengekleman di atas meja perata kemudian dipukul dengan menggunakan palu karet. Bila pelat masih belum rata, dilakukan lagi proses perataan dengan mesin, begitu seterusnya sampai kondisi kerataan tercapai. Hal ini dilakukan karena asumsi perubahan bentuk pelat akibat panas proses pemotongan tidak terjadi sehingga kondisi awal permukaan pelat sebelum proses pengelasan dianggap rata dan nilai tinggi rendahnya permukaan pelat dari meja perata akibat proses panas pemotongan adalah sama dengan nol.

**4.2.2. Persiapan Spesimen Uji**

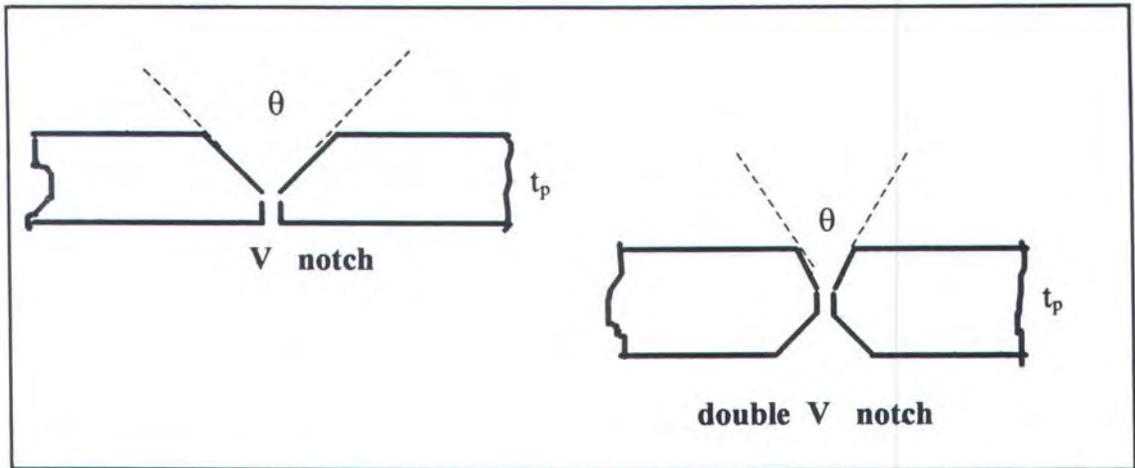
Selanjutnya pada permukaan pelat-pelat uji yang telah terpotong dan dipastikan kerataannya diberikan tanda (*marker*) dengan kapur/ spidol tulis berupa garis-garis vertikal dan horisontal ( hanya pada satu permukaan pelat ) sehingga membentuk kotak-kotak persegi dengan ukuran 50 x 50 mm ( lihat gambar 4.3 ). Pada setiap interseksi/ perpotongan antargaris dibuat tanda berupa noktah titik ( simpul ) dengan cara diketok dengan pahat. Simpul-simpul tersebut seterusnya dipakai sebagai titik uji dalam menentukan perilaku perubahan bentuk permukaan secara geometris. Penentuan ini didasarkan pada posisi kedudukan tinggi rendahnya titik terhadap bidang acuan, yaitu meja perata.

Untuk spesimen yang memerlukan persiapan sisi ( bentuk *V notch, one side, double side* ) menurut standar pengerjaan dari *welding procedure specification* ( WPS ) , dengan cara disekrap dan digerinda/ *gouging* hingga mencapai sudut *bevel*  $\theta$  ( lihat gambar 4.4 ) yang dipersyaratkan beserta dimensi muka celah ( *root face* ) dan celah akar/ *gap* ( *root opening* ) untuk masing-masing kondisi ketebalan pelat  $t_p$  .( lihat tabel 4.1 )



**gambar 4.3.**

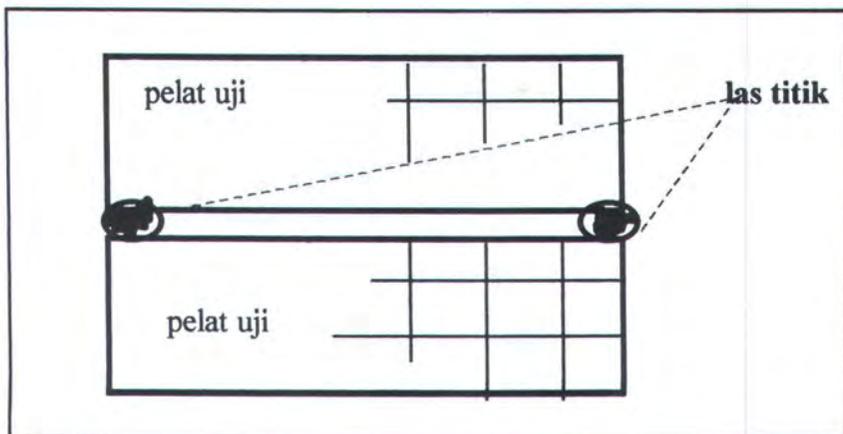
*POLA BENTUK TANDA ( MARKER ) DAN SIMPUL PADA PERMUKAAN PELAT UJI*



**gambar 4.4.** BENTUK-BENTUK PERSIAPAN SISI DAN SUDUT BEVEL  $\theta$

#### 4.2.3. Pengelasan

Sebelum pelat uji siap untuk dilas, terlebih dahulu tiap pasang pelat ( sesuai dengan dimensinya ) dilekatkan menjadi satu dengan menggunakan las titik ( *tig weld* ) pada ujung-ujung material ( *root opening* ). Seperti nampak dalam gambar 4.5, sekarang untuk jenis pengujian pengelasan dengan variabel lebar pelat/ *base metal* (  $L$  ) memiliki jumlah spesimen uji sebanyak 16 buah ( 4 variasi lebar, 4 variasi tebal ) di mana setiap spesimen uji terdiri dari dua pelat uji yang berdimensi sama.



**Gambar 4.5.** LAS TITIK ( TIG WELD ) PADA SPESIMEN UJI

Setelah persiapan spesimen uji selesai dikerjakan maka selanjutnya dilakukan pengelasan. Pemilihan metode atau cara pengelasan yang dipilih di sini adalah metode pengelasan otomatis penuh (*full automatic welding*) las busur redam, SAW (*submerged arc welding*). Dasar pertimbangan pemakaian metode ini adalah untuk mengeliminir tingkat distorsi yang diakibatkan oleh kesalahan *welder* dalam pekerjaan pengelasan (*human error*), seperti halnya jenis kecacatan pengelasan yang kerap kali terjadi dalam pengelasan-pengelasan manual, sejauh mungkin. Sehingga faktor kecacatan dalam pengelasan di sini dapat diasumsikan hanya oleh akibat proses laku panas pengelasan saja, dan faktor kecacatan lain di luar hal itu dianggap kecil sekali atau bahkan tidak ada.

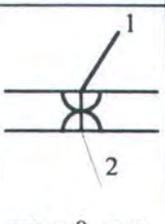
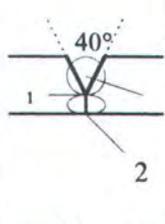
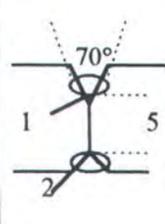
Mesin las yang dipakai adalah jenis mesin las SAW, *ESAB A2T-UP, Sweden, Mask NR. 459021, OK Flux 10.40, 10.91 (AWS F6A2-EL12, F6A2-EM12), Electrode Autrod 12.22*, dengan mesin pembangkit daya (*thyristor-controlled automatic welding rectifier*), *ESAB LAE 800, 75 A/ 17 V - 800 A/ 44 V, 50/ 60 Hz*. Parameter-parameter masukan yang diperlukan untuk dapat menjalankan mesin sehingga dapat mengelas secara otomatis

adalah

- tegangan listrik mesin las (  $U$  ), dalam Volt (  $V$  )
- arus listrik mesin las (  $I$  ), dalam Ampere (  $A$  )
- kecepatan pengelasan (  $V$  ), dalam m/ jam (  $m/h$  )
- ketebalan pelat (  $t_p$  ), dalam mm
- diameter elektode kawat las (  $\varnothing$  ), dalam mm.
- nomor pass

Parameter-parameter tersebut dapat diisi sesuai dengan kebutuhan dengan mengacu kepada standardisasi prosedur data pengelasan berdasarkan pada karakteristik mesin las. Sebagai parameter utama dalam pengisian parameter pengelasan ini adalah tebal pelat (  $t_p$  ). Variasi lebar pelat (  $L$  ) maupun variasi panjang pelat (  $P$  ) tidak mempengaruhi parameter

pengelasan yang akan digunakan, sebab tidak ada parameter lebar maupun panjang pelat yang diminta. Pada tabel 4.1. berikut akan ditampilkan spesifikasi prosedur data pengelasan dan tipe sambungan untuk metode pengelasan SAW untuk variasi 4 ketebalan pelat yang direncanakan : 7, 10, 12, 15 mm. ( lihat lampiran A ).

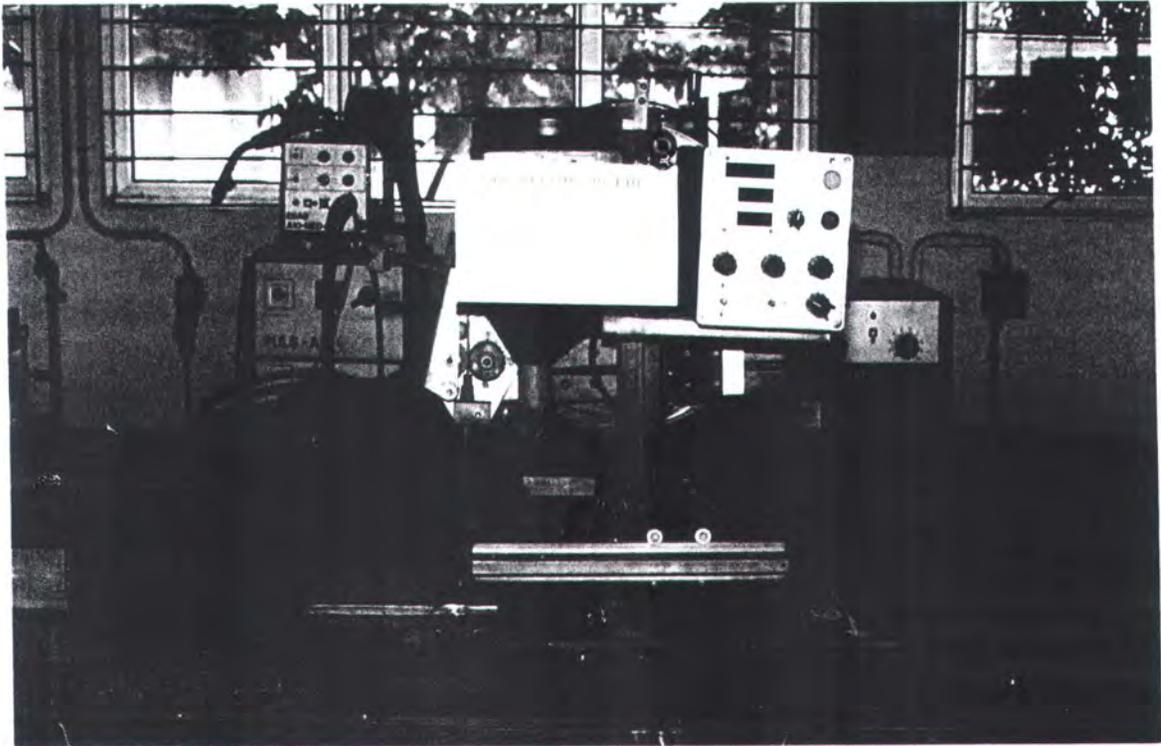
Tipe Sambungan	Ketebalan Pelat ( mm )	Diameter Elektrode ( mm )	Nomor Pass	Tegangan ( V )	Arus Listrik ( A )	Kecepatan Pengelasan ( m/ h )
 gap = 0 mm	7	4	1	35	450	46
	10	4	2	35	500	42
			1	35	500	
			2	35	500	
 ga=0-2 mm	12	4	1	34	600	35
			2	34	600	50
 gap = 0 mm	15	4	1	34	550	35
			2	34	600	35

**tabel 4.1.**

*SPEKIFIKASI PROSEDUR DAN TIPE SAMBUNGAN PENGELASAN. [ ESAB Welding Handbook : submerged arc welding mild steel and carbon-manganese steel, 1984/ 1985 ].*

Setelah data yang diperlukan untuk menjalankan mesin las diperoleh, selanjutnya diikuti dengan setting mesin meliputi pemasukan data ke dalam mesin las berupa data tegangan dan arus listrik serta kecepatan pengelasan. Sebelum itu di dahului dengan penempatan spesimen uji pada landasan dengan posisi sedemikian rupa sehingga spesimen

dapat dengan mudah dapat dilas ( lihat gambar 4.6 ). Masalah kecepatan (  $V$  ) pengelasan diuji selain dengan angka yang tertera pada monitor mesin juga dideteksi secara manual dengan menggunakan *stopwatch*.( lihat gambar 4.7. ).Dengan demikian proses pengelasan berjalan dengan otomatis sesuai dengan data hasil setting.



**gambar 4.6.** *MESIN LAS SAW DAN SPESIMEN UJI YANG SIAP DILAS.*

Jalur pengelasan adalah sepanjang daerah panjang pelat (  $P$  ) dan berlaku untuk semua pelat dan juga untuk seluruh kegiatan pengelasan. Dalam kegiatan pengelasan yang pertama ini ( variabel  $L$  ) panjang pengelasan adalah konstan yaitu sepanjang nilai  $P$  ( 200 mm ), sedang pada kegiatan yang kedua ( variabel  $P$  ) panjang pengelasan bervariasi dari 200, 250, 300, sampai 350 mm. Pelat hasil pengelasan dapat diperhatikan pada gambar 4.8. Nampak adanya kelengkungan akibat deformasi pada sepanjang permukaan spesimen uji setelah di letakkan di atas meja perata.



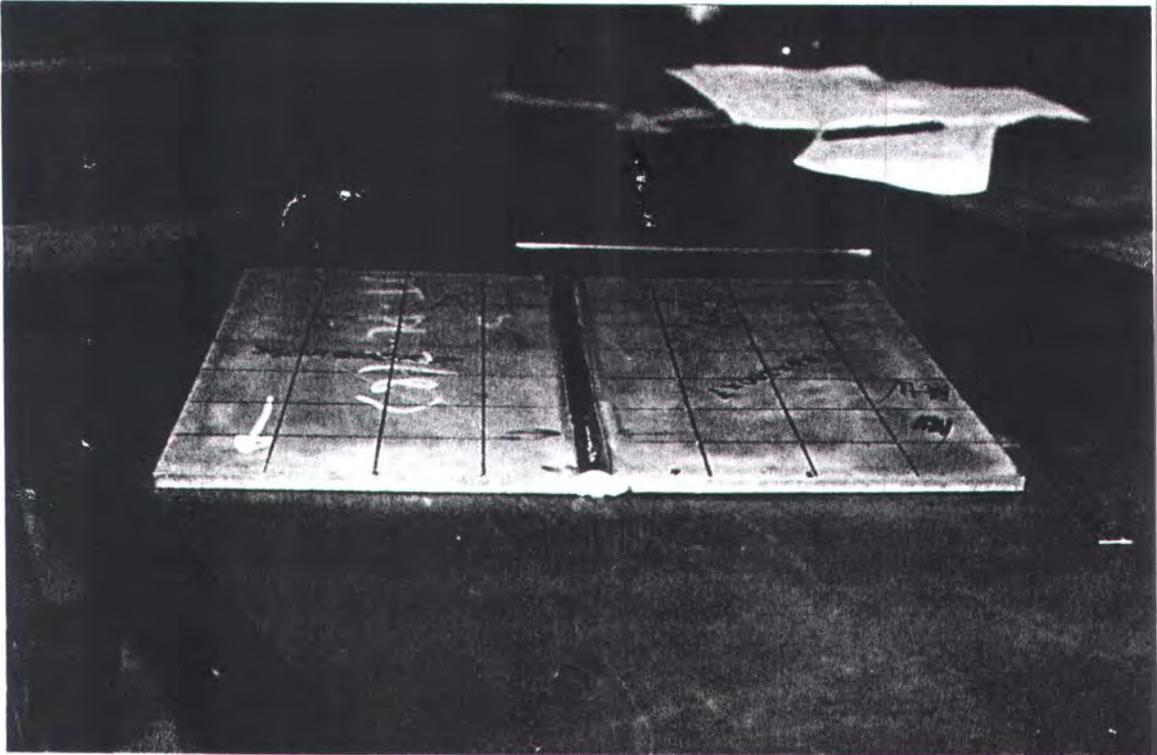
**gambar 4.7. PROSES PENGELASAN DENGAN METODE SAW**

Spesimen-spesimen uji hasil pengelasan tersebut dijaga kondisinya dari pengaruh panas dan pengaruh fisik lainnya (tekanan beban, jatuh, air/ korosi) dengan meletakkannya pada lemari penyimpanan spesimen. Hal ini dimaksudkan guna menjaga keadaan spesimen agar tidak berubah setelah terdeformasi akibat perilaku panas pengelasan.

#### **4.3. PENGUJIAN PENGELASAN DENGAN VARIASI PANJANG PELAT ( L )**

Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk mengetahui pengaruh pengelasan dengan jenis sambungan tumpul (*butt joint*) terhadap tinggi rendahnya nilai deformasi sudut yang akan terjadi pada suatu pelat yang memiliki variasi panjang pengelasan atau variasi panjang pelat ( P ) dengan lebar/ span ( L ) antara panjang sisi pelat terluar yang sejajar dengan

arah alur pengelasan yang konstan / tetap terhadap variasi ketebalan yang berbeda-beda pula.



**gambar 4.8. SPESIMEN UJI HASIL PENGELASAN**

#### 4.3.1. Spesimen uji

Material pelat yang dibutuhkan beserta dimensinya untuk membuat spesimen pengujian adalah sebagai berikut :

- a). Jenis material : SS-41 ( mild steel) produksi KS ( lihat lampiran N )
- b). Dimensi :

Untuk satu jenis ketebalan ( T ) :

- 1).  $L \times P \times T = 200 \times 200 \times T$  (mm)
- 2).  $L \times P \times T = 200 \times 250 \times T$  (mm)
- 3).  $L \times P \times T = 200 \times 300 \times T$  (mm)

$$4). L \times P \times T = 200 \times 350 \times T \quad (\text{mm})$$

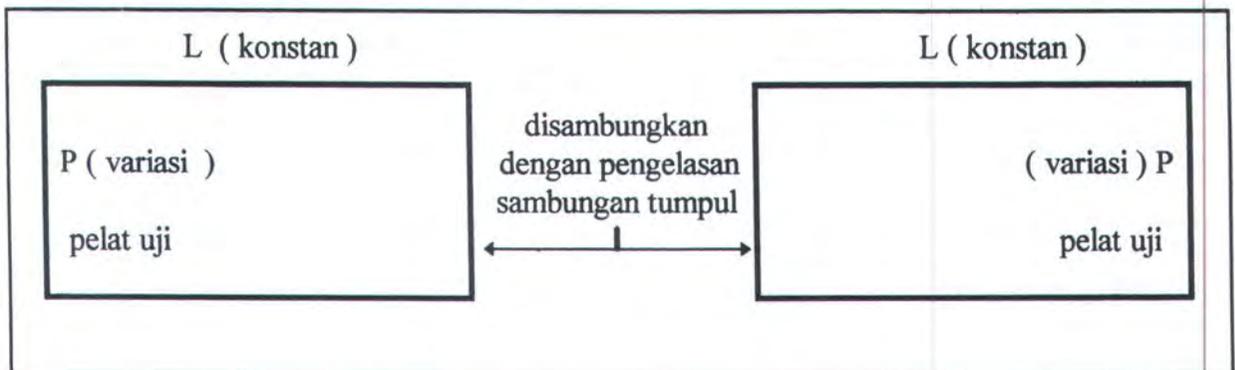
Masing-masing dimensi tersebut membutuhkan 2 buah pelat dengan ukuran yang sama. Mengingat di sini akan dilakukan pengujian dengan pengelasan untuk menghubungkan kedua buah pelat tersebut dalam sambungan tumpul ( butt joint), seperti yang terlihat dalam gambar 4.1. )

c). Variasi pengujian :

-Panjang/ base metal ( P ) : 200, 250, 300, 350 ( mm ) dengan ukuran lebar ( L ) tetap ( 200 mm).

- Ketebalan pelat/ base metal ( T ) : 7, 10, 12, 15 ( mm ).

Jadi masing-masing variasi lebar memiliki empat variasi ketebalan. Jumlah kebutuhan pelat menjadi 2 ( 1 pasang ) x 4 ( variasi panjang ) x 4 ( variasi tebal ), atau keseluruhannya menjadi 32 buah pelat uji.



**Gambar 4.9.. MODEL SAMBUNGAN ANTARDIMENSI PELAT**

Selanjutnya untuk proses pemotongan hingga pengelasan memiliki prosedur yang sama dengan apa yang telah diuraikan pada item 4.2.1, 4.2.2., 4.2.3.

4.3.2. lihat 4.2.2.

4.3.3. lihat 4.2.3.

#### 4.4. PENGUKURAN DIMENSI DAN DEFORMASI

Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui dimensi dan bentuk geometris deformasi dari permukaan pelat akibat proses laku panas pengelasan sehingga dapat diprediksikan besar sudut deformasinya. Bentuk geometris deformasi yang terjadi akan bervariasi mengikuti pola variasi yang telah dipakai dalam pengelasan. Indikasi ini akan membawa pada hubungan antara variabel satu dengan yang lain.

##### 4.4.1. Spesimen Pengukuran

Spesimen pengukuran yang dipakai sama dengan bentuk yang telah dibuat pada item 4.2.2.( gambar 4.3.). Pengukuran pada spesimen dilakukan hanya pada satu permukaan pelat yang telah ditandai saja dan dianggap sebagai suatu kesatuan bentuk geometri spesimen uji hasil pengelasan. Tanda yang dimaksudkan untuk pengukuran adalah pada titik-titik simpul yang telah berupa lubang-lubang noktah kecil. Gambar 4.10. menerangkan skema penampang spesimen yang telah terdeformasi.. Perubahan garis netral aksis dari kedudukannya yang sejajar dengan meja perata menjadi garis yang membentuk sudut  $\beta$  terhadap garis yang sejajar dengan meja perata.

Spesimen untuk pengukuran berjumlah 32 pasang dari 64 pelat uji dengan perincian sebagai berikut :

- 1). 16 pasang spesimen uji ( 32 pelat uji ) dari hasil pengujian pengelasan item 4.2.
- 2). 16 pasang spesimen uji ( 32 pelat uji ) dari hasil pengujian pengelasan item 4.3.

#### 4.4.2. Alat - Alat Pengukuran

Kelengkapan alat yang diperlukan dalam kegiatan ini adalah :

- 1). Meja perata : 1000 x 1000 mm.
- 2). *Dial gauge* : KANETSU, MB-BV, Mitutoyo, 0.01 - 10 mm, shock proof no. 2046-08
- 3). Klem penjepit
- 4). Mistar pelat : 300 mm , 500 mm
- 5). Kapur/ spidol / crayon.

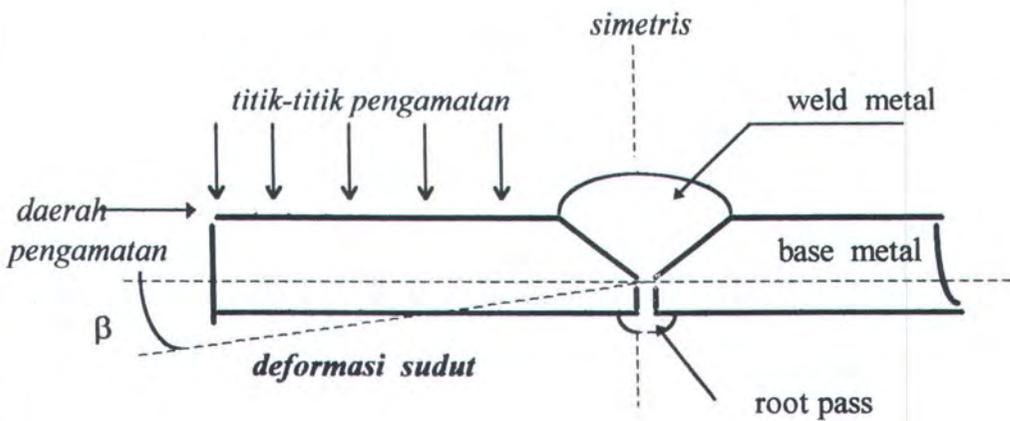
#### 4.4.3. Prosedur Pengukuran Dimensi dan Deformasi

Langkah -langkah pelaksanaan pengukuran dimensi dan deformasi dapat disusun dengan urutan sebagai berikut :

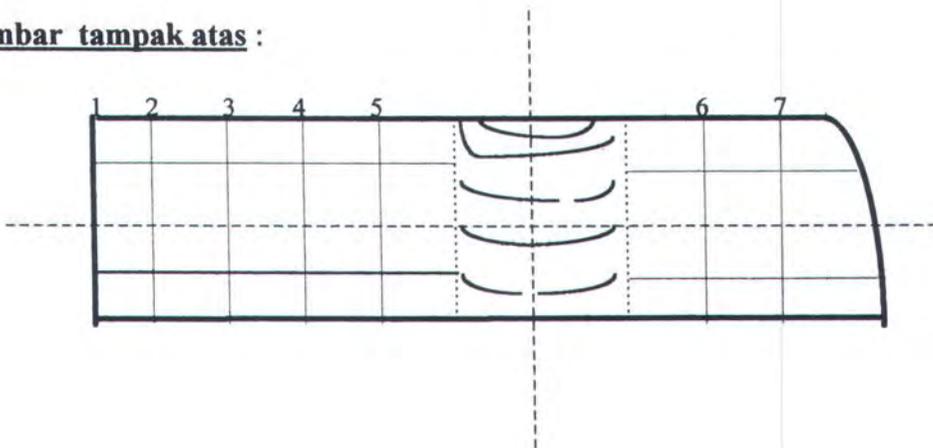
1. Pemeriksaan bentuk fisik spesiemen uji.
2. Membersihkan sisi-sisi material uji dari segala bentuk kotoran termasuk *kerf* agar tidak mempengaruhi hasil pengukuran.
3. Mengukur dimensi material yang baru dan mencatat hasil pengukurannya.
4. Membersihkan meja perata dan dijaga agar selalu tetap dalam kondisi bersih dan rata selama pengukuran berlangsung.
5. Menandai titik-titik pengukuran deformasi pada spesiemen uji dengan nomor urut searah garis horisontal sepanjang spesiemen ( lihat gambar 4.10 ). Titik paling kiri dari spesiemen untuk tiap garis horisontal dimulai dengan nomor 1 ( satu) dan seterusnya.

6. Spesimen diletakkan di atas meja pengukuran kemudian diklem/ dijepit pada bagian yang berdekatan dengan titik acuan pengukuran deformasi ( nomor 1 ), seperti pada gambar 4.11.

**Gambar tampak depan :**

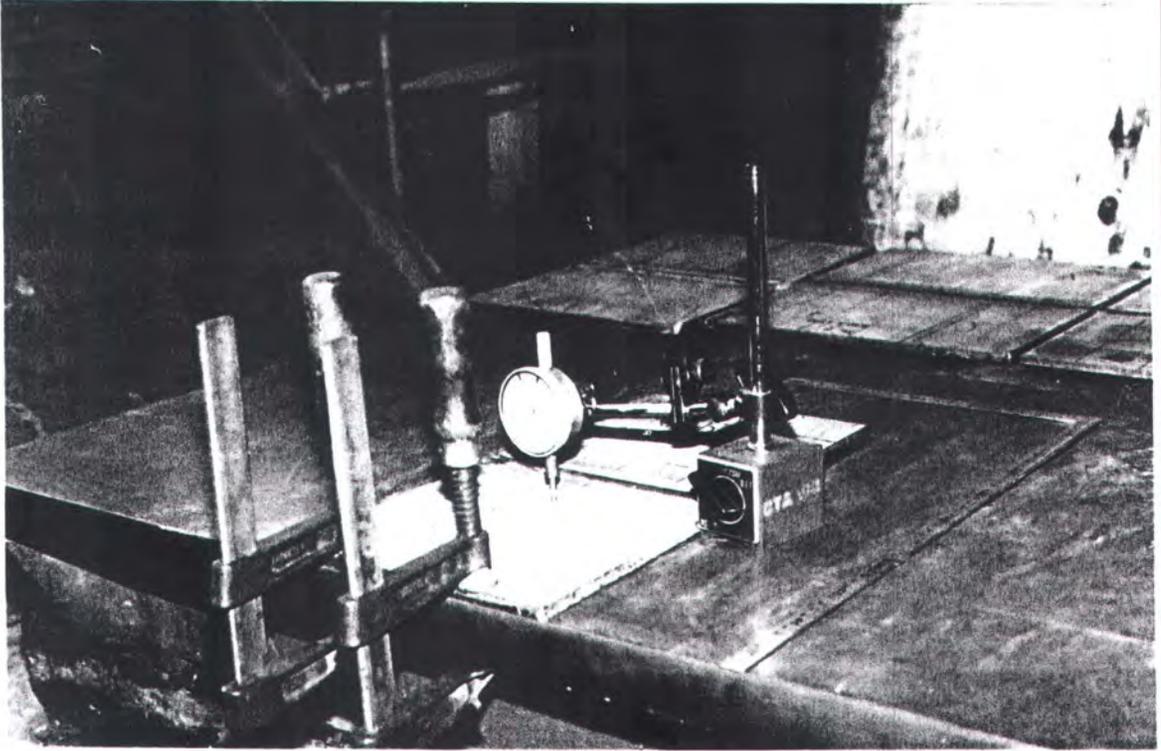


**Gambar tampak atas :**



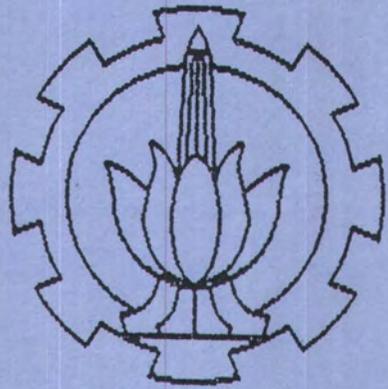
**gambar 4.10.**

**SKEMA PENAMPANG SPESIMEN UNTUK PENGUKURAN DEFORMASI**



**gambar 4.11. SPESIMEN UJI YANG DIKLEM/ DIJEPIT PADA MEJA PERATA.**

7. Melakukan penyetelan pada *dial gauge* dengan melihat kedudukan jarum meteran harus selalu dimulai dari penunjukkan angka nol pada pengukuran titik pengamatan bernomor satu ( titik acuan antara kedudukan tiap-tiap nomor titik pada permukaan spesimen terhadap kedudukan kerataan meja perata ).
8. Pengukuran dimulai dari titik nomor satu dan dilanjutkan ke titik berikutnya secara berurutan, selanjutnya hasil pengukuran dapat ditunjukkan dari berubahnya kedudukan putaran jarum meteran.



*BAB* **V**

## BAB V

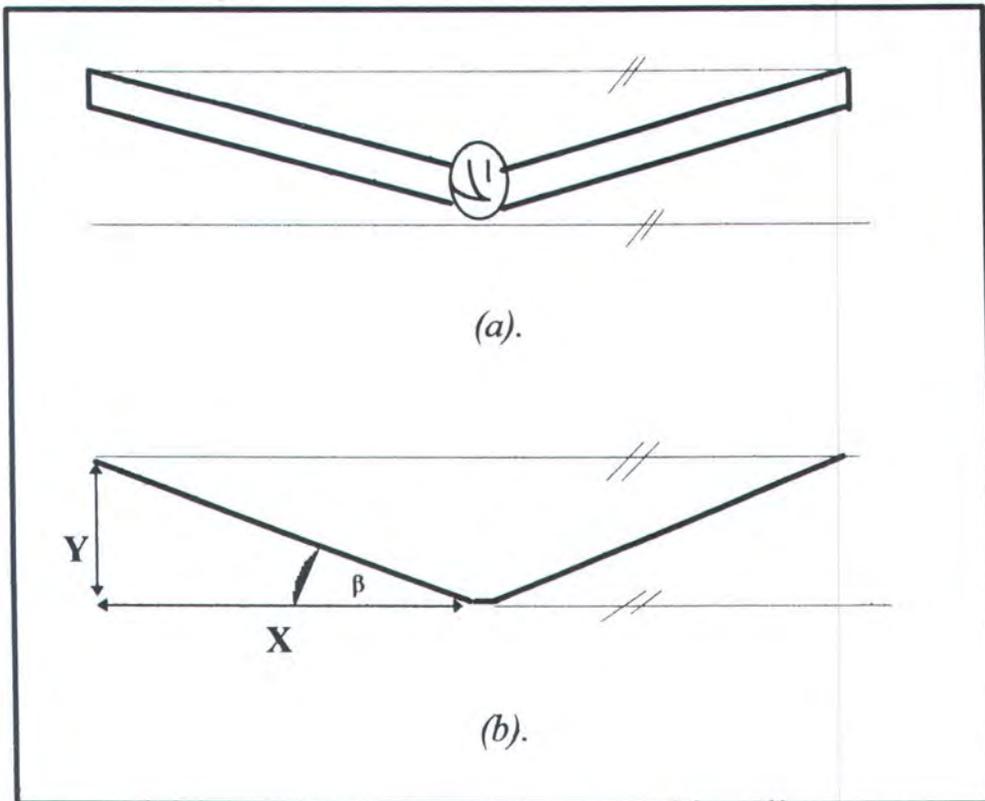
### HASIL PENGUJIAN DAN PERHITUNGAN

#### 5.1. HASIL PENGUJIAN

Hasil-hasil pengujian yang diperoleh dari kegiatan pengelasan, dibuat ke dalam suatu formulasi tabel dan gambar. Dari kuantitas angka yang terdapat di dalam tabel ( lihat tabel 5.1. dan 5.2.), untuk masing-masing spesimen menurut klasifikasi pengujian dituangkan menjadi suatu gambar yang menerangkan bentuk deformasi permukaan spesimen. Bentuk ini diasumsikan mewakili bentuk deformasi pelat seutuhnya, dilengkapi dengan dimensi menurut arah sumbu X dan Y ( lihat gambar 5.1. ). Garis bantu horisontal yang menghubungkan kedua titik ujung spesimen dipakai sebagai acuan terhadap besar sudut deformasi yang terbentuk (  $\beta$  ). Nilai sudut untuk tiap-tiap spesimen diwakili oleh satu nilai yang terbesar dari kedua nilai sudut ujung spesimen.

Metode yang dipakai untuk menghitung besar sudut  $\beta$  adalah dengan dasar perhitungan geometri sudut suatu bangun,  $\text{arc tgn } Y/X$ . Di mana Y ( lihat gambar 5.1.) adalah jarak vertikal ( notasi untuk metode :  $f_{\beta}$  ) bentuk kelengkungan deformasi di titik ujung spesimen terhadap garis horisontal yang sejajar dengan meja perata, sedangkan nilai X adalah setengah jarak lebar antar kedua ujung spesimen yang saling tegak lurus dengan arah alur pengelasan. Bentuk 3-D geometri pelat yang telah terdeformasi, diambil contoh pada hasil pengujian pengelasan pelat 350 x 200 x 15 yang dapat dilihat pada gambar 5.2.

Selanjutnya nilai-nilai sudut deformasi  $\beta$  dari pengukuran disusun dalam tabel sesuai variasi spesimen.( lihat tabel 5.1. dan 5.2. ).



**gambar 5.1.**

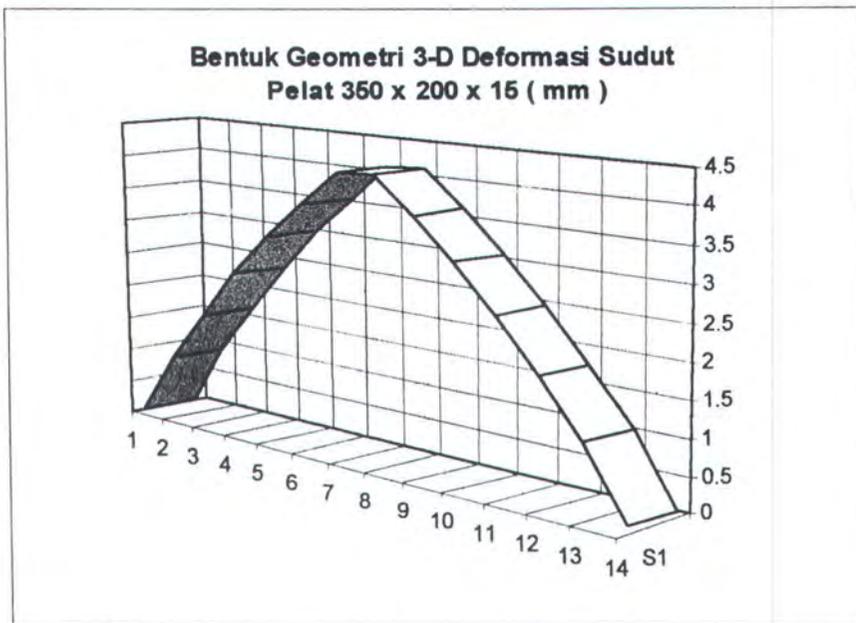
*(a) BENTUK DEFORMASI SPESIMEN , (b) SUDUT  $\beta$  DEFORMASI.*

#### **5.1.1. Hasil Pengujian Pengelasan dengan Variabel Lebar Pelat ( L )**

- Tabel data pengukuran deformasi dan dimensi spesimen ( lihat lampiran B ).
- Gambar bentuk permukaan deformasi pelat terhadap meja perata ( lihat lampiran C ).
- Tabel sudut deformasi  $\beta$  ( pengukuran ).

#### **5.1.2. Hasil Pengujian Pengelasan dengan Variabel Panjang Pelat ( P )**

- Tabel data pengukuran deformasi dan dimensi spesimen ( lihat lampiran D ).
- Gambar bentuk permukaan deformasi pelat terhadap meja perata ( lihat lampiran E ).
- Tabel sudut deformasi  $\beta$  ( pengukuran ).



**gambar 5.2. BENTUK GEOMETRI 3-D DEFORMASI SUDUT PELAT 350 x 200 x 15**

Dimensi Spesimen ( mm )	Sudut $\beta$ ( $^{\circ}$ )	Dimensi Spesimen ( mm )	Sudut $\beta$ ( $^{\circ}$ )	Dimensi Spesimen ( mm )	Sudut $\beta$ ( $^{\circ}$ )	Dimensi Spesimen ( mm )	Sudut $\beta$ ( $^{\circ}$ )
200x200x7	0.488	200x200x10	0.412	200x200x12	0.309	200x200x15	0.176
250x200x7	0.433	250x200x10	0.625	250x200x12	0.279	250x200x15	0.138
300x200x7	0.206	300x200x10	0.529	300x200x12	0.178	300x200x15	0.110
350x200x7	0.403	350x200x10	0.671	350x200x12	0.327	350x200x15	0.105

**tabel 5.1. HASIL PENGUJIAN UNTUK VARIASI LEBAR PELAT ( L )**

## 5.2. HASIL PERHITUNGAN

Hasil perhitungan berikut berdasar penggunaan metode pendekatan *Soviet Technique* untuk memperoleh nilai deformasi sudut  $\beta$  dengan cara pendekatan perhitungan semi-empiris. Semua persamaan , gambar, dan tabel diambil dari hasil metode ( bab III )

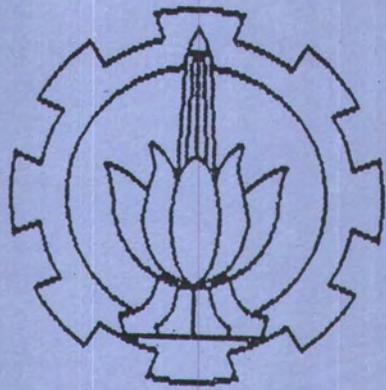
sedang nilai data-data variabel didapat dari referensi untuk tiap spesifikasi yang dimaksud. Tabel 5.3 adalah contoh hasil perhitungan untuk pelat dengan ketebalan 7 mm. ( lihat Lampiran J ).

Dimensi Spesimen ( mm )	Sudut $\beta$ ( ° )	Dimensi Spesimen ( mm )	Sudut $\beta$ ( ° )	Dimensi Spesimen ( mm )	Sudut $\beta$ ( ° )	Dimensi Spesimen ( mm )	Sudut $\beta$ ( ° )
200x200x7	0.313	200x200x10	0.344	200x200x12	0.143	200x200x15	0.082
200x250x7	0.208	200x250x10	0.201	200x250x12	0.191	200x250x15	0.092
200x300x7	0.102	200x300x10	0.420	200x300x12	0.174	200x300x15	0.070
200x350x7	0.131	200x350x10	0.136	200x350x12	0.164	200x350x15	0.140

tabel 5.2. HASIL PENGUJIAN UNTUK VARIASI PANJANG PELAT ( P )

DATA VARIABEL		PERHITUNGAN	
1) $t_p = 7$	mm	1) $q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V} =$	8300,000
2) $d_c = 4$	mm	2) $K_r =$	0,250
3) $l = 450$	A	$q_p' = (1 - K_r)q_p =$	6230,000
4) $U = 35$	v	$\frac{q_p'}{t^2} =$	0,000
5) $V = 1,267$	cm/s	3) $l/d_c =$	198,000
6) $\alpha = 11,7 \times 10^{-6}$	1/°C	$\psi_0 =$	0,560
7) $C = 0,167$	cal/g °C	4) $\epsilon = \frac{q_p' V^2}{C \gamma T_0 a_0^2} =$	1270,000
8) $\gamma = 7,859$	g/cm <sup>3</sup>	$\eta_0 =$	
9) $a_0 = 71 \times 10^{-3}$		5) $P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1} =$	410,000
10) $T_0 = 725$	°C	$p = \frac{1450}{C \gamma T_m} =$	0,718
11) $a_0 = 0,068$	cm <sup>2</sup> /s	$K_r =$	0,720
12) $p = 1$		6) $q_p' = (1 - K_r K_r)q_p =$	6800,000
13) $\eta = 0,85$		7) $s = 100 \frac{q_p'}{C \gamma \epsilon_s} =$	1,000
14) $T_m = 1539$	°C	8) $S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1} =$	450,000
		9) $\beta =$	0,0036
		sudut deformasi ( $\beta$ ) =	0.0036 radian.

tabel 5.3. HASIL PERHITUNGAN SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL PELAT 7 mm



*BAB*

**VI**

## **BAB VI**

### **ANALISA HASIL PENGUJIAN DAN PERHITUNGAN**

#### **6.1. UMUM**

Pengujian pengelasan pada pelat SS-41 dengan jenis sambungan tumpul untuk variasi lebar, panjang, dan tebal pelat memberikan hasil yang dianggap dapat mewakili perilaku pelat terhadap besar sudut deformasi yang terjadi. Data-data hasil perhitungan dengan metode pendekatan dianalisa dan dihitung tingkat keakurasiannya dengan cara membandingkan data dari hasil pengujian sebagai suatu angka kuantitatif yang sebenarnya untuk tiap-tiap batasan variasi.

Penganalisaan dilakukan dari gambar grafik dan data tabel hasil pengolahan data dengan mengamati nilai angka-angka yang bervariasi dan kecenderungan gambar grafik terhadap sudut deformasi yang terjadi. Penekanan tingkat deformasi dalam bahasan analisa ini lebih pada nilai substansi sudut deformasi pelat material dan korelasi faktor-faktor yang mempengaruhi.

Pada bagian akhir dari bab ini akan disajikan suatu kesimpulan terhadap efektivitas penggunaan metode dalam mengestimasi tingkat deformasi pelat hasil pengelasan.

#### **6.2. AKURASI METODE TERHADAP PENGARUH LEBAR PENGELASAN**

Dari hasil pengujian pengukuran sudut deformasi untuk 25% penambahan lebar pelat pengelasan ( 200 , 250 , 300 , 350 mm) masing-masing dengan empat variasi ketebalan ( 7 , 10 , 12 , 15 mm), diperoleh data bahwa [ lihat lampiran G dan L ]:

1. Pelat dengan tebal 7 mm : pertambahan lebar pelat pengelasan menyebabkan kecenderungan berkurangnya nilai sudut deformasi hingga mencapai 10,27 %.
2. Pelat dengan tebal 10 mm : pertambahan lebar pelat pengelasan menyebabkan kecenderungan bertambahnya nilai sudut deformasi hingga mencapai 13,39 %.
3. Pelat dengan tebal 12 mm : pertambahan lebar pelat pengelasan menyebabkan kecenderungan berkurangnya nilai sudut deformasi hingga mencapai 1,98 %.
4. Pelat dengan tebal 15 mm : pertambahan lebar pelat pengelasan menyebabkan kecenderungan berkurangnya nilai sudut deformasi hingga mencapai 18,21 %.

Kecenderungan nilai sudut deformasi pada tebal pelat 10 mm yang bertambah disebabkan oleh faktor-faktor kondisi pengelasan, perubahan sudut selama siklus termal ( pemanasan dan pendinginan ), ketidakrataan permukaan pelat setelah proses potong , dan faktor kemungkinan ketidaktepatan dalam pengukuran.

Namun secara keseluruhan dapat dinyatakan bahwa penambahan lebar pelat pengelasan akan mengurangi sudut deformasi . Hal ini seperti dijelaskan pada bab sebelumnya melalui mekanisme perambatan panas ( konduktivitas panas,  $\lambda$  ) dari daerah alur pengelasan hingga ke tepi sisi pelat. Efek panas yang ditimbulkan oleh proses pengelasan dengan indikasi meleburnya logam pelat sepanjang alur pengelasan merupakan penyebab deformasi. Efek ini merambat sesuai dengan karakter konduktivitas termal sehingga besar jarak antara alur pengelasan dengan bentangan sisi lebar pelat menyebabkan efek panas ini menjadi berkurang sebab distribusi panas dari daerah pengelasan juga menjadi berkurang berkisar antara 1600 °C pada daerah leburan las ( *molten metal* ) dan 100 °C pada sumbu netral aksis pelat sisi terluar. Berkurangnya efek panas antara tiap-tiap titik yang dilalui menyebabkan tingkat deformasi menjadi berkurang pula. dengan berat jenis logam yang homogen sepanjang lebar pelat menyebabkan deformasi pada daerah di dekat alur

pengelasan tidak mampu membentuk simpangan sudut  $\beta$  yang maksimum ( penahanan logam yang kuat dari logam yang tebal ), karena gaya berat ujung sisi pelat melawan arah gaya deformasi.

Jawaban metode pendekatan terhadap pengaruh variabel pengelasan di atas tidak berupa hasil sudut deformasi melainkan berupa tinggi deformasi maksimum  $f_{\beta}$  menurut persamaan 1 ( bab III ), sebab keluaran hasil sudut  $\beta$  tidak dipengaruhi oleh data masukan variasi lebar, melainkan oleh variabel tebal pelat  $t_p$ . Dari tabel 6.1 disajikan hubungan tinggi deformasi maksimum hasil perhitungan dan pengukuran beserta tingkat akurasi penyelesaian metode [ lihat lampiran K ].

Tebal Pelat $t$ ( mm )	Dimensi Pelat $L \times P \times t$ ( mm )	Sudut Deformasi $B$ ( radian )	Lebar Pelat ( L ) $b$ ( mm )	Maksimum Tinggi Deformasi $fB = Bb/8$ ( metode ); ( mm )	Maksimum Tinggi Deformasi $fB$ ( ukur ); ( mm )	Tingkat Akurasi Metode ( % )
7	200x200x7	0.0078979	200	0.1974475	1.563	12.632598
	250x200x7	0.007897884	250	0.246808873	1.889	13.065584
	300x200x7	0.007897884	300	0.296170648	1.077	27.499596
	350x200x7	0.007897884	350	0.345532423	2.462	14.034623
10	200x200x10	0.004849929	200	0.121248226	1.438	8.4317265
	250x200x10	0.004849929	250	0.151560283	2.727	5.5577662
	300x200x10	0.004849929	300	0.18187234	2.77	6.5657884
	350x200x10	0.004849929	350	0.212184396	4.1	5.1752292
12	200x200x12	0.004067849	200	0.101696219	1.077	9.4425458
	250x200x12	0.004067849	250	0.127120273	1.219	10.428242
	300x200x12	0.004067849	300	0.152544328	0.933	16.349874
	350x200x12	0.004067849	350	0.177968383	2	8.8984191
15	200x200x15	0.00266389	200	0.066597251	0.615	10.828821
	250x200x15	0.00266389	250	0.083246564	0.6	13.874427
	300x200x15	0.00266389	300	0.099895876	0.575	17.373196
	350x200x15	0.00266389	350	0.116545189	0.64	18.210186

**tabel 6.1.**

*TABEL HUBUNGAN HARGA  $f_{\beta}$  HASIL PERHITUNGAN DAN PENGUKURAN*

Tingkat akurasi metode sangat kecil dari hasil data tabel di atas. Persamaan  $f_{\beta} = \beta \cdot b / 8$  terlalu lemah untuk dapat memiliki nilai  $f_{\beta}$  yang sama dengan  $f_{\beta}$  pengujian. Nilai  $\beta$  untuk 4 variabel lebar pelat dalam 1 jenis ketebalan adalah tetap, sedangkan nilai  $\beta$  pengujian masing-masing memiliki nilai untuk tiap variabel lebar. Untuk penambahan 25% lebar pelat (200, 250, 300, 350 mm), prosentase tingkat akurasi metode rata-rata [ lihat tabel 6.1 ]:

1. Untuk tebal 7 mm adalah 16.809 %
2. Untuk tebal 10 mm adalah 6.433 %
3. Untuk tebal 12 mm adalah 11.280 %
4. Untuk tebal 15 mm adalah 15.072 %

Dengan total akurasi rata-rata mencapai 12.399 % tingkat akurasi.

### 6.3. AKURASI METODE TERHADAP PENGARUH PANJANG PELAT PENGELASAN

Selanjutnya berdasarkan hasil data pengukuran sudut deformasi untuk 25 % penambahan panjang pelat atau juga sama dengan jumlah penambahan panjang pengelasan (200, 250, 300, 350 mm) masing-masing dengan 4 variasi ketebalan (7, 10, 12, 15 mm) diperoleh data bahwa [ lihat lampiran H dan L ]:

1. Pelat dengan tebal 7 mm : perpanjangan alur pengelasan menyebabkan kecenderungan penurunan sudut deformasi hingga 15,44 %.
2. Pelat dengan tebal 10 mm : perpanjangan alur pengelasan menyebabkan kecenderungan penurunan sudut deformasi hingga 2,2 %.
3. Pelat dengan tebal 12 mm : perpanjangan alur pengelasan menyebabkan kecenderungan bertambahnya sudut deformasi hingga 27,8 %.

4. Pelat dengan tebal 15 mm : perpanjangan alur pengelasan menyebabkan kecenderungan bertambahnya sudut deformasi hingga 61,12 %.

Nilai sudut deformasi untuk pelat 7 mm dan 10 mm cenderung menurun, sedang untuk pelat dengan tebal 12 mm, dan 15 mm menunjukkan adanya pertambahan nilai sudut. Fenomena tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut, perubahan sudut akan mencapai harga tertinggi pada suatu harga  $I/h(vh)$  ( $I$  = arus las,  $h$  = tebal pelat, dan  $v$  = kecepatan pengelasan) di tengah-tengah dari sumbu pelat. Harga tertinggi ini pada dasarnya tidak dipengaruhi oleh ukuran elektrode tetapi harga  $I/h(vh)$  untuk perubahan sudut tertinggi menjadi lebih besar dengan bertambah besarnya diameter elektrode. Tetapi karena diameter elektrode yang digunakan dalam pengujian tetap ( $\varnothing = 4$  mm) maka variabel diameter elektrode tidak dimasukkan sebagai suatu peubah. Menurut harga dari spesifikasi prosedur pengelasan diketahui bahwa semakin tebal pelat maka nilai  $I$  akan bertambah diikuti dengan  $v$  yang semakin kecil, akibatnya perubahan sudut yang terjadi menjadi semakin besar.

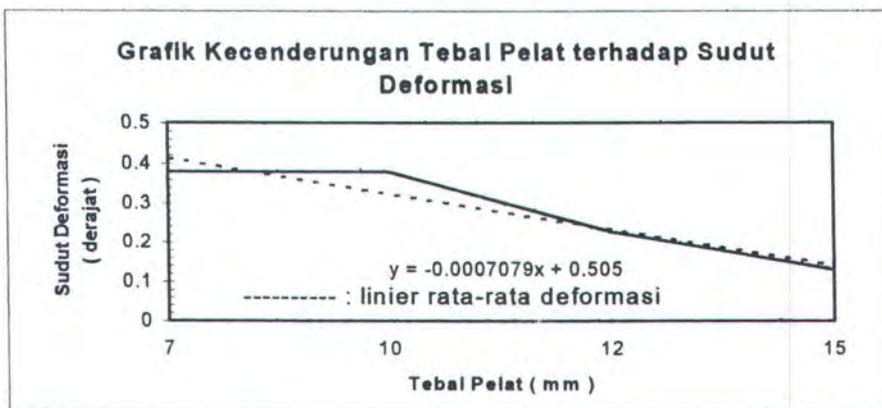
Jadi kaitan yang ada di sini adalah masukan intensitas masukan panas (*heat input*) pada kondisi pengelasan. Panjang pengelasan yang bertambah dengan lebar pelat yang konstan menyebabkan intensitas (*heat intensity*,  $P$ ) dan energi density ( $\theta = E/Al$ ) pada area permukaan pelat menjadi semakin tinggi, linier terhadap deformasi.

Sebagai bagian akhir dari sub bab ini adalah membahas tingkat keakurasian dari metode pendekatan dalam menyelesaikan kasus di atas. Namun, hal ini tidak dapat diselesaikan atau dihitung karena metode pendekatan yang dipakai hanya dipengaruhi oleh 2 variabel masukan data yang dapat dibandingkan (*input variabel*) yaitu  $b$  untuk lebar pelat pada perhitungan  $f_{\beta}$  dan  $t_p$  pada perhitungan sudut  $\beta$  deformasi (bab III), sedangkan fungsi  $l$  untuk panjang pelat/ pengelasan tidak mempengaruhi hasil  $\beta$  metode.

#### 6.4. ANALISA METODE TERHADAP PENGARUH TEBAL PELAT PENGELASAN

Seperti langkah pada sebab sebelumnya, hasil pengukuran sudut deformasi untuk 4 variasi ketebalan T pelat ( 7 , 10 , 12 , 15 mm ) dengan ukuran dengan ukuran dimensi panjang dan lebar konstan : 200 x 200 x T, diperoleh data-data ( gambar 6.1.), seperti pada tampilan berikut :

Tebal Pelat (mm)	7	10	12	15
Sudut deformasi ( ° )	0.3805	0.378	0.226	0.129



**gambar 6.1.**

#### *HUBUNGAN TEBAL PELAT DENGAN SUDUT DEFORMASI*

Sehingga dapat dinyatakan bahwa pertambahan tebal pelat memberikan kecenderungan makin kecilnya nilai sudut deformasi hingga 29.21 % [ lihat lampiran L ].

Seperti diketahui bahwa perubahan sudut disebabkan karena adanya perbedaaan temperatur antara permukaan yang dilas dan permukaan sebaliknya. Bila pelat yang dilas tipis, perubahan sudut yang terjadi juga kecil. Perubahan sudut ini menjadi lebih besar bila pelat yang dilas makin tebal, tetapi sampai pada suatu batas ketebalan tertentu perubahan sudutnya menurun dengan makin tebalnya pelat. Hal ini disebabkan oleh penahanan yang kuat dari logam tebal.

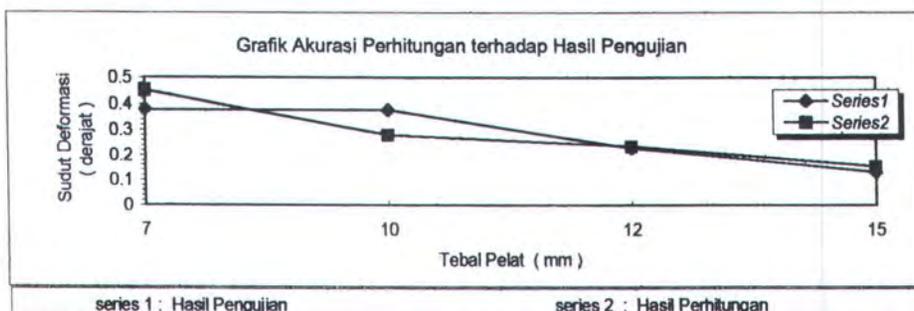
Selanjutnya untuk memastikan tingkat keakurasian metode terhadap hasil pengujian dilakukan analisa hubungan sudut deformasi yang terbentuk dengan pengaruh variasi tebal.

Tabel 6.2. menampilkan data-data keduanya beserta prosentase keakurasian metode.

Tebal Pelat $t$ ( mm )	Sudut Deformasi Pengujian $B$ ( derajat )	Sudut Deformasi Perhitungan $B$ ( derajat )	Akurasi Metode ( % )
7	0.3805	0.452333351	81.13
10	0.378	0.277738663	73.492
12	0.226	0.232976791	96.902
15	0.129	0.152568247	81.705

**tabel 6.2**  
**TABEL AKURASI METODE TERHADAP VARIABEL TEBAL PELAT**

Berdasar tabel di atas rata-rata keakurasian metode terhadap hasil pengujian mencapai 83,75 % tingkat kebenaran. Hubungan ini dapat dituangkan ke dalam bentuk gambar grafik 6.2 berikut :



**gambar 6.2.**  
**KECENDERUNGAN AKURASI METODE TERHADAP HASIL PENGUJIAN UNTUK TEBAL PELAT**

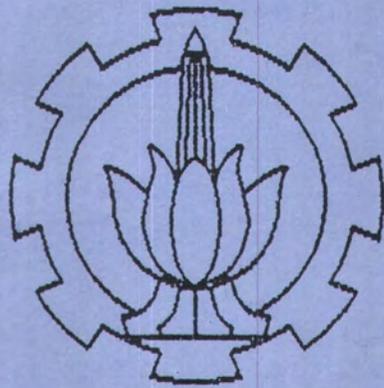
## 6.5. KESIMPULAN PENGGUNAAN METODE

Kesimpulan berikut ini dilakukan berdasarkan pertimbangan aspek penggunaan dengan resiko kesalahan dan tingkat keakurasian yang dimiliki oleh metode setelah diuji banding dengan data-data sebenarnya/ riel di lapangan pengujian. Kesimpulan ini diambil dari data-data untuk 4 variasi lebar pelat ( 200, 250, 300, 350 mm ), 4 variasi panjang pelat ( 200, 250, 300, 350 mm ) dan 4 variasi tebal pelat ( 7, 10, 12, 15 mm ) dengan asumsi-asumsi pengelasan yang dibahas di muka.

Kesimpulan yang akan diambil berdasar pada :

- Hasil pengujian tingkat keakurasian antara rata-rata metode untuk variabel lebar pelat dengan rata-rata tinggi deformasi maksimum  $f_{\beta}$  hasil pengukuran adalah 12,933 %.
- Hasil pengujian tingkat keakurasian rata-rata metode untuk variabel panjang pelat tidak ada.
- Hasil pengujian tingkat keakurasian rata-rata metode untuk variabel tebal pelat terhadap nilai rata-rata sudut deformasi  $\beta$  hasil pengukuran adalah 83,75 %.

Maka hipotesa yang dapat ditarik adalah bahwa, metode pendekatan *Soviet Technique* yang dipakai untuk mengestimasi tingkat deformasi suatu pelat pengelasan, akan mendekati nilai yang sebenarnya bila kegiatan ditekankan pada perhitungan/ penentuan sudut deformasi  $\beta$  dengan variabel tebal terhadap fungsi panjang dan lebar pelat yang tetap.



*B.A.B*

**VII**

## **BAB VII**

### **PEMBAHASAN MASALAH**

#### **7.1. UMUM**

Setelah melakukan serangkaian analisa terhadap hasil pengujian dengan hasil perhitungan metode pendekatan, berikutnya dilanjutkan dengan pembahasan masalah dari hasil analisa itu sendiri yang dijumpai dalam kegiatan, baik itu pengujian, perhitungan, hingga penganalisaan penulisan. Tujuan dari bab ini adalah untuk dapat menyajikan jawaban atas permasalahan tersebut di atas, dan pada akhir bab akan diakhiri dengan uraian mengenai hambatan-hambatan selama dalam penulisan .

#### **7.2.HUBUNGAN PENGUJIAN DENGAN PEMBUKTIAN PERHITUNGAN HASIL METODE**

Pada bab sebelumnya telah diuraikan bahwa untuk membuktikan hasil perhitungan diperlukan data-data pembanding. Data-data ini adalah data-data hasil pengujian yang selain dipakai untuk mengetahui korelasi antarvariasi terhadap pengaruh besar kecilnya sudut deformasi yang terbentuk juga diasumsikan sebagai suatu nilai acuan atau nilai yang sebenarnya/ riel. Sedangkan data hasil perhitungan sebagai nilai yang akan dibandingkan kemudian. Pemilihan terhadap variasi pengujian pengelasan dibatasi untuk masing-masing 4 variasi : panjang, lebar, dan tebal pelat. Penambahan variasi setiap 25 % panjang dan lebar pelat didasarkan pada nilai perubahan variasi minimum yang dapat dilihat. Nilai pertambahan dimulai dari 200 mm, hal ini disesuaikan dengan persyaratan dimensi minimum standar JIS untuk spesimen uji. Selanjutnya terhadap pemilihan 4 variasi ketebalan

didasarkan pada dimensi tebal pelat yang umum digunakan dalam industri dan dianggap mewakili range pelat berukuran tipis hingga tebal.

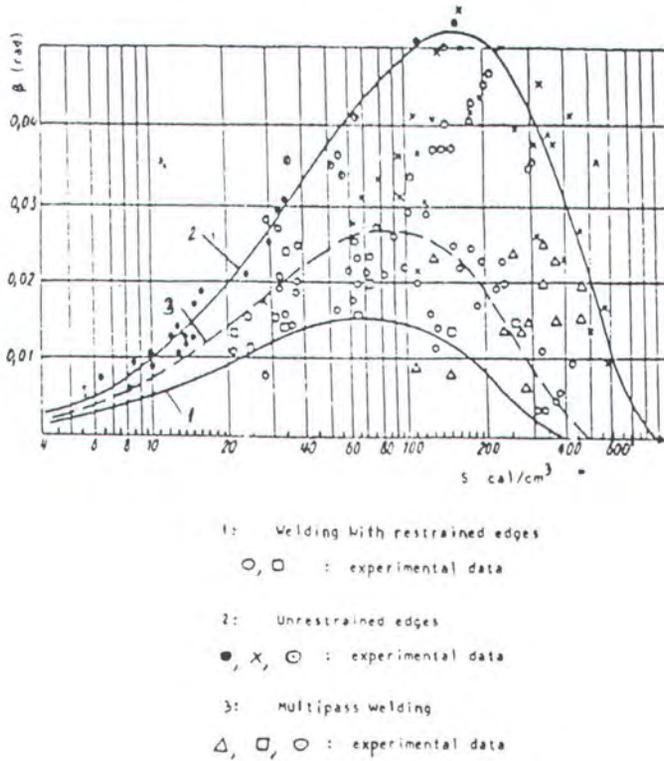
Dengan demikian dapat diamati fluktuasi hasil perhitungan dengan metode bila dikenai masukan data yang bervariasi. Tujuannya adalah untuk menguji apakah metode pendekatan tersebut cukup fleksibel untuk berbagai batasan keadaan dimensi pelat. Namun ternyata, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, tingkat penggunaan metode terbatas. Dan hal ini telah diuji dengan dasar tingkat keakurasian antara nilai perhitungan terhadap nilai yang sebenarnya, yaitu hasil pengujian ( bab VI: tabel 6.1.dan tabel 6.2.). Tingkat keakurasian metode untuk tiap variasi masih harus diuji apakah diterima atau ditolak dengan acuan pendekatan statistik : *Koefisien Korelasi Spearman* ( lihat lampiran M ). Hasilnya, harga tingkat akurasi metode dengan variasi tebal yang diterima ( *accepted* ). Meskipun nilai akurasi diterima, tetapi indikasi ini menandakan bahwa metode pendekatan tersebut tidak fleksibel terhadap masukan data yang bervariasi. Terbukti pada antara nilai sudut deformasi untuk dimensi tebal yang konstan terhadap nilai dimensi panjang x lebar ,yang tetap maupun yang bervariasi, tidak menunjukkan adanya perbedaan. Padahal dengan melihat data hasil pengujian tidaklah demikian ( bab V: tabel 5.1. dan 5.2. ). Jadi, jelaslah bahwa prosedur perhitungan metode masih harus disempurnakan dan dikembangkan berdasar acuan masukan data yang bervariasi menurut data di lapangan.

### 7.3.TINJAUAN ANALISIS TERHADAP PENGGUNAAN METODE

#### **PENDEKATAN *SOVIET TECHNIQUE***

Sesuai dengan tujuan penggunaan metode pada pembahasan bab III, yaitu bahwa dengan menggunakan metode pendekatan akan dapat mengetahui korelasi antara proses pengelasan dengan bentuk deformasi akhir ( Kuzminov, S.A., 1974 ), maka yang menjadi

pusat bahasan di sini adalah masalah proses pengelasan ( tegangan dan arus listrik mesin las, kecepatan pengelasan, diameter elektrode, jumlah pass ) sehingga seolah-olah dapat



**gambar 7.1. ANALISA HASIL EKSPERIMEN TERHADAP KURVA HASIL TEORI**

membantah kekurangan yang disampaikan pada subbab 7.2. Tetapi produk akhir berupa sudut deformasi  $\beta$  tidak dapat dilepaskan dari dimensi geometri pelat selain tebal pelat ( lihat kecenderungan perubahan sudut  $\beta$  dengan tebal pelat konstan terhadap variasi lebar dan panjang pelat uji : bab V, tabel 5.1. dan 5.2. ), meskipun dimensi tebal merupakan acuan di dalam menentukan variabel-variabel proses pengelasan. Data-data dimensi pelat berupa panjang dan lebar tidak dijadikan variabel di dalam perhitungan nilai sudut ( bab III: subbab 3.4. ).

Dalam hal penggunaan suatu metode, tentunya tingkat keakurasian dalam memberikan keluaran hasil dijadikan pedoman pemilihan penggunaan. Diketahui bahwa formula-formula di dalam metode diturunkan dari hasil kontrol eksperimen dan dari aplikasi *heat transfer* dan *strength of materials*. Asumsi bahwa metode dapat digunakan dalam skala yang luas menurut analisa grafis hasil eksperimen dengan titik-titik pengamatan yang besar seperti dalam gambar 7.1. Gambar ini menunjukkan adanya kecenderungan *trendline* titik-titik hasil eksperimen bentuk pada bentuk kurva yang sama dengan kecenderungan bentuk kurva secara pendekatan teori pada asumsi simpangan atau deviasi terkecil.

Pembuktian tersebut dianggap sebagai aplikasi keakurasian metode terhadap hasil eksperimen/ hasil riel. Bertitik tolak dari pernyataan ini, terbukti hasil akurasi ( bab VI : tabel 6.2. ) terhadap perhitungan sudut  $\beta$  dengan variasi tebal mendekati nilai riel ( 83,75 % ). Tetapi bagaimana halnya dengan keakurasian dari ( Howard M. Bunch , The University of Michigan ) : perhitungan dengan parameter lain (  $f\beta$ , misalnya ), variasi-variasi masukan data dan perlakuan proses, batasan-batasan dan toleransi yang diijinkan antara signifikansi hasil eksperimen dan hasil perhitungan. Dalam metode pendekatan, aspek-aspek masalah bahasan tersebut tidak dijelaskan. Sehingga bila metode ini dipakai di lapangan menurut aspek teknis di atas, maka tingkat keakurasiannya harus diuji.

Ada beberapa metode pendekatan lain yang dapat dipakai di dalam mengestimasi deformasi, seperti:

1. *Angular Distorsion Formula* ( dari : Lincoln Electric Company, *The Procedure Handbook of Arc welding*, 1973 ):

$$\text{Angular distorsion} = \frac{0.02 W \omega^{1.3}}{t^2} \quad (\text{in})$$

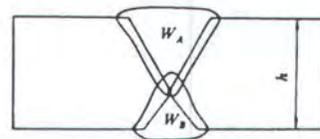
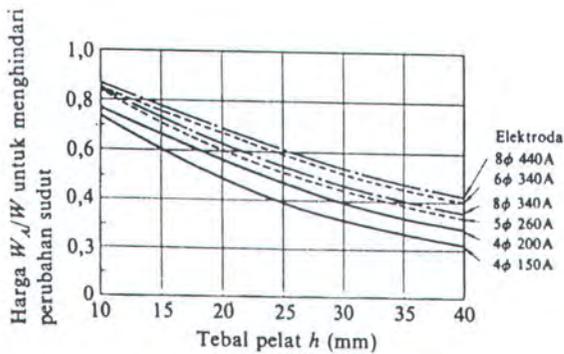
dimana  $w$  = lebar pelat,  $t$  = tebal pelat,  $\omega$  = tinggi kampuh las .

Metode ini lemah, karena proses panas pengelasan ditentukan hanya oleh tinggi kampuh las  $\omega$  dan tidak berpengaruh akibat variasi panjang pengelasan. Hasil yang diukur hanya tinggi distorsi angular.

2. Hubungan fungsi  $W_A / W$  dan tebal pelat ( dari : Wiryosumarto, H., Prof., Dr., Ir., Okumura, T., Prof., Dr., *Teknologi Pengelasan Logam*, 1991 )

di mana,  $W_A$  = berat logam las pada bagian belakang

$W$  = logam las seluruhnya



$W$  : Berat logam lasan seluruhnya  
 $W_A$  : Berat logam lasan pada bagian belakang.

**gambar 7.2. HUBUNGAN ANTARA  $W_A - W$  DAN TEBAL PELAT**

Dalam gambar di atas ditunjukkan hubungan antara  $W_A - W$  dan tebal pelat dalam usaha mengurangi perubahan sudut. Tetapi metode ini memiliki konsekuensi tingkat kesulitan yang tinggi di dalam pengisian variabel-variabelnya. Pengukuran berat logam las tidaklah mudah dan keakurasian hasil dilakukan dengan dicoba-coba (*trial and error*).

3. Formula Yamamoto ( dari : Kristanto, TND., *Studi tentang Pengurangan Distorsi Memanjang pada T - Joint dengan Pemanasan Awal*, Tugas Akhir, FTK, ITS, 1988 )

Digunakan untuk tipe sambungan sudut (*fillet joint*) dan tipe deformasi longitudinal/ memanjang.

Formula :

$$Y = \frac{M_0 \cdot L^2}{4 \cdot E \cdot I \cdot U^2} \left[ 1 - \frac{\cos(U - Kx)}{\cos U} \right]$$

di mana :  $U = (K \cdot L) / 2$

$$K = [(P_x \cdot C) / (E \cdot I)]$$

$P_x$  = shrinkage force

$$M_0 = -L_{NA} \cdot P_x$$

$I$  = momen inertia beam T.

$E$  = Modulus Young

$C$  = 2/3 untuk las fillet

$L$  = Panjang Beam

$L_{NA}$  < jarak NA ke sumbu las.

Penggunaan formula ini di luar batasan yang dipakai, yaitu untuk tipe sambungan pelat (*butt joint*) dan jenis deformasi (deformasi sudut/ angular) yang dipakai penulis. Jadi metode tersebut tidak dapat digunakan.

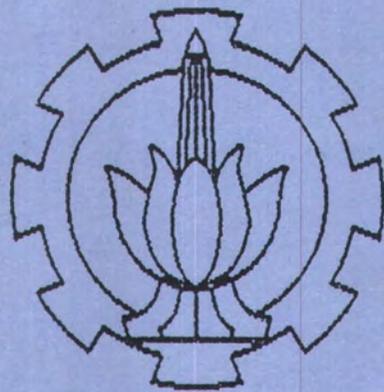
Dengan demikian setelah dianalogikan dengan ketiga metode di atas, penggunaan metode pendekatan *Soviet Technique* (Kuzminov, S.,A., 1974) diasumsikan paling tepat untuk dapat mewakili tujuan yang ingin dicapai.

#### 7.4. HAMBATAN - HAMBATAN PENULISAN

- Penulis mendapatkan kesulitan di dalam menemukan buku utama : Kuzminov, S.,A., *Welding deformation of Ship Hull Structures*, Sudostroniye, Leningrad,

1974, Russian, sebagai narasumber dari publikasi metode pendekatan *Soviet Technique* ini. Penulis hanya mendapatkan panduan intisari metode yang telah dilengkapi dari beberapa pakar, yaitu : V. Birman dan R. Lattore dari University of New Orleans, dan Howard M.Bunch dari The University of Michigan, di dalam : *Journal of Ship Production*, Vol.5, No.1, Feb. 1989, pp. 10 - 15.

- Keterbatasan persediaan pelat spesimen uji, menyebabkan 2 buah pelat masing-masing dengan dimensi 200x 300x 15 dan 200x 350x 15 yang mengalami kecacatan las *porosity* pada ujung kampuh lasnya, tetap digunakan sebagai spesimen uji ( asumsi kecacatan diabaikan )
- Nilai -nilai data sifat-sifat fisik material membutuhkan masukan yang sangat presisi sesuai dengan spesifikasi material ( *Mill Certificate* ), sehingga proses perhitungan dengan metode seringkali harus diulang dan diubah tergantung dari ketepatan sumber data.



*B.A.B*

**VIII**

## BAB VIII

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 8.1. Kesimpulan

Pengelasan busur redam otomatis penuh ( SAW ) dengan sambungan tumpul pada pelat SS-41 ( mild steel ) menyebabkan suatu perubahan bentuk pelat berupa sudut deformasi yang memiliki perilaku sebagai berikut :

- Sudut deformasi akan berkurang dengan makin lebarnya pelat .
- Sudut deformasi akan bertambah dengan makin panjangnya alur pengelasan sepanjang pelat.
- Sudut deformasi akan berkurang dengan makin tebalnya pelat.

Penggunaan metode pendekatan *Soviet Technique* di dalam mengestimasi tingkat deformasi akan mempunyai beberapa kecenderungan, yaitu :

- Mempunyai akurasi yang paling optimal untuk perhitungan sudut deformasi  $\beta$ .
- Fungsi peubah lebih banyak ditentukan oleh variasi masukan data dimensi material yang akan dilas, sedangkan masukan data sifat-sifat material dan data pengelasan mengikuti fungsi variasi.
- Kemungkinan untuk variasi masukan data dimensi material, selain variasi tebal terhadap hasil nilai sudut deformasi  $\beta$ , tidak memberikan hasil atau indikasi peubah tertentu.

- Selain sudut deformasi  $\beta$ , tingkat deformasi berupa tinggi deformasi maksimum  $f_p$  dapat diestimasi dengan variasi lebar pelat dan nilai sudut deformasi  $\beta$ . Namun, tingkat keakurasian yang dimiliki metode sangat rendah.
- Secara umum metode pendekatan ini dapat digunakan untuk mengestimasi sudut deformasi  $\beta$  pelat lasan dengan sambungan tumpul. Tujuan yang dapat dicapai adalah mengetahui bentuk korelasi antara proses pengelasan dengan produk deformasi akhir.

## 8.2. Saran

- Data - data dari jumlah variasi dimensi pelat yang digunakan masih terlalu kecil, oleh karena faktor keterbatasan, karena itu dimungkinkan adanya penambahan kuantitas guna mendapatkan kesimpulan data yang lebih teliti.
- Komputersasi pemrograman sistem perhitungan metode dapat menghasilkan sistem estimasi berbalik arah. Artinya, dengan menentukan nilai sudut deformasi terlebih dahulu maka nilai-nilai masukan data dapat dihitung atau diketahui kemudian.
- Metode dan jenis sambungan pengelasan yang berbeda dapat dijadikan alternatif variabel sebagai perbandingan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. ASM, **Metal Handbook : Metal Properties**, Volume I, ASM Publised, 1985.
2. Birman, V. ,Lattore, R. , **Soviet Technique for Estimating Post-Welded Deflection : Case of Butt Welding**, *Journal of Ship Production*, Vol. 5, No. I, pp. 10 - 15, Feb. 1989.
3. Brick, Robert, M., **Structure and Properties of Engineering Materials**, Mc. Graw - Hill , 1977.
4. Draper, N. , R. , Smith, H. , **Applied Regression Analysis**, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., 1981.
5. Eisenstadt, Melvin, M. , **Introduction to Mechanical Properties of Materials**, New York, 1971.
6. ESAB, **Welding Handbook 1984/ 1985**, ESAB, 1984.
7. Guy, G. , Albert, **Physical Metallurgy for Engineers**, Addison - Wesley Publishing Company Inc., 1963.
8. Holman, J. , P. , **Heat Transfer**, Fifth Edition, Mc. Graw - Hill Ltd., 1981.
9. Jensen, Alfred, **Applied Strength of Materials**, Fourth Edition, Mc. Graw - Hill Inc., 1983.
10. Kristanto, T. , N. , D. , **Studi tentang Pengurangan Distorsi Memanjang pada T - Joint dengan Pemanasan Awal**, Tugas Akhir, ITS, 1988.
11. Lincoln, Electric Company, The, **The Procedure Handbook of Arc Welding**, The Lincoln Electric Company, Cleveland, Ohio, 1973.

12. Masubuchi, K. , **Analysis of Welded Structure : Residual Stresses, Distortions and Their Consequences**, Pergamon Press, New York, 1980.
13. Putra, W. , H. ,P. , A. , **Studi Pengaruh Pemakaian Line Heating terhadap Kekuatan Mekanis Pelat Baja SS - 41 Produksi PT. Krakatau Steel yang Dipakai Di PT PAL Indonesia**, tugas Akhir, 1994.
14. Rollason, E. , C. , **Metallurgy for Engineers**, Fourth Edition, Edward Arnold Ltd., 1984.
15. Smallman, R. , E. , **Metalurgi Fisik Modern**, Edisi Keempat, PT. Gramedia Jakarta, 1991.
16. Wiryosumarto, Harsono, Prof., Dr., Ir., Okumura, Toshie, Prof., Dr., **Teknologi Pengelasan Logam**, Cetakan Kelima, PT. Pradnya Paramita, 1991.

LAMPFRAN



## LAMPIRAN A : SPESIFIKASI PROSEDUR PENGELASAN SAW UNTUK 4

## VARIABEL TEBAL PELAT

dimensi pelat mm	tebal pelat mm	diameter elektrode mm	pass	tegangan listrik mesin las V	arus listrik mesin las A	kecepatan pengelasan cm/ min / (detik)
200x200xt	7	4	1	35	450	76 (16.30)
			2	35	500	70 (17.45)
250x200xt	7	4	1	35	450	76 (16.25)
			2	35	500	70 (17.35)
300x200xt	7	4	1	35	450	76 (15.45)
			2	35	500	70 (17.80)
350x200xt	7	4	1	35	450	76 (16.32)
			2	35	500	70 (17.25)

tabel A.1

SPESIFIKASI PROSEDUR PENGELASAN UNTUK TEBAL PELAT 7 mm

dimensi pelat mm	tebal pelat mm	diameter elektrode mm	pass	tegangan listrik mesin las V	arus listrik mesin las A	kecepatan pengelasan cm/ min / (detik)
200x200xt	10	4	1	35	500	70 (17.30)
			2	35	550	70 (17.89)
250x200xt	10	4	1	35	500	70 (17.20)
			2	35	550	70 (17.10)
300x200xt	10	4	1	35	500	70 (17.10)
			2	35	550	70 (17.64)
350x200xt	10	4	1	35	500	70 (17.80)
			2	35	550	70 (17.61)

tabel A.2

SPESIFIKASI PROSEDUR PENGELASAN UNTUK TEBAL PELAT 10 mm

dimensi pelat mm	tebal pelat mm	diameter elektrode mm	pass	tegangan listrik mesin las V	arus listrik mesin las A	kecepatan pengelasan cm/ min (detik)
200x200x	12	4	1	34	600	58 (20.40)
			2	34	600	83 (15.12)
250x200x	12	4	1	34	600	58 (20.54)
			2	34	600	83 (14.13)
300x200x	12	4	1	34	600	58 (21.06)
			2	34	600	83 (14.32)
350x200x	12	4	1	34	600	58 (21.06)
			2	34	600	83 (14.50)

tabel A.3

*SPEKIFIKASI PROSEDUR PENGEKELASAN UNTUK TEBAL PELAT 12 mm*

dimensi pelat mm	tebal pelat mm	diameter elektrode mm	pass	tegangan listrik mesin las V	arus listrik mesin las A	kecepatan pengelasan cm/ min / (detik)
200x200x	15	4	1	34	550	58 (21.13)
			2	34	600	58 (21.11)
250x200x	15	4	1	34	550	58 (20.98)
			2	34	600	58 (20.55)
300x200x	15	4	1	34	550	58 (20.69)
			2	34	600	58 (20.71)
350x200x	15	4	1	34	550	58 (20.56)
			2	34	600	58 (20.50)

tabel A.4

*SPEKIFIKASI PROSEDUR PENGEKELASAN UNTUK TEBAL PELAT 15 mm*

LAMPFRAN

**B**

LAMPIRAN B :TABEL PENGUKURAN TITIK - TITIK UJI DEFORMASI UNTUK VARIASI LEBAR PELAT ( L ).

dimensi	LETAK TITIK - TITIK PENGAMATAN ( range : 50 mm )														DIMENSI RIEL (mm)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
200x200xt																	
t= 7 mm	0	0.82	1.32	2.86	2.19	1.92	1.44	0.83									101
	0	0.93	1.435	1.25	2.08	1.84	1.315	0.84									198
	0	0.96	1.67	1.87	2.21	1.97	1.66	1.11									
	0	0.84	1.3	1.86	1.905	1.54	1.21	0.64									
	0	0.78	1.36	1.91	1.865	1.65	1.22	0.65									
rata - rata :	0	0.866	1.417	1.95	2.05	1.784	1.369	0.814									402.5
t= 10 mm	0	0.39	0.73	1.22	0.98	0.31	-0.08	-0.23									100
	0	0.49	0.98	1.1	2.35	2.06	1.13	0.87									198
	0	0.81	1.54	2.26	1.78	1.74	1.56	1.38									
	0	0.75	1.71	2.48	3.15	3.07	2.77	2.56									
	0	0.85	1.41	2.17	3.02	2.85	2.6	2.37									
rata - rata :	0	0.658	1.274	1.846	2.256	2.006	1.596	1.386									403
t= 12 mm	0	0.45	0.95	1.35	2.91	3.79	4.82	5.63									102
	0	0.4	0.88	1.33	3	3.95	4.89	5.72									200
	0	0.77	1.18	1.725	3.3	4.27	5.26	6.06									
	0	0.51	0.95	1.48	3.18	4.07	5.18	5.96									
	0	0.51	0.92	1.36	3.1	4.08	5.05	5.75									
rata - rata :	0	0.528	0.976	1.449	3.098	4.032	5.04	5.804									404
t= 16 mm	0	0.32	0.66	0.89	1.81	2.01	2.14	2.3									100
	0	0.36	0.73	1.02	1.79	2.08	2.34	2.56									198
	0	0.31	0.69	0.905	1.85	2.165	2.48	2.6									
	0	0.21	0.63	0.83	1.96	2.47	2.66	2.91									
	0	0.29	0.67	0.92	2.11	2.4	2.67	2.95									
rata - rata :	0	0.298	0.676	0.913	1.868	2.225	2.458	2.664									390

tabel B.1

HASIL PENGUKURAN TITIK - TITIK UJI UNTUK PELAT 200 x 200 x t ( mm )

dimensi	LETAK TITIK - TITIK PENGAMATAN ( range : 50 mm )														DIMENSI RIEL (mm)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
250x200xt																	
t= 7 mm	0	0.88	1.41	1.74	1.77	4.4	5.98	7.59	8.66	9.655							100
	0	0.78	1.26	1.615	1.79	4.08	5.57	7.05	8.27	9.26							199
	0	0.83	1.32	1.67	2.91	4.05	5.55	6.96	8.18	9							
	0	0.73	1.37	1.69	1.72	3.72	5.1	6.49	7.68	8.62							
	0	0.73	1.2	1.46	1.57	3.09	4.655	5.02	7.22	8.17							
	rata - rata :	0	0.79	1.312	1.635	1.952	3.868	5.371	6.622	8.002	8.941						
t= 10 mm	0	0.99	1.83	2.6	3.215	3.57	3.21	2.6	2.02	1.43							100
	0	0.99	1.77	2.46	3.11	3.46	3.07	2.47	2.03	1.26							197
	0	1.32	2.03	2.915	3.35	3.6	3.3	2.695	2.11	1.56							
	0	0.99	1.79	2.57	3.295	3.3	2.76	2.34	1.65	1.09							
	0	0.88	1.8	2.58	3.26	3.275	2.75	2.25	1.66	2.01							
	rata - rata :	0	1.034	1.844	2.625	3.246	3.441	3.018	2.471	1.894	1.47						
t= 12 mm	0	0.45	1	1.62	2.17	2.38	2.33	2.31	2.21	2.21							102
	0	0.58	1	1.58	1.94	2.3	2.29	2.3	2.21	2.07							197
	0	0.57	0.985	1.44	2.01	2.28	2.37	2.22	2.115	2.04							
	0	0.47	0.84	1.35	1.89	2.61	2.42	2.31	2.23	2.12							
	0	0.23	0.71	1.25	1.66	2.35	2.94	2.04	2.05	1.985							
	rata - rata :	0	0.46	0.907	1.448	1.934	2.384	2.47	2.236	2.163	2.085						
t= 15 mm	0	0.34	0.625	0.865	1.03	1.85	2.3	2.765	3.27	3.7							101
	0	0.3	0.59	0.83	1.04	1.87	2.38	2.81	3.235	3.69							197.5
	0	0.35	0.59	0.8	0.815	1.74	1.37	2.785	3.3	3.65							
	0	0.4	0.55	0.9	1.04	1.985	2.55	2.98	3.43	3.84							
	0	0.38	0.72	0.94	1.14	2	2.42	2.9	3.46	3.77							
	rata - rata :	0	0.354	0.615	0.867	1.013	1.889	2.204	2.848	3.339	3.73						

tabel B.2

HASIL PENGUKURAN TITIK-TITIK UJI UNTUK PELAT 250 x 200 x t ( mm )

dimensi	LETAK TITIK - TITIK PENGAMATAN ( range : 50 mm )														DIMENSI REL (mm)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
300x200xt																	
t= 7 mm	0	0.71	1.15	1.465	1.47	1.215	2.965	3.955	3.805	4.47	4.925	5.135					
	0	0.82	1.3	0.158	1.75	1.46	2.33	3.27	4.115	4.58	5.15	5.34					
	0	0.83	1.14	1.45	1.5	1.49	2.355	3.18	4.12	4.84	5.1	5.3					
	0	0.71	1.19	1.495	1.51	1.42	2.35	3.37	4.11	4.62	5.2	5.32					
	0	0.57	1.04	1.27	1.25	1.05	2.13	3.02	3.85	4.44	4.93	5.15					
	rata - rata :	0	0.688	1.164	1.168	1.496	1.327	2.426	3.359	4	4.55	5.061	5.249				
t= 10 mm	0	0.78	1.42	1.99	2.465	2.79	2.785	2.41	3.02	2.48	0.81	0.035					
	0	0.94	1.575	2.2	2.575	2.79	2.78	2.59	1.99	1.435	0.875	0.145					
	0	0.87	1.64	2.17	2.525	2.815	2.82	2.49	2.1	1.49	0.915	0.24					
	0	0.805	1.545	2.025	2.57	2.92	2.71	2.58	2.175	1.58	0.94	0.17					
	0	0.73	1.38	2.98	2.47	2.84	2.655	2.4	2.995	1.47	0.83	0.155					
	rata - rata :	0	0.821	1.512	2.273	2.521	2.831	2.75	2.494	2.456	1.691	0.874	0.149				
t= 12 mm	0	0.34	0.7	1.155	1.435	1.835	2.98	3.73	4.4	4.88	5.37	5.835					
	0	0.28	0.66	0.955	1.48	1.68	3.06	3.78	4.37	4.94	5.365	5.75					
	0	0.105	0.265	0.53	0.78	0.97	1.82	2.34	2.74	3.04	3.38	3.645					
	0	0.17	0.3	0.54	0.715	1.21	2	2.51	2.915	3.23	3.465	3.765					
	0	0.265	0.38	0.57	0.795	1.025	2.22	2.705	3.04	3.41	3.665	3.905					
	rata - rata :	0	0.232	0.461	0.75	1.041	1.344	2.416	3.013	3.493	3.9	4.249	4.58				
t= 15 mm	0	0.305	0.525	0.88	0.78	0.795	1.26	1.435	1.46	1.585	1.62	1.5					
	0	0.33	0.56	0.635	0.78	0.855	1.365	1.525	1.58	1.73	1.63	1.605					
	0	0.245	0.455	0.68	0.74	0.73	1.48	1.6	1.685	1.76	1.805	1.71					
	0	0.295	0.47	0.645	0.695	0.805	1.57	1.81	1.875	1.92	1.9	1.855					
	0	0.28	0.455	0.65	0.705	0.735	1.605	1.735	1.905	1.97	1.965	1.83					
	rata - rata :	0	0.291	0.493	0.658	0.736	0.784	1.456	1.621	1.701	1.793	1.784	1.7				

tabel B.3

HASUL PENGUKURAN TITIK-TITIK UJI UNTUK PELAT 300 x 200 x t ( mm )

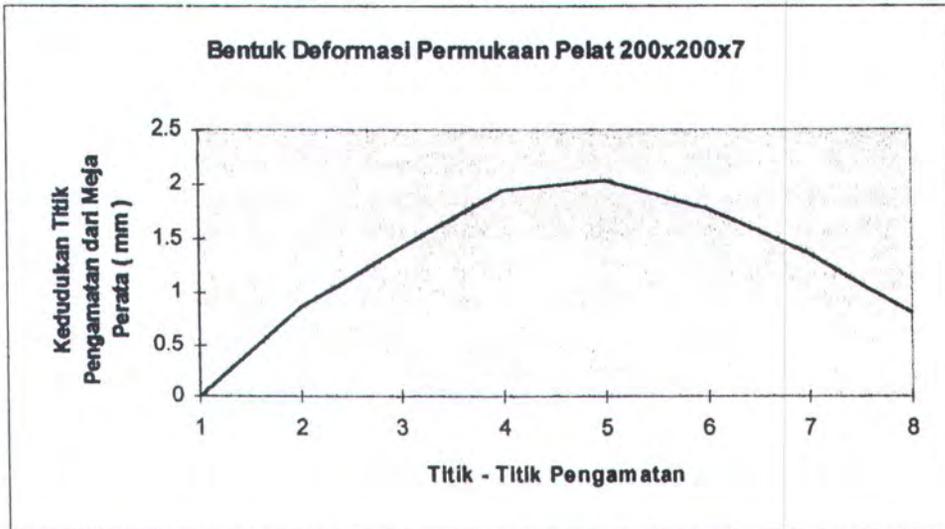
dimensi	LETAK TITIK - TITIK PENGAMATAN ( range : 50 mm )														DIMENSI RIEL (mm)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
350x200xt																	
t= 7 mm	0	0.695	1.33	1.73	1.99	2.185	2.015	2.27	2.51	2.42	2.17	1.65	1.08	0.245			
	0	0.875	1.285	1.71	2.035	2.155	2.025	2.28	2.49	2.415	2.205	1.645	0.99	0.15			
	0	0.73	1.38	1.765	2.075	2.1	2.155	2.825	2.69	2.62	2.415	1.905	1.26	0.3			
	0	0.71	1.355	1.825	1.96	2.05	2.12	2.55	2.765	2.735	2.34	1.945	1.215	0.29			
	0	0.78	1.23	1.81	1.945	2.08	1.96	2.73	2.775	2.88	2.4	1.92	1.13	0.26			
	rata - rata :	0	0.758	1.312	1.768	2.001	2.114	2.055	2.487	2.646	2.57	2.306	1.813	1.135		0.249	
t= 10 mm	0	0.79	1.505	2.2	2.79	3.35	3.81	4.08	3.63	3.05	2.475	1.745	0.995	0.05			
	0	0.94	1.705	2.415	3	3.47	4.01	4.035	3.605	3.19	2.515	1.88	0.97	0.07			
	0	0.955	1.635	2.345	3.07	3.52	4.13	4.05	3.675	3.045	2.455	1.705	1.05	0.105			
	0	1.045	1.815	2.59	3.15	3.715	4.225	4.19	3.65	3.13	2.47	1.82	1.15	0.11			
	0	0.975	1.825	2.57	3.245	3.83	4.315	4.4	3.675	3.105	2.525	1.81	1.05	0.09			
	rata - rata :	0	0.941	1.697	2.424	3.051	3.577	4.098	4.151	3.647	3.104	2.488	1.792	1.043		0.085	
t= 12 mm	0	0.09	0.2	0.52	0.79	1.035	1.345	2.825	3.405	4.14	4.81	5.53	6.36	7.075			
	0	0.11	0.245	0.46	0.74	1.035	1.35	2.525	3.29	3.93	4.55	5.225	6.515	7.35			
	0	0.185	0.435	0.715	1.05	1.385	1.59	3.1	3.88	4.4	3.145	5.985	6.815	7.535			
	0	0.135	0.37	0.62	0.985	1.205	1.605	3.12	3.725	4.385	5.07	5.835	6.795	7.545			
	0	0.2	0.435	0.705	0.98	1.295	1.6	3.19	3.97	4.59	5.3	6.035	6.89	7.63			
	rata - rata :	0	0.144	0.337	0.604	0.905	1.191	1.498	2.912	3.65	4.289	4.575	5.718	6.675		7.427	
t= 15 mm	0	0.49	0.88	1.2	1.45	1.6	1.88	1.75	2.105	2.395	2.83	2.73	2.775	2.71			
	0	0.42	0.83	1.1	1.31	1.48	1.51	1.51	1.9	2.205	2.445	2.555	2.535	2.5			
	0	0.58	0.915	1.17	1.415	1.575	1.6	1.525	1.98	2.285	2.55	2.655	2.655	2.595			
	0	0.425	0.94	1.22	1.47	1.83	1.7	1.525	1.89	2.23	2.39	2.61	2.635	2.55			
	0	0.435	0.86	1.195	1.49	1.575	1.58	1.285	1.75	2.05	2.35	2.535	2.6	2.545			
	rata - rata :	0	0.47	0.885	1.177	1.427	1.572	1.614	1.519	1.925	2.233	2.473	2.617	2.64		2.58	

tabel B.4

HASIL PENGUKURAN TITIK-TITIK UJI UNTUK PELAT 350 x 200 x t ( mm )

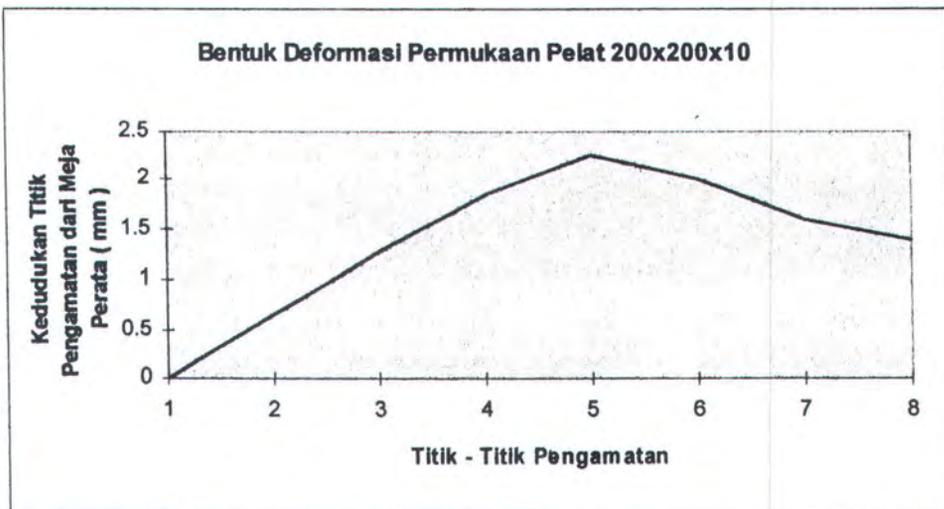
LAMPFRAN C

LAMPRAN C : GAMBAR BENTUK DEFORMASI SUDUT UNTUK VARIASI  
LEBAR PELAT ( L )



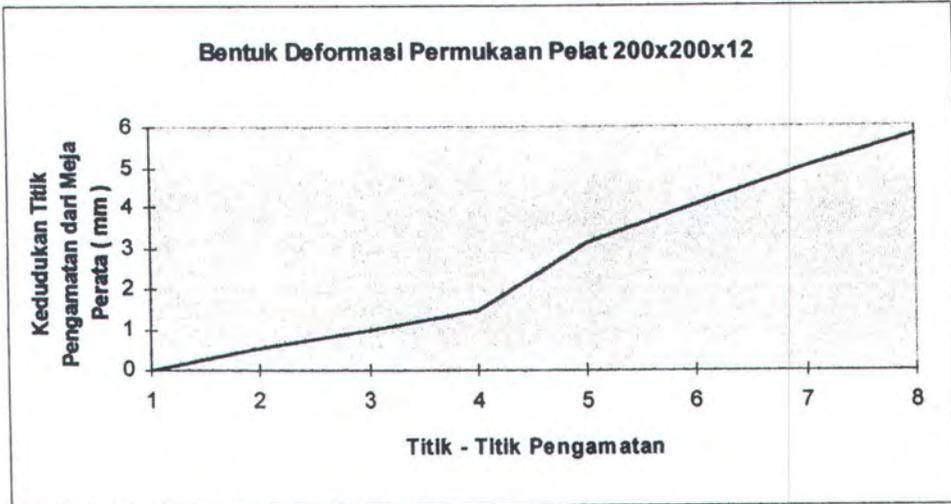
**gambar C.1**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 200 x 7 ( mm )*



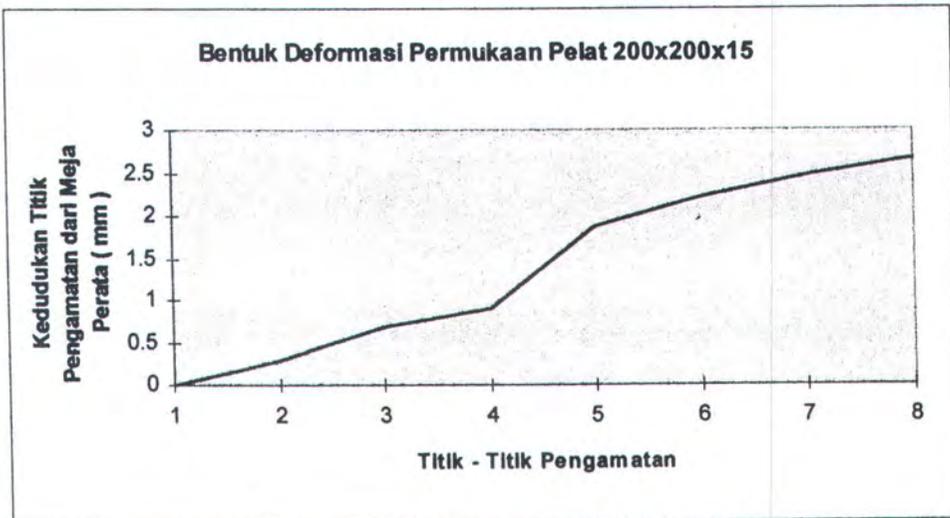
**gambar C.2**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 200 x 10 ( mm )*



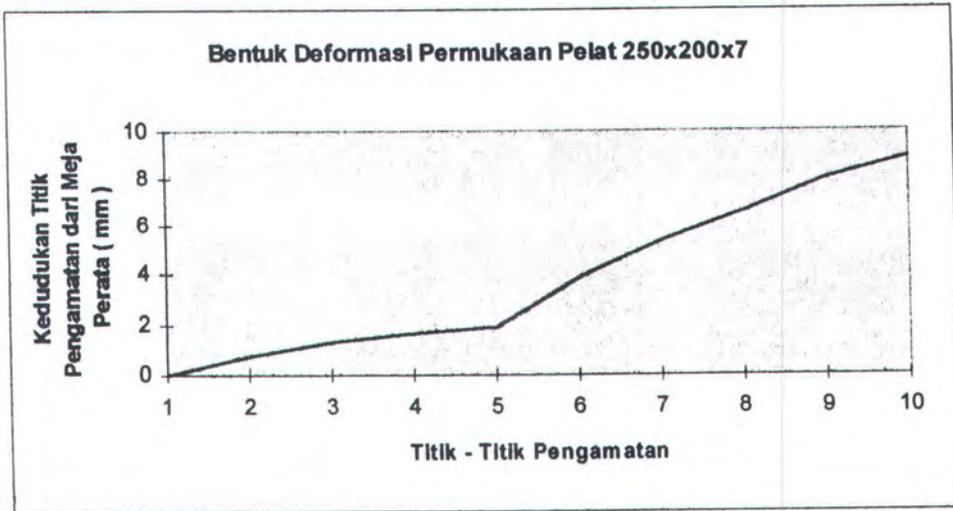
**gambar C.3**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 200 x 12 ( mm )*



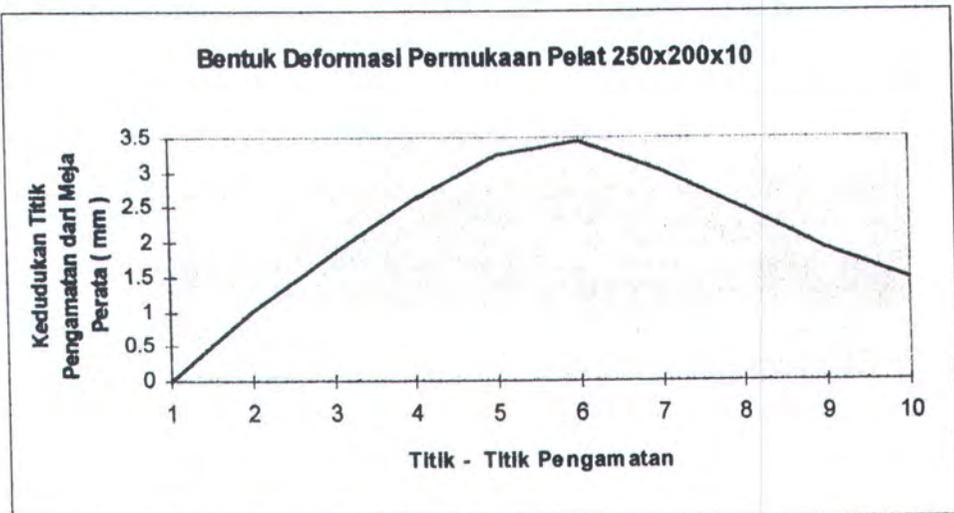
**gambar C.4**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 200 x 15 ( mm )*



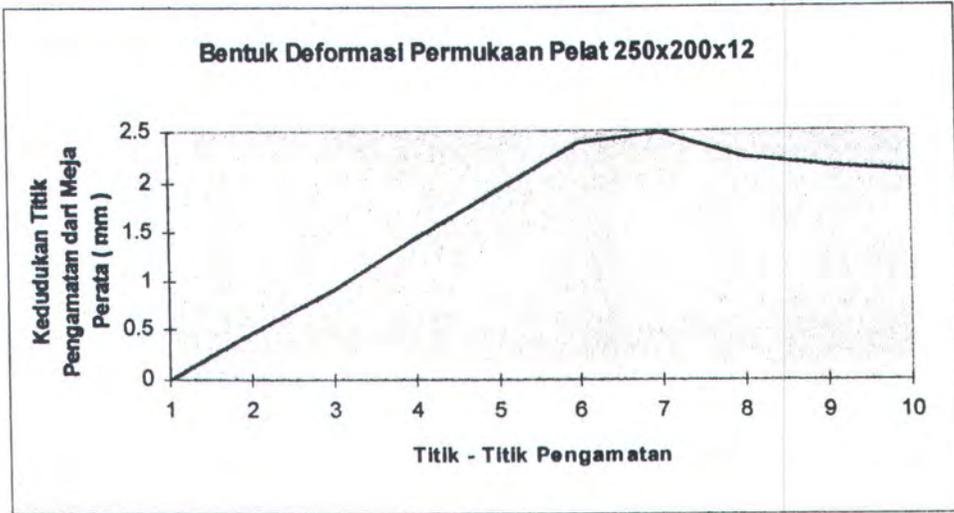
gambar C.5

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 250 x 200 x 7 ( mm )*



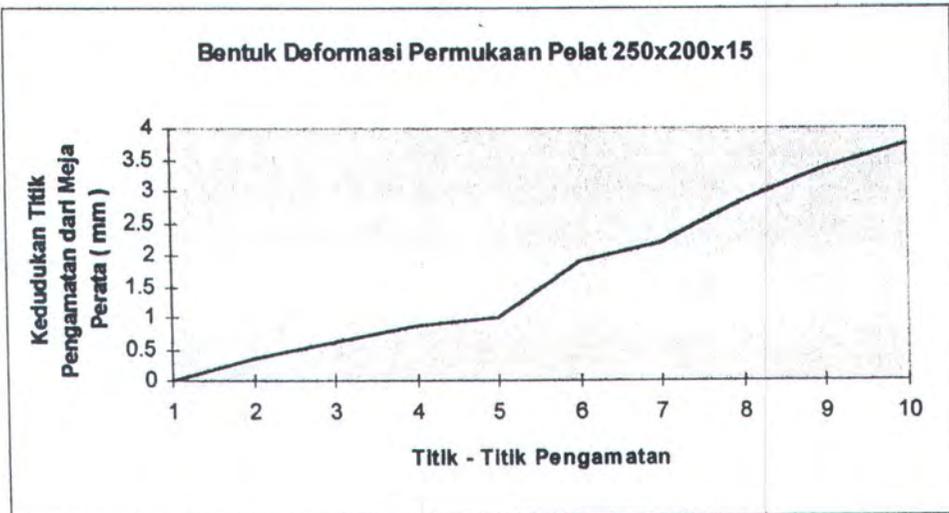
gambar C.6

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 250 x 200 x 10 ( mm )*



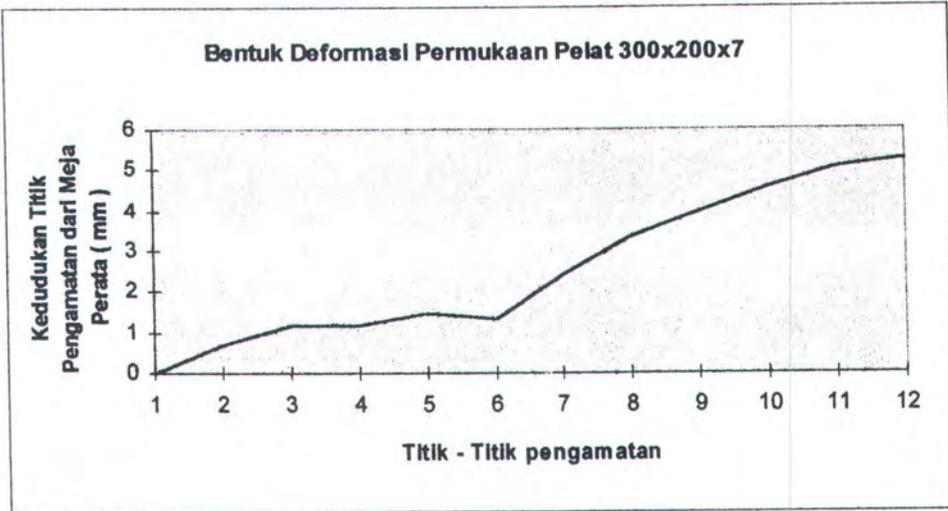
**gambar C.7**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 250 x 200 x 12 ( mm )*

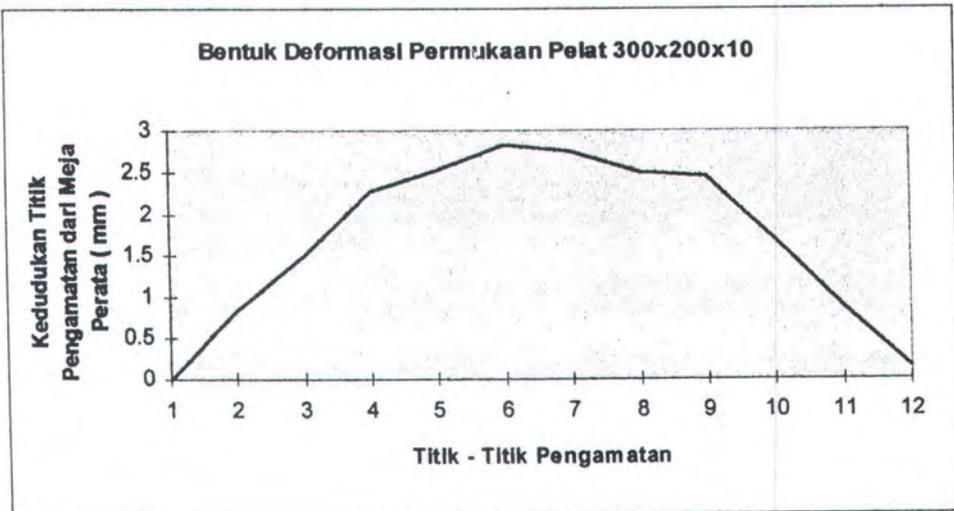


**gambar C.8**

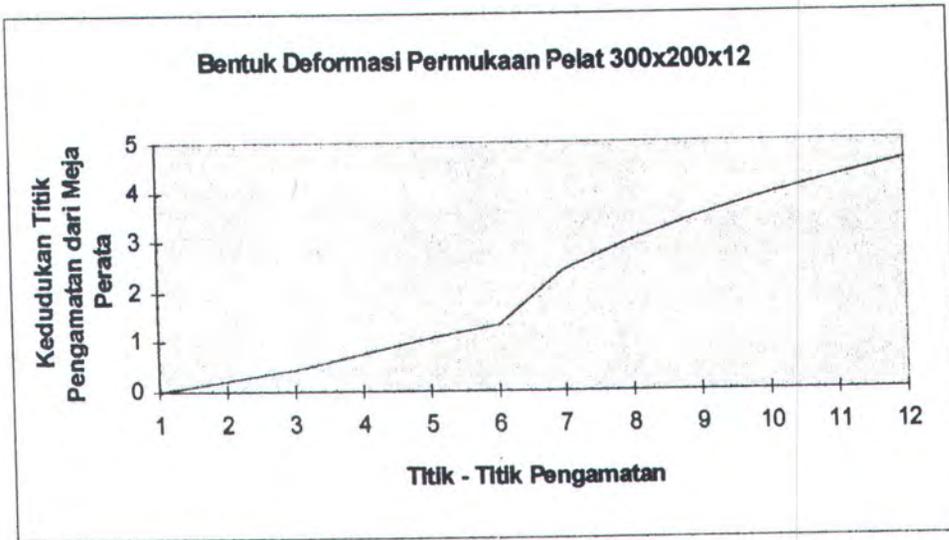
*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 250 x 200 x 15 ( mm )*



**gambar C.9**  
*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 300 x 200 x 7 ( mm )*

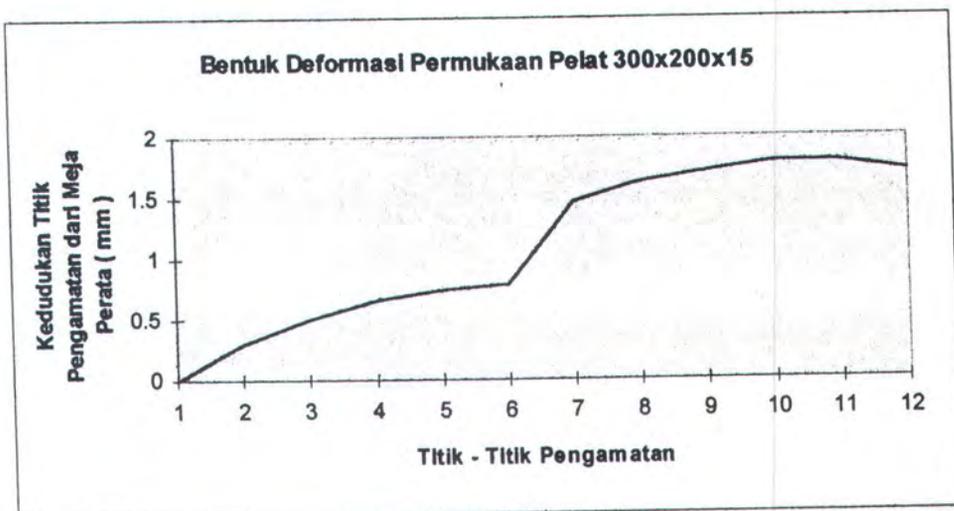


**gambar C.10**  
*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 300 x 200 x 10 ( mm )*



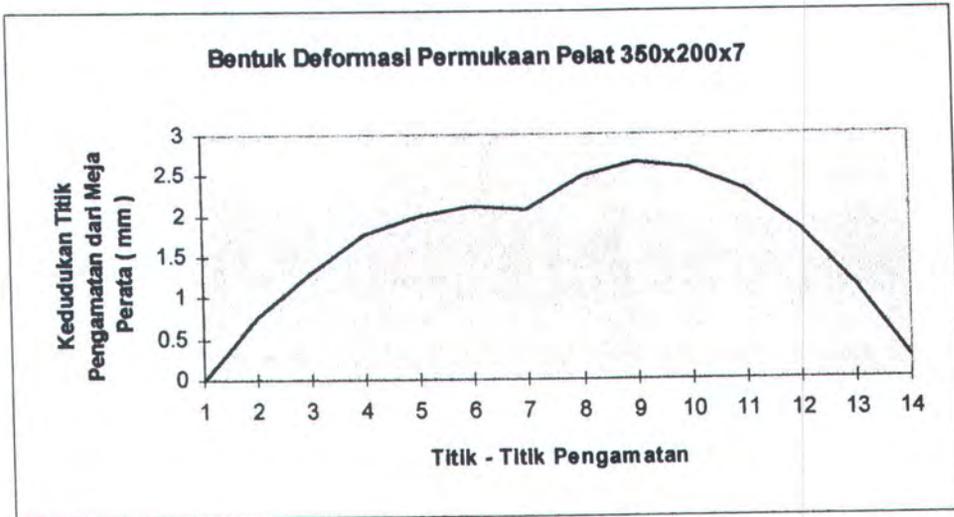
gambar C.11

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 300 x 200 x 12 ( mm )*

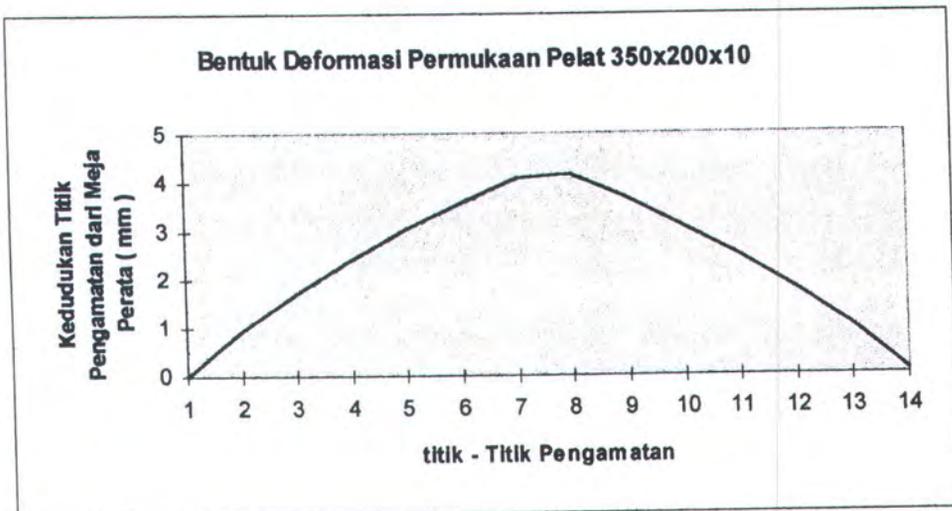


gambar C.12

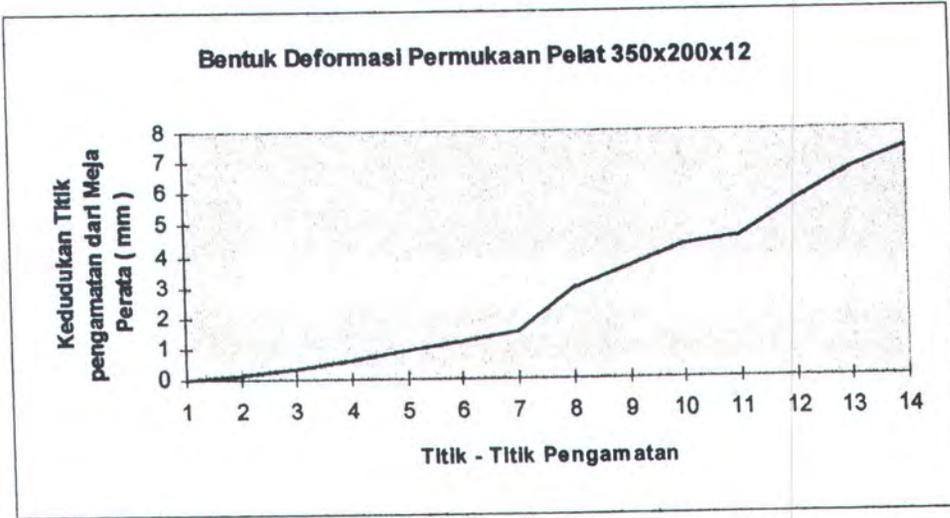
*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 300 x 200 x 15 ( mm )*



**gambar C.13**  
*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 350 x 200 x 7 ( mm )*

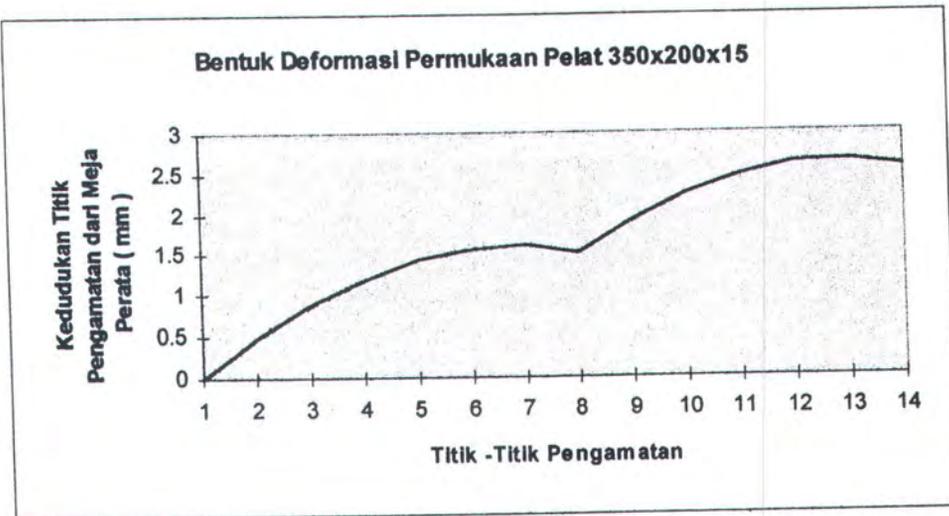


**gambar C.14**  
*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 350 x 200 x 10 ( mm )*



**gambar C.15**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 350 x 200 x 12 ( mm )*



**gambar C.16**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 350 x 200 x 15 ( mm )*

LAMPFRAN **D**

LAMPIRAN D : TABEL PENGUKURAN TITIK -TITIK UJI DEFORMASI UNTUK

VARIASI PANJANG PELAT ( P )

dimensi	LETAK TITIK - TITIK PENGAMATAN ( range: 50 mm )														DIMENSI RIEL (mm)		
	t = 7 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14	
200x200xt	0	0.575	1.10	1.8	2.2	2	1.8	1.									
	0	0.599	1.26	1.	2.2	2.1	1.	1.									
	0	0.8	1.30	1.8	2.2	2.1	1.9	1.7									
	0	0.585	1.2	1.	1.9	2	1.	1.6									
	0	0.56	1.1	1.7	1.9	1.8	1.72	1.3									
	rata - rata	0	0.584	1.21	1.79	2.11	2.01	1.85	1.64								
200x250xt	0	0.602	1.	1.9	3.4	4.1	5.2	6.36									
	0	0.61	1.2	1.9	3.48	4.1	5.14	6.38									
	0	0.575	1.2	1.9	3.39	4.1	5.3	6.4									
	0	0.41	1.20	1.9	3.38	4.1	5.27	6.345									
	0	0.455	1.	1.8	3.59	4.33	5.62	6.68									
	rata - rata	0	0.4	1.1	1.8	3.725	4.66	5.75	6.85								
200x300xt	0	0.54	1.0	1.83	3.1	3.78	4.34	4.855									
	0	0.3	0.956	1.5	3.1	3.6	4.3	4.8									
	0	0.26	0.605	1.3	3.06	3.56	4.1	4.83									
	0	0.36	0.89	1.5	2.1	3.3	4.09	4.86									
	0	0.45	0.9	1.	2.88	3.25	4	4.84									
	rata - rata	0	0.4	0.9	1.6	2.42	3.	3.99	4.72								
200x350xt	0	0.43	0.81	0.93	0.89	1.22	1.93	2.72									
	0	0.3	0.65	0.92	1.0	1.46	2.12	3.1									
	0	0.3	0.58	0.93	1.11	1.7	2.585	3.4									
	0	0.45	0.66	1.0	1.5	2.05	3.775	4.68									
	0	0.52	0.825	1.24	2.225	2.905	4.26	5.28									
	rata - rata	0	0.535	0.99	1.4	2.9	3.76	4.785	5.88								
	0	0.482	0.788	1.17	1.94	2.578	3.632	4.608									

tabel D.1

HASIL PENGUKURAN TITIK-TITIK UJI UNTUK PELAT L x P x 7

dimensi	LETAK TITIK - TITIK PENGAMATAN ( range : 50 mm )														DIMENSI RIEL (mm)		
	t = 10 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
200x200xt	0	0.325	0.77	1.215	1.28	0.93	0.555	0.3									
	0	0.388	0.825	1.22	1.39	1.01	0.695	0.318									
	0	0.45	0.88	1.225	1.5	1.09	0.835	0.331									
	0	0.435	0.88	1.268	1.43	1.02	0.698	0.321									
	0	0.42	0.84	1.31	1.36	0.95	0.56	0.31									
	rata - rata	0	0.404	0.835	1.248	1.392	1	0.669	0.315								
200x250xt	0	0.6	0.85	1.1	2.3	2.9	4.19	4.96									
	0	0.525	0.845	1.18	2.28	3.3	4.105	4.96									
	0	0.508	0.848	1.23	2.14	3.073	3.978	4.815									
	0	0.49	0.85	1.28	2	2.845	3.85	4.67									
	0	0.425	0.81	1.115	1.97	2.793	3.803	4.7									
	rata - rata	0	0.485	0.829	1.143	2.105	2.942	3.947	4.806								
200x300xt	0	0.375	0.64	0.945	3.21	4.86	6.525	7.98									
	0	0.31	0.653	1.02	3.168	4.88	6.518	7.9									
	0	0.245	0.665	1.095	3.125	4.9	6.51	7.82									
	0	0.378	0.715	1.2	3.03	4.723	6.418	7.713									
	0	0.51	0.765	1.305	2.935	4.545	6.325	7.605									
	rata - rata	0	0.336	0.63	0.95	2.45	4.125	1.87	7.08								
200x350xt	0	0.31	0.71	1.185	2.72	3.5	4.465	5.175									
	0	0.343	0.698	1.195	2.595	3.395	4.35	4.973									
	0	0.375	0.685	1.205	2.47	3.29	4.235	4.77									
	0	0.338	0.66	1.093	2.295	3.17	3.948	4.36									
	0	0.3	0.635	0.98	2.12	3.05	3.66	3.95									
	rata - rata	0	0.22	0.41	0.61	1.478	2.153	2.873	3.318								

tabel D.2  
 HASIL PENGUKURAN TITIK-TITIK UJI UNTUK PELAT L x P x 10

dimensi	LETAK TITIK - TITIK PENGAMATAN ( range : 50 mm )														DIMENSI RIEL (mm)		
t = 12 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
200x200xt	0	0.715	1.32	1.89	3.16	3.73	4.36	4.84									
	0	0.753	1.365	1.975	3.275	3.848	4.408	4.89									
	0	0.79	1.41	2.06	3.39	3.965	4.455	4.94									
	0	0.78	1.43	2.055	3.333	3.943	4.445	4.91									
	0	0.77	1.45	2.05	3.275	3.92	4.435	4.88									
rata - rata	0	0.762	1.395	2.006	3.287	3.881	4.421	4.892									401
200x250xt	0	0.612	1.08	1.72	3.52	4.2	5.15	5.8									
	0	0.55	1.07	1.67	3.82	4.26	5.13	5.87									
	0	0.498	1.073	1.585	3.245	3.943	4.845	5.508									
	0	0.445	1.075	1.5	2.87	3.825	4.56	5.145									
	0	0.448	0.983	1.41	2.575	3.403	4.343	5.323									
rata - rata	0	0.45	0.89	1.32	2.28	3.18	4.125	5.5									396
200x300xt	0	0.34	0.645	0.95	1.23	0.93	0.7	0.435									
	0	0.408	0.733	1.005	1.288	1.015	0.803	0.57									
	0	0.475	0.82	1.06	1.345	1.1	0.905	0.705									
	0	0.425	0.748	1.048	1.378	1.153	0.913	0.72									
	0	0.375	0.675	1.035	1.41	1.205	0.92	0.735									
rata - rata	0	0.378	0.66	0.988	1.115	0.935	0.895	0.478									398
200x350xt	0	0.515	1.025	1.55	1.27	2.085	1.855	1.57									
	0	0.46	0.988	1.455	1.66	1.978	1.778	1.495									
	0	0.405	0.95	1.36	2.05	1.89	1.7	1.42									
	0	0.422	0.88	1.35	2	1.71	1.55	1.4									
	0	0.444	0.95	1.38	1.825	1.62	1.448	1.24									
rata - rata	0	0.465	1.02	1.41	1.65	1.53	1.345	1.08									400
	0	0.495	1	1.415	1.645	1.453	1.213	0.97									
	0	0.525	0.98	1.42	1.64	1.375	1.08	0.86									
	0	0.466	0.974	1.418	1.718	1.703	1.496	1.254									

tabel D.3

HASIL PENGUKURAN TITIK-TITIK UJI UNTUK SPESIMEN L x P x 12

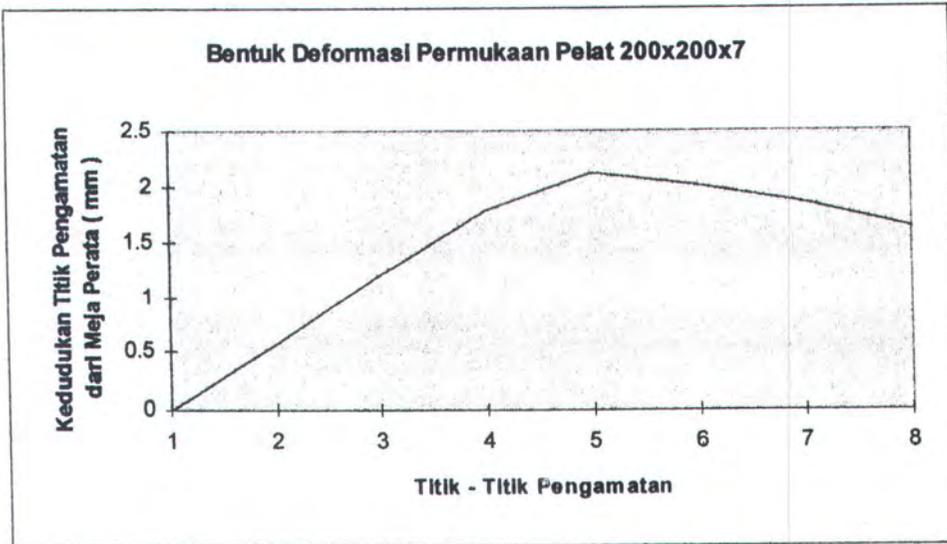
dimensi	LETAK TITIK - TITIK PENGAMATAN ( range : 60 mm )														DIMENSI RIEL (mm)		
	t = 15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14	
200x200xt	0	0.43	1	1.4	1.	1.	2.07	2.62									
	0	0.448	1	1.4	1.6	2.023	2.483	2.8									
	0	0.485	1	1.	1.9	2.345	2.895	3									
	0	0.508	1.00	1.49	2.17	2.565	3.01	3.21									
	0	0.55	1.01	1.4	2.385	2.785	3.1	3.43									
	rata - rata	0	0.48	1.00	1.49	1.9	2.284	2.71	3.01								
200x250xt	0	0.45	0.7	0.725	1.2	1.	1.9	2.									
	0	0.42	0.705	0.74	1.2	1.	1.92	2.06									
	0	0.405	0.748	0.888	1.4	1.8	2.068	2.19									
	0	0.39	0.79	1.03	1.5	2	2.2	2.325									
	0	0.37	0.75	0.978	1.6	1.9	2.56	2.333									
	rata - rata	0	0.35	0.7	0.92	1.7	1.9	2.9	2.34								
200x300xt	0	0.245	0.56	0.8	0.96	1.6	2.12	2.385									
	0	0.358	0.67	0.88	1.25	1.87	2.303	2.623									
	0	0.47	0.78	0.96	1.5	2.1	2.48	2.86									
	0	0.378	0.703	0.97	1.64	2.265	2.66	3.04									
	0	0.285	0.625	0.98	1.73	2.4	2.84	3.22									
	rata - rata	0	0.34	0.63	0.99	2.35	2.7	3.18	3.635								
200x350xt	0	0.3	0.62	0.75	0.8	0.75	0.45	0.28									
	0	0.3	0.6	0.725	0.65	0.688	0.443	0.24									
	0	0.3	0.58	0.7	0.7	0.625	0.435	0.2									
	0	0.376	0.629	0.8	0.845	0.723	0.51	0.325									
	0	0.45	0.678	0.899	0.99	0.82	0.6	0.45									
	rata - rata	0	0.338	0.609	0.974	0.768	0.689	0.47	0.27								

tabel D.4

HASIL PENGUKURAN TITIK-TITIK UJI UNTUK PELAT L x P x 15

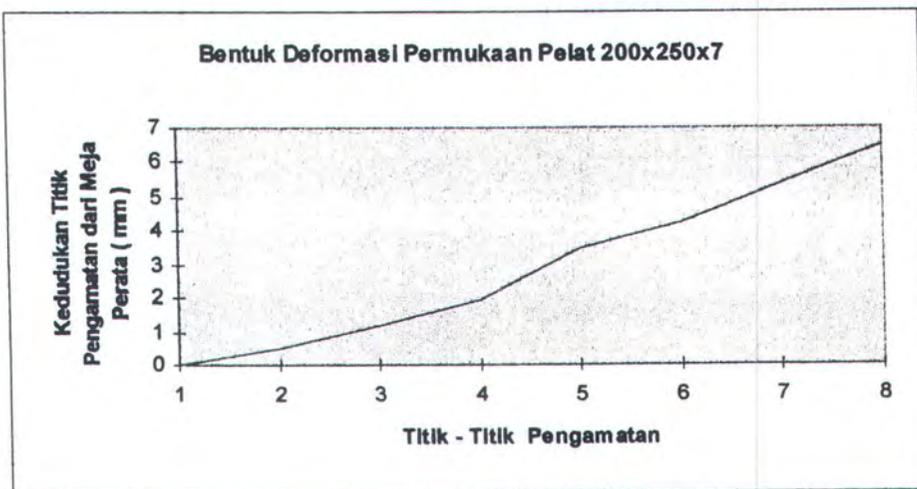
LAMPFRAN **E**

LAMPIRAN E : GAMBAR BENTUK DEFORMASI SUDUT UNTUK VARIASI  
PANJANG PELAT ( P ).



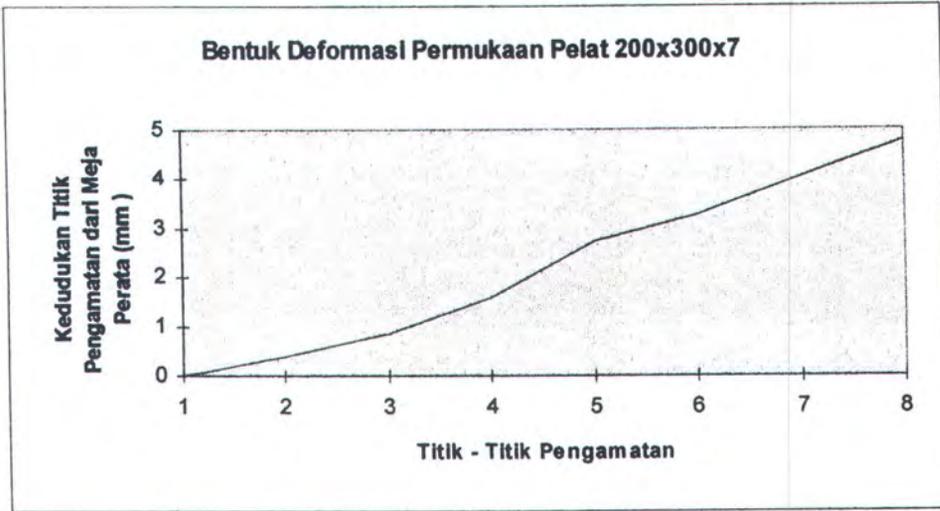
**gambar E.1**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 200 x 7 ( mm )*



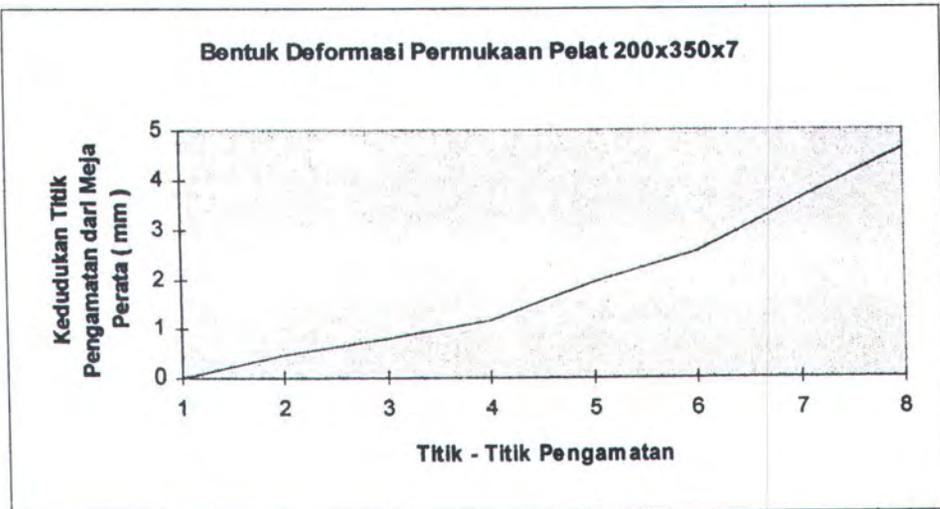
**gambar E.2**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 250 x 7 ( mm )*



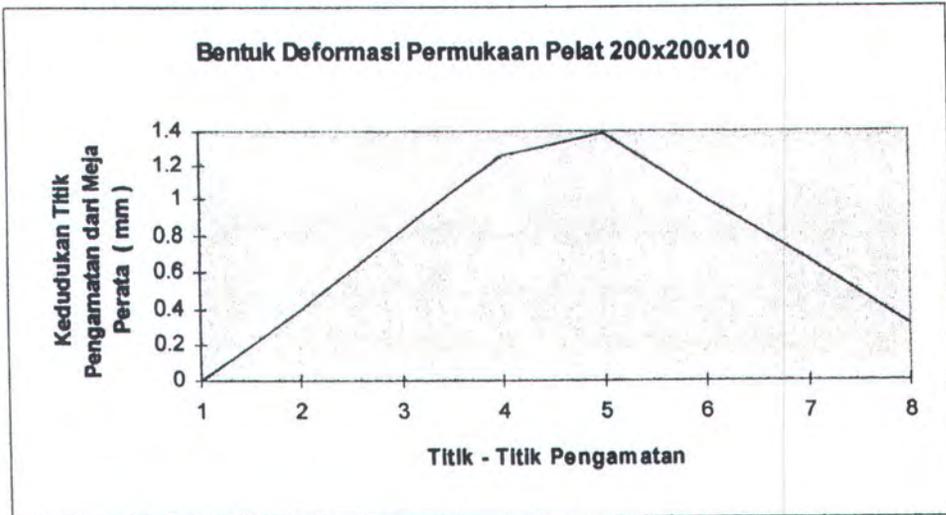
**gambar E.3**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 300 x 7 ( mm )*



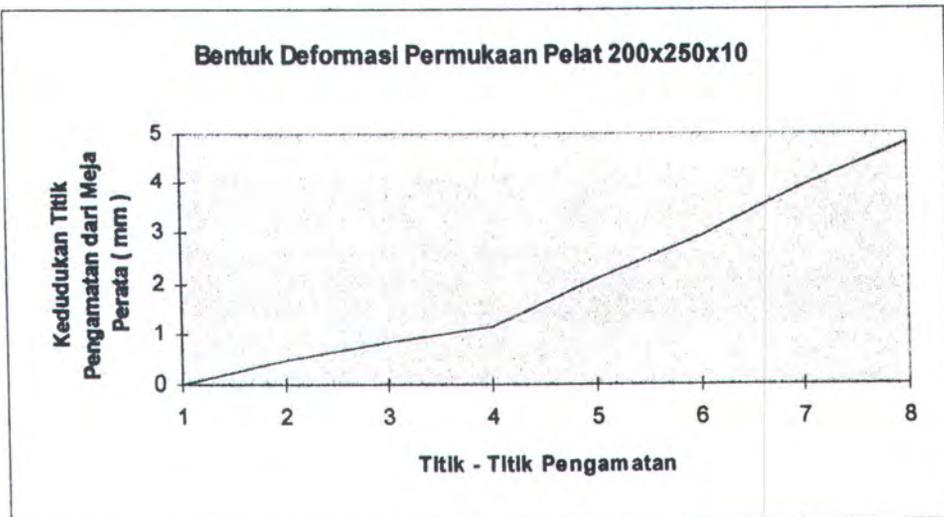
**gambar E.4**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 350 x 7 ( mm )*



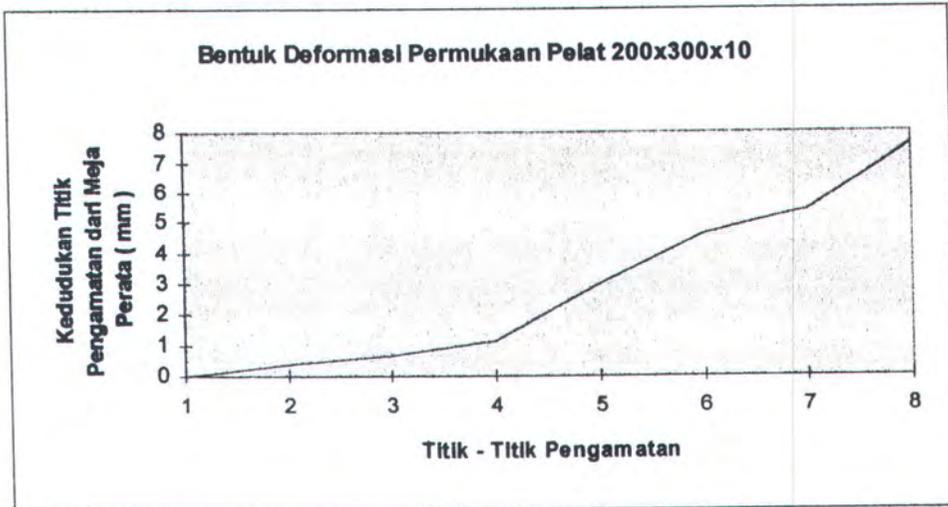
**gambar E.5**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 200 x 10 ( mm )*



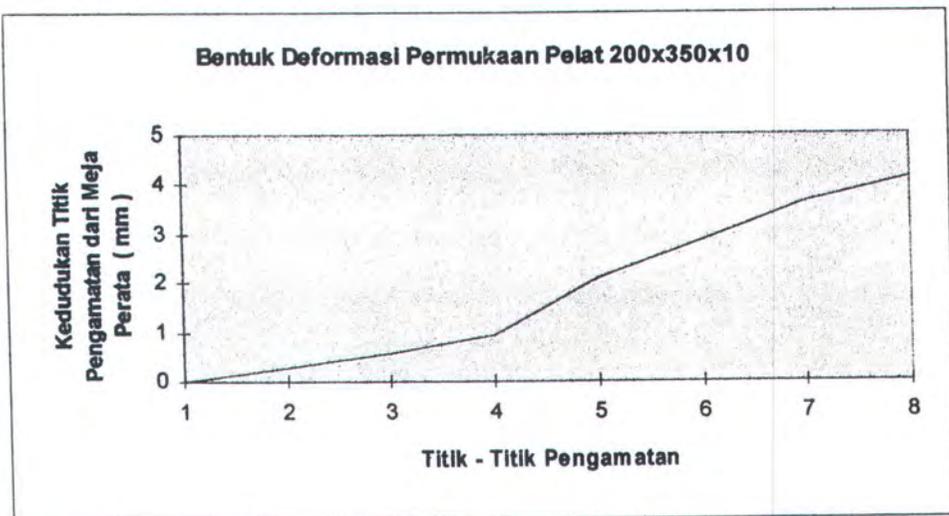
**gambar E.6**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 250 x 10 ( mm )*



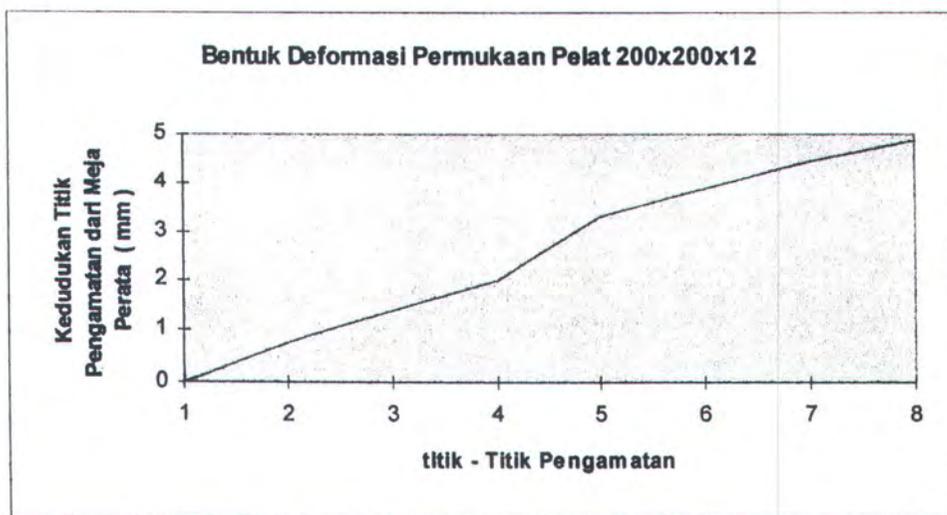
**gambar E.7**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 300 x 10 ( mm )*



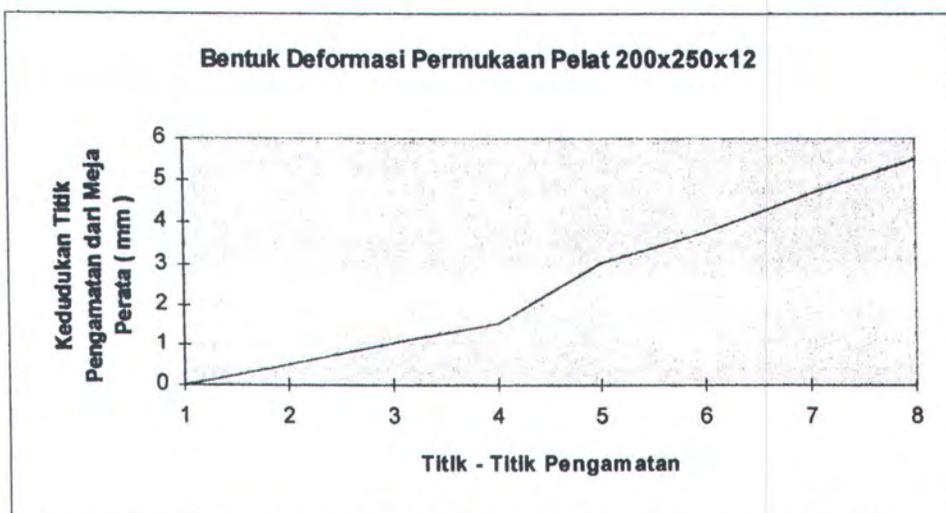
**gambar E.8**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 350 x 10 ( mm )*



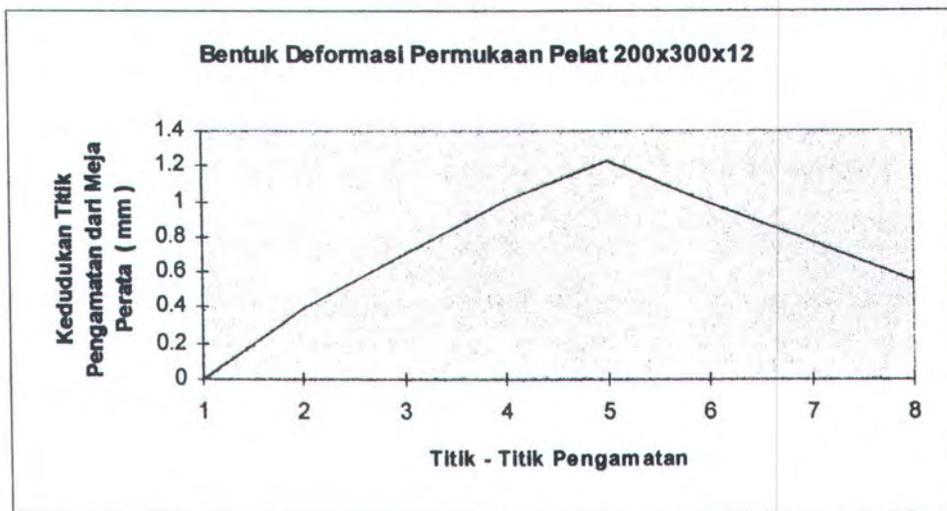
**gambar E.9**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 200 x 12 ( mm )*



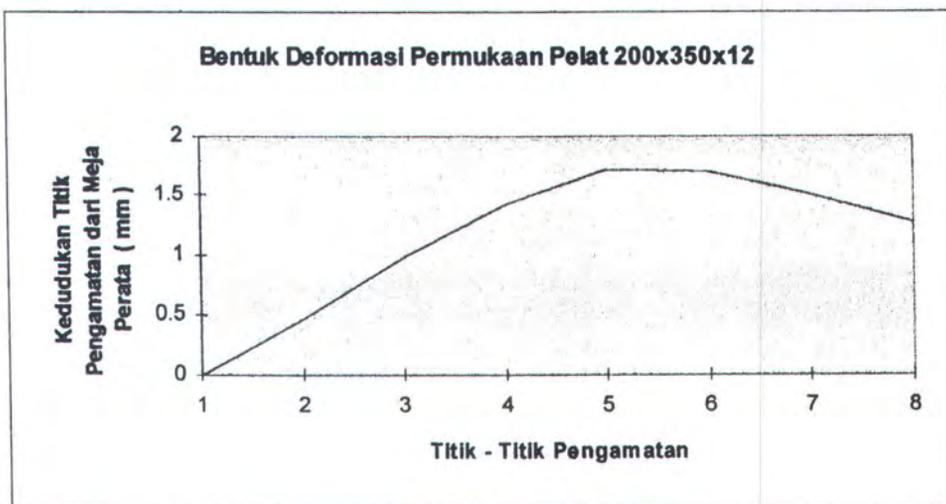
**gambar E.10**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 250 x 12 ( mm )*



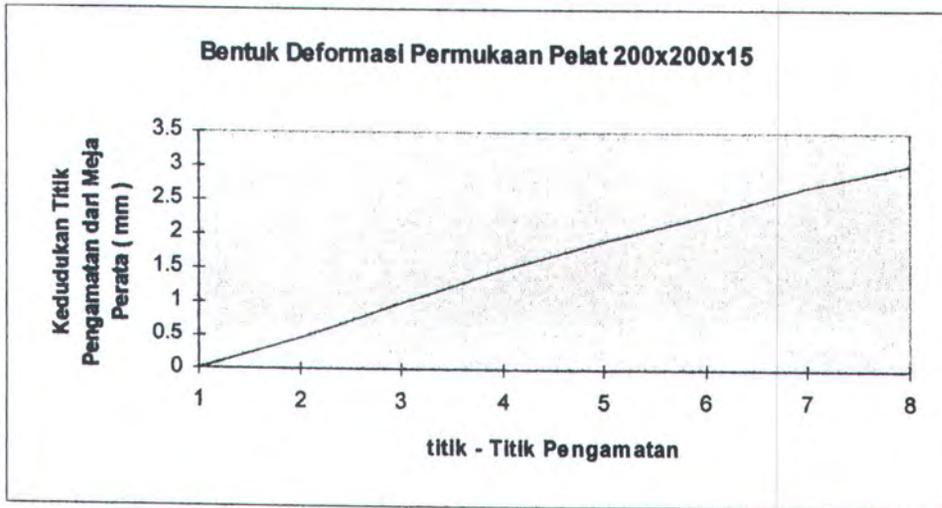
**gambar E.11**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 300 x 12 ( mm )*



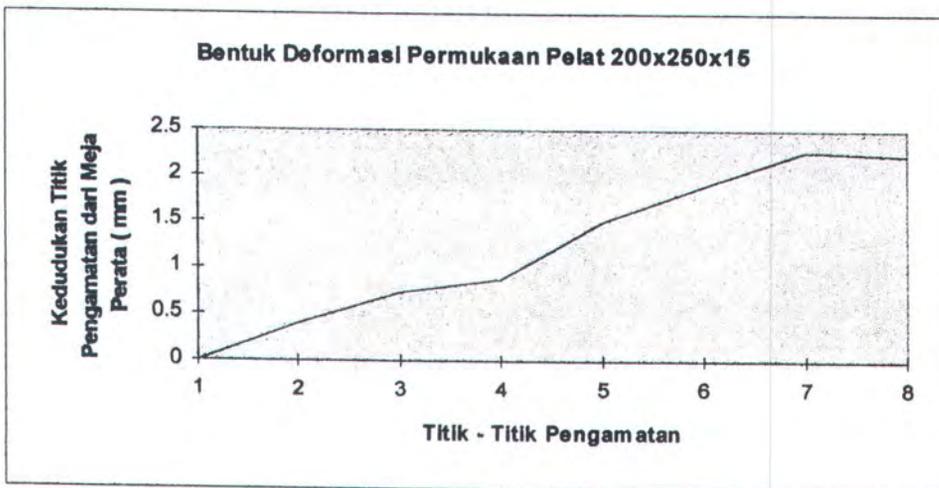
**gambar E.12**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 350 x 12 ( mm )*



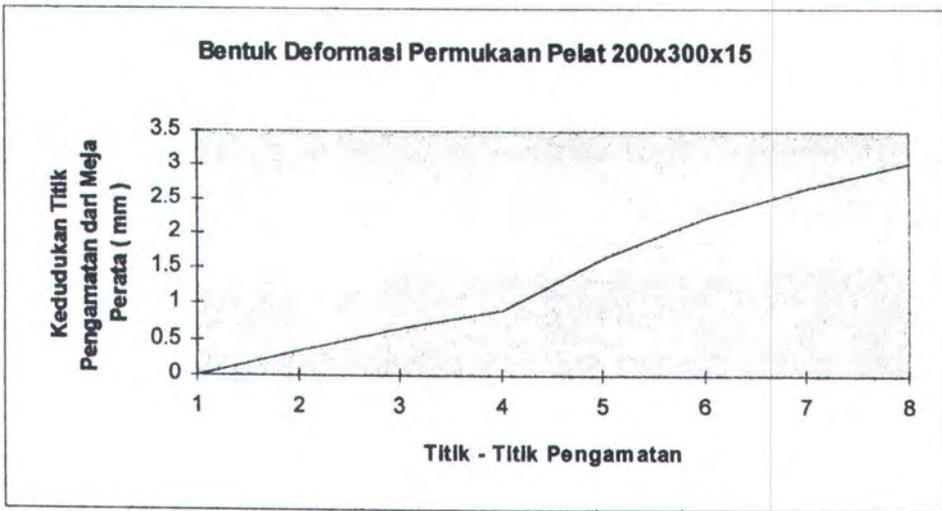
gambar E.13

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 200 x 15 (mm)*



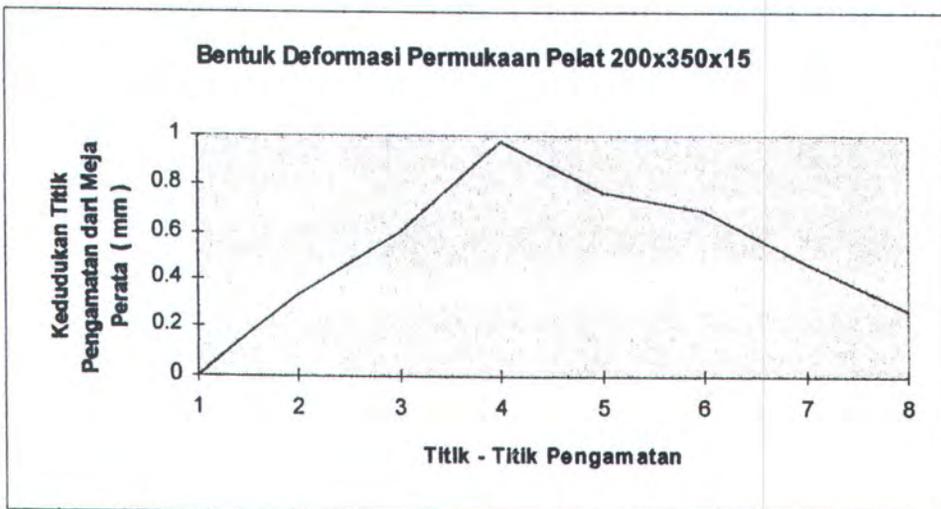
gambar E.14

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 250 x 15 (mm)*



**gambar E.15**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 300 x 15 ( mm )*



**gambar E.16**

*BENTUK DEFORMASI SUDUT PELAT 200 x 350 x 15 ( mm )*

LAMPFRAN **F**

LAMPIRAN F : TABEL PENGUKURAN TINGGI DEFORMASI MAKSIMUM  $f_{\beta}$   
DAN SUDUT DEFORMASI  $\beta$

Tebal Pelat $t$ ( mm )	Dimensi Pelat $L \times P \times t$ ( mm )	Maksimum Tinggi Deformasi $f_{\beta}$ ( mm )	Sudut Deformasi $\beta$ ( derajat )
7	200x200x7	1.563	0.448
	250x200x7	1.889	0.433
	300x200x7	1.077	0.206
	350x200x7	2.462	0.403
10	200x200x10	1.438	0.412
	250x200x10	2.727	0.625
	300x200x10	2.77	0.529
	350x200x10	4.1	0.671
12	200x200x12	1.077	0.309
	250x200x12	1.219	0.279
	300x200x12	0.933	0.178
	350x200x12	2	0.327
15	200x200x15	0.615	0.176
	250x200x15	0.6	0.138
	300x200x15	0.575	0.11
	350x200x15	0.64	0.105

tabel F. 1  
HASIL PENGUKURAN UNTUK VARIASI LEBAR PELAT ( L )

Tebal Pelat $t$ (mm)	Dimensi Pelat $L \times P \times t$ (mm)	Maksimum Tinggi Deformasi $f_B$ (mm)	Sudut Deformasi $B$ (derajat)
7	200x200x7	1.091	0.313
	200x250x7	0.909	0.208
	200x300x7	0.533	0.102
	200x350x7	0.8	0.131
10	200x200x10	1.2	0.344
	200x250x10	0.875	0.201
	200x300x10	2.2	0.42
	200x350x10	0.833	0.136
12	200x200x12	0.5	0.143
	200x250x12	0.833	0.191
	200x300x12	0.909	0.174
	200x350x12	1	0.164
15	200x200x15	0.286	0.082
	200x250x15	0.4	0.092
	200x300x15	0.364	0.07
	200x350x15	0.855	0.14

tabel F.2

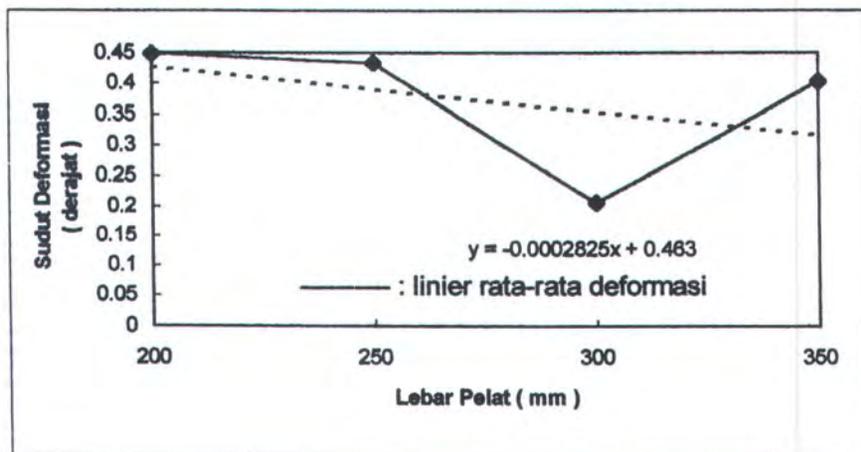
*HASIL PENGUKURAN UNTUK VARIASI PANJANG PELAT (P)*

LAMPFRAN 

LAMPIRAN G : TABEL DAN GAMBAR VARIASI LEBAR PELAT TERHADAP  
SUDUT DEFORMASI

t = 7 mm

Lebar Pelat (mm)	200	250	300	350
Sudut deformasi (°)	0.448	0.433	0.206	0.403

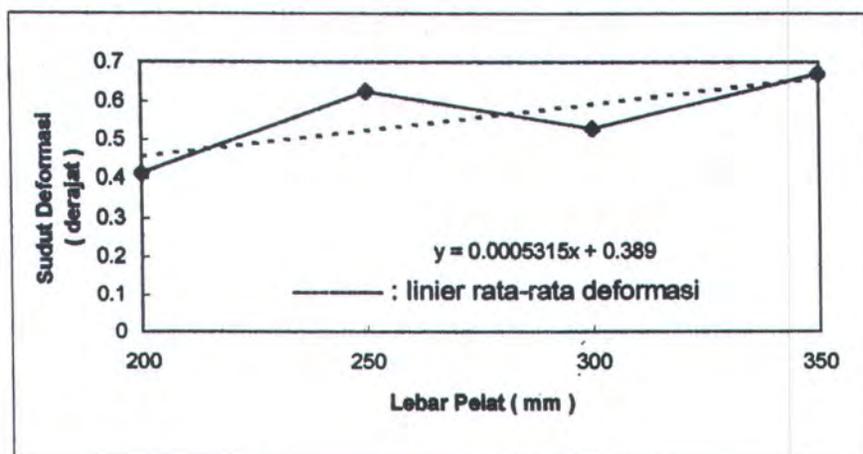


tabel G.1

VARIASI LEBAR PELAT TERHADAP SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL 7 mm

t = 10 mm

Lebar Pelat (mm)	200	250	300	350
Sudut deformasi (°)	0.412	0.625	0.529	0.671

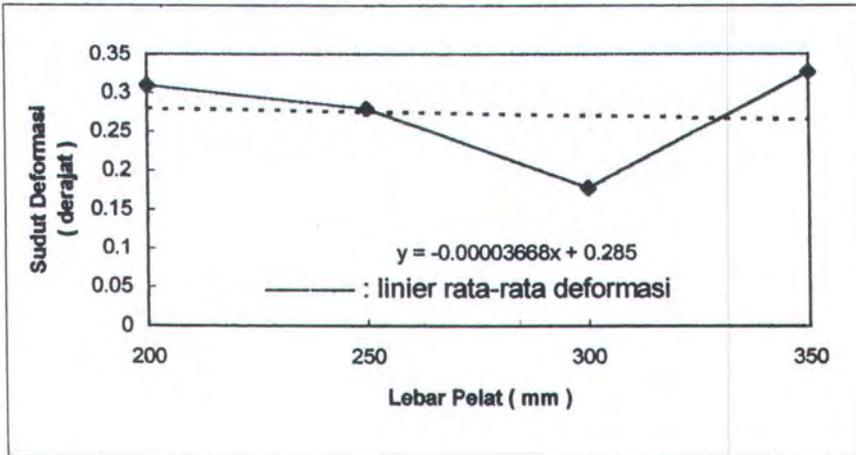


tabel G.2

VARIASI LEBAR PELAT TERHADAP SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL 10 mm

t = 12 mm

Lebar Pelat (mm)	200	250	300	350
Sudut deformasi (°)	0.309	0.279	0.178	0.327

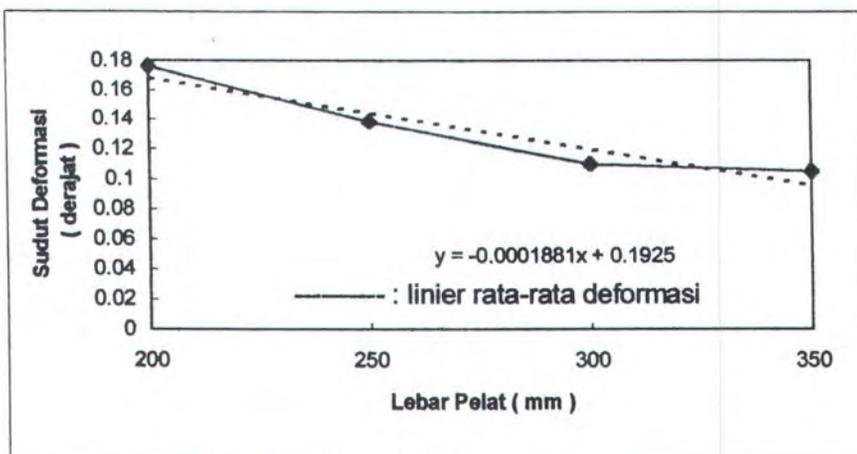


tabel G.3

VARIASI LEBAR PELAT TERHADAP SUDUT DEFORMASI UNTUK 12 mm

t = 15 mm

Lebar Pelat (mm)	200	250	300	350
Sudut deformasi (°)	0.176	0.138	0.11	0.105



tabel G.4

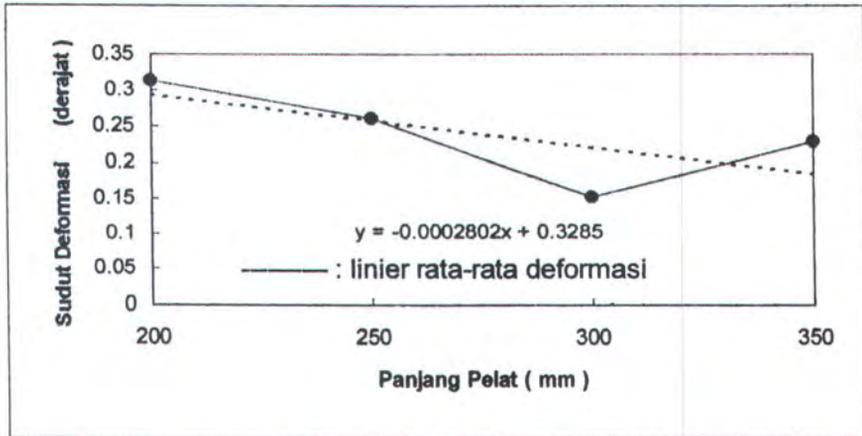
VARIASI LEBAR PELAT TERHADAP SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL 15 mm

LAMPFRAN **H**

LAMPIRAN H : TABEL DAN GAMBAR VARIASI PANJANG PELAT TERHADAP SUDUT DEFORMASI

t = 7 mm

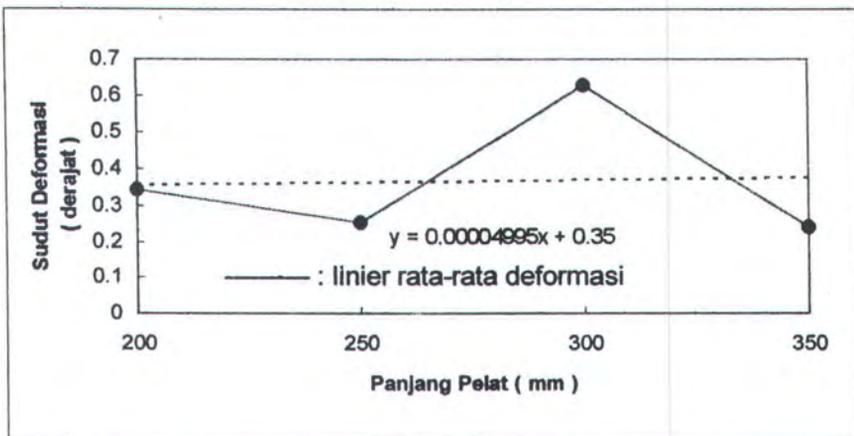
Panjang Pelat (mm)	200	250	300	350
Sudut deformasi (°)	0.313	0.26	0.153	0.229



**gambar H.1**  
*VARIASI PANJANG PELAT TERHADAP SUDUT DEFORMASI*  
*UNTUK TEBAL 7 mm*

t = 10 mm

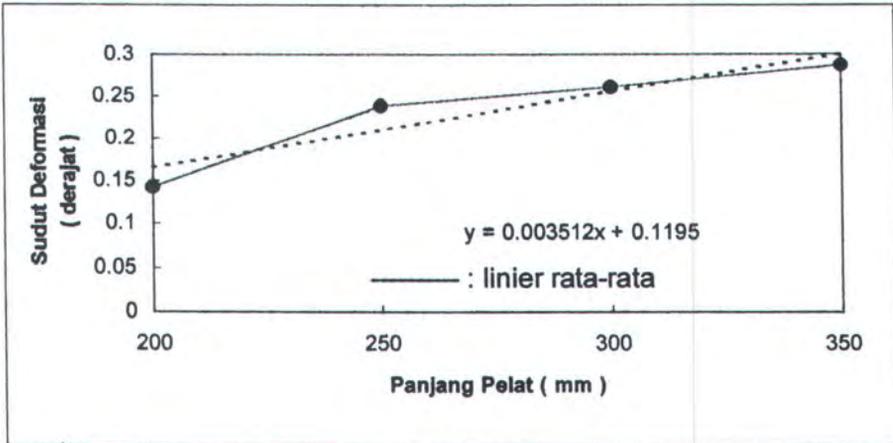
Panjang Pelat (mm)	200	250	300	350
Sudut deformasi (°)	0.344	0.251	0.63	0.239



**gambar H.2**  
*VARIASI PANJANG PELAT TERHADAP SUDUT DEFORMASI*  
*UNTUK TEBAL 10 mm*

$t = 12 \text{ mm}$

Panjang Pelat (mm)	200	250	300	350
Sudut deformasi (°)	0.143	0.239	0.26	0.286

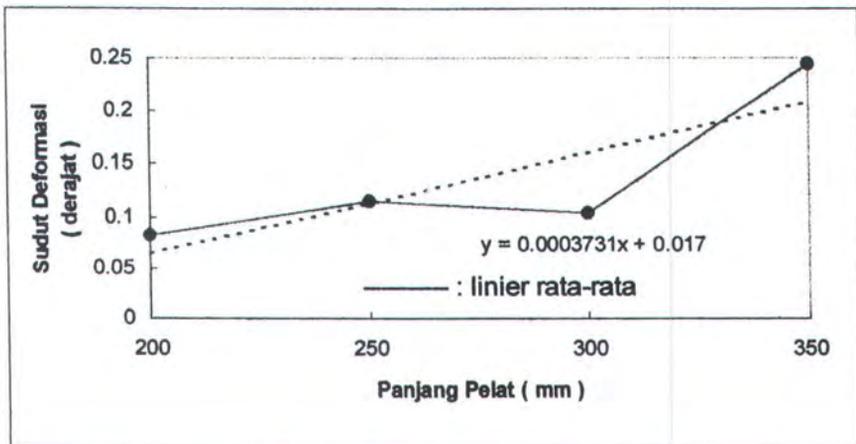


**gambar H.3**

*VARIASI PANJANG PELAT TERHADAP SUDUT DEFORMASI  
UNTUK TEBAL 12 mm*

$t = 15 \text{ mm}$

Panjang Pelat (mm)	200	250	300	350
Sudut deformasi (°)	0.082	0.115	0.104	0.245



**gambar H.4**

*VARIASI PANJANG PELAT TERHADAP SUDUT DEFORMASI  
UNTUK TEBAL 15 mm*

LAMPFRAN **I**



Kemudian diselesaikan dengan eliminasi Matrik Invers, sehingga didapatkan hasil :

$$A0 = 0.000125$$

$$A1 = 0.00076$$

$$A2 = 0.00000715$$

Dengan demikian persamaan garisnya adalah :

$$Y = 0.000125 + 0.00076 X + 7.15E-06 X^2$$

NILAI SUDUT DEFORMASI B YANG DIDAPAT DARI PERSAMAAN GARIS HASIL REGRESI

ket :

*X = Nilai parameter Intensitas Panas ( S ) yang diketahui ( cal/ cm<sup>3</sup> )*

*Y = Besar sudut deformasi ( B ) yang dicari ( derajat )*

X	X <sup>2</sup>	A1 * X	A2 * X <sup>2</sup>	Y
4.392	19.289884	0.00333792	0.000137921	0.206229889
5.232	27.373824	0.00397832	0.000195723	0.246103362
2.798	7.828804	0.00212648	5.59759E-05	0.132154295
3.091	9.554281	0.00234916	6.83131E-05	0.145614368
2.389	5.707321	0.00181564	4.08073E-05	0.113482893
2.521	6.355441	0.00191596	4.54414E-05	0.119493898
1.497	2.241009	0.00113772	1.60232E-05	0.073237111
1.633	2.666889	0.00124108	1.90688E-05	0.079331136

Nilai sudut deformasi B untuk masing - masing ketebalan pelat menjadi :

Sudut untuk tebal t ( mm )	Nomor pass 1 B1 ( derajat )	Nomor pass 2 B2 ( derajat )	Sudut akhir B1 + B2 ( derajat )
7	0.206229889	0.246103362	0.452333351
10	0.132154295	0.145614368	0.277768663
12	0.113482893	0.119493898	0.232978791
15	0.073237111	0.079331136	0.152568247

LAMPFRAN **J**

LAMPIRAN J :TABEL PROSES PERHITUNGAN SUDUT DEFORMASI DENGAN  
METODE PENDEKATAN.

DATA DATA VARIABEL			PERHITUNGAN	
1).	$t_v = 7$	mm	1). $q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V} =$	3213,000
2).	$d_e = 4$	mm	2). $K_r =$	0,300
3).	$l = 450$	A	$q_p' = (1 - K_r)q_p =$	2186,100
4).	$U = 35$	V	$\frac{q_p'}{t^2} =$	4461,429
5).	$V = 1,267$	cm/s	3). $l/d_e =$	112,500
6).	$\alpha = 11,7 \times 10^{-6}$	1/°C	$\psi_0 =$	0,248
7).	$C = 0,167$	cal/g °C	4). $\epsilon_s = \frac{q_p' V^2}{C \gamma T_0 a_0^2} =$	797,597
8).	$\gamma = 7,859$	g/cm <sup>3</sup>	$\eta_0 =$	0,213
9).	$\epsilon_s = 71 \times 10^{-3}$		5). $P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1} =$	169,181
10).	$T_0 = 725$	°C	$p = \frac{1450}{C \gamma T_m} =$	0,718
11).	$a_0 = 0,068$	cm <sup>2</sup> /s	$K_r =$	0,200
12).	$p = 1$		6) $q_p' = (1 - K_r K_r)q_p =$	3020,220
13).	$\eta = 0,85$		$\alpha$	
14).	$T_m = 1539$	°C	7). $s = 100 \frac{q_p'}{C \gamma \epsilon_s} =$	0,013
			8) $S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} =$	4,392
			9). $\beta =$	0,0036
HASIL			sudut deformasi ( $\beta$ ) =	0,0036 radian.

tabel J.1.

PERHITUNGAN SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL PELAT 7 mm  
(Single Pass 1)

DATA-DATA VARIABEL			PERHITUNGAN	
1).	$t_p = 7$	mm	1).	$q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V} = 3570,000$
2).	$d_e = 4$	mm	2).	$K_r = 0,300$
3).	$I = 500$	A		$q_p' = (1 - K_r)q_p = 2499,000$
4).	$U = 35$	V		$\frac{q_p'}{t^2} = 5100,000$
5).	$V = 1,167$	cm/s	3).	$I / d_e = 125,000$
6).	$\alpha = 11,7 \times 10^{-5}$	1/°C		$\psi_0 = 0,275$
7).	$C = 0,167$	cal/g °C	4).	$\epsilon_s = \frac{q_p' V^2}{C \gamma T_0 a_0^2} = 590,000$
8).	$\gamma = 7,859$	g/cm <sup>3</sup>		$\eta_0 = 0,200$
9).	$\epsilon_s = 71 \times 10^{-3}$		5).	$P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1} = 201,399$
10).	$T_0 = 725$	°C		$p = \frac{1450}{C \gamma T_m} = 0,718$
11).	$a_0 = 0,068$	cm <sup>2</sup> /s		$K_r = 0,303$
12).	$p = 1$		6).	$q_p' = (1 - K_r K_r)q_p = 3245,703$
13).	$\eta = 0,85$		7).	$s = 100 \frac{q_p'}{C \gamma \epsilon_s} = 0,013$
14).	$T_m = 1539$	°C	8).	$S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} = 5,233$
			9).	$\beta = 0,0042$
BASIC			sudut deformasi ( $\beta$ ) = 0,0042 radian.	

tabel J.2

PERHITUNGAN SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL PELAT 7 mm  
(single pass 2)

DATA - DATA VARIABEL			PERHITUNGAN		
1)	$t_p = 10$	mm	1).	$q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V} =$	3570,000
2)	$d_c = 4$	mm	2).	$K_f =$	0,300
3)	$l = 500$	A		$q_p' = (1 - K_f)q_p =$	2499,000
4)	$U = 35$	V		$\frac{q_p'}{t^2} =$	2499,000
5)	$V = 1,167$	cm/s	3).	$l/d_c =$	125,000
6)	$\alpha = 11,7 \times 10^{-6}$	1/°C		$\psi_0 =$	0,275
7)	$C = 0,167$	cal/g °C	4).	$\epsilon_s = \frac{q_p' V^2}{C \gamma T_0 a_0^2} =$	773,514
8)	$\gamma = 7,859$	g/cm <sup>3</sup>		$\eta_0 =$	0,214
9)	$\epsilon_s = 71 \times 10^{-3}$	°C	5).	$P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1} =$	105,593
10)	$T_0 = 725$	°C		$p = \frac{1450}{C \gamma T_m} =$	0,718
11)	$a_0 = 0,068$	cm <sup>2</sup> /s		$K_f =$	0,071
12)	$p = 1$		6).	$q_p' = (1 - K_f K_r) q_p =$	3494,387
13)	$\eta = 0,85$			$s = 100 \frac{q_p'}{C \gamma \epsilon_s} =$	0,013
14)	$T_m = 1539$	°C	8).	$S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} =$	2,798
			9).	$\beta =$	0,0023
HASIL			sudut deformasi ( $\beta$ ) = 0,0023 radian.		

tabel J.3

PERHITUNGAN SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL PELAT 10 mm  
(Single pass 1)

DATA-DATA VARIABEL			PERHITUNGAN	
1)	$t_p = 10$	mm	1).	$q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V} = 3927,000$
2)	$d_e = 4$	mm	2).	$K_r = 0,300$
3)	$l = 550$	A		
4)	$U = 35$	V		
5)	$V = 1,167$	cm/s		
6)	$\alpha = 11,7 \times 10^{-6}$	l/°C		
7)	$C = 0,167$	cal/g °C		
8)	$\gamma = 7,859$	g/cm <sup>3</sup>	3).	$l/d_e = 125,000$ $\psi_0 = 0,275$
9)	$\epsilon_s = 71 \times 10^{-3}$			
10)	$T_0 = 725$	°C	4).	$\epsilon = \frac{q_p' V^2}{C \gamma T_0 a_0^2} = 850,866$
11)	$a_0 = 0,068$	cm <sup>2</sup> /s		
12)	$p = 1$			
13)	$\eta = 0,85$			
14)	$T_m = 1539$	°C	5).	$P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1} = 119,409$ $p = \frac{1450}{C \gamma T_m} = 0,718$ $K_r = 0,100$
			6)	$q_p' = (1 - K_r K_r) q_p = 3809,190$
			7).	$s = 100 \frac{\alpha}{C \gamma \epsilon_s} = 0,013$
			8)	$S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} = 3,091$
			9).	$\beta = 0,0025$
HASIL			sudut deformasi ( $\beta$ ) = 0,0025 radian.	

tabel J.4

PERHITUNGAN SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL PELAT 10 mm  
(Single pass 2)

DATA - DATA VARIABEL			PERHITUNGAN	
1).	$t_p = 12$	mm	1). $q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V} =$	4161,600
2).	$d_e = 4$	mm	2). $K_r =$	0,300
3).	$I = 600$	A	$q_p' = (1 - K_r)q_p =$	2913,120
4).	$U = 34$	V	$\frac{q_p'}{t^2} =$	2023,000
5).	$V = 0,967$	cm/s	3). $I/d_e =$	125,000
6).	$\alpha = 11,7 \times 10^{-6}$	1/°C	$\psi_0 =$	0,275
7).	$C = 0,167$	cal/g °C	4). $\epsilon = \frac{q_p' V^2}{C \gamma T_0 a_0^2} =$	619,117
8).	$\gamma = 7,859$	g/cm <sup>3</sup>	$\eta_0 =$	0,220
9).	$\epsilon_s = 64 \times 10^{-3}$		5). $P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1} =$	79,889
10).	$T_0 = 725$	°C	$p = \frac{1450}{C \gamma T_m} =$	0,718
11).	$a_0 = 0,068$	cm <sup>2</sup> /s	$K_r =$	0,050
12).	$p = 1$		6). $q_p' = (1 - K_r K_r)q_p =$	4099,176
13).	$\eta = 0,85$		$\alpha$	
14).	$T_m = 1539$	°C	7). $s = 100 \frac{C \gamma \epsilon_s}{C \gamma \epsilon_s} =$	0,014
			8). $S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} =$	2,389
			9). $\beta =$	0,0019
HASIL			sudut deformasi ( $\beta$ ) =	0,0019 radian.

tabel J.5

PERHITUNGAN SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL PELAT 12 mm  
(Single pass 1)

DATA - DATA VARIABEL			PERHITUNGAN	
1)	$t_e = 12$	mm	1). $q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V} =$	4161,600
2)	$d_e = 4$	mm	2). $K_r =$	0,300
3)	$l = 600$	A	$q_p' = (1 - K_r)q_p =$	2913,120
4)	$U = 34$	V	$\frac{q_p'}{t^2} =$	2023,000
5)	$V = 1,383$	cm/s	3). $l / d_e =$	125,000
6)	$\alpha = 11,7 \times 10^{-6}$	1/°C	$\psi_0 =$	0,275
7)	$C = 0,167$	cal/g °C	4). $\epsilon_s = \frac{q_p' V^2}{C \gamma T_0 a_0^2} =$	1266,378
8)	$\gamma = 7,859$	g/cm <sup>3</sup>	$\eta_0 =$	0,230
9)	$\epsilon_s = 64 \times 10^{-3}$	°C	5). $P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_i} =$	91,872
10)	$T_0 = 725$	°C	$p = \frac{1450}{C \gamma T_m} =$	0,718
11)	$a_0 = 0,068$	cm <sup>2</sup> /s	$K_r =$	0,050
12)	$p = 1$		6). $q_p' = (1 - K_r K_r) q_p =$	4099,176
13)	$\eta = 0,85$		7). $s = 100 \frac{C \gamma \epsilon_s}{C \gamma \epsilon_s} =$	0,014
14)	$T_m = 1539$	°C	8). $S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_i^2} =$	2,521
			9). $\beta =$	0,0003
HASIL			sudut deformasi ( $\beta$ ) =	0,0003 radian.

tabel J.6

PERHITUNGAN SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL PELAT 12 mm  
(Single pass 2)

DATA-DATA VARIABEL			PERHITUNGAN	
1)	$t_p = 15$	mm	1). $q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V} =$	3814,800
2)	$d_c = 4$	mm	2). $K_r =$	0,300
3)	$I = 550$	A	$q_p' = (1 - K_r)q_p =$	2670,360
4)	$U = 34$	V	$\frac{q_p'}{t^2} =$	1186,827
5)	$V = 0,967$	cm/s	3). $I / d_c =$	125,000
6)	$\alpha = 11,7 \times 10^{-6}$	1/°C	$\psi_0 =$	0,275
7)	$C = 0,167$	cal/g °C	4). $\epsilon_s = \frac{q_p' V^2}{C \gamma T_0 a_0^2} =$	567,523
8)	$\gamma = 7,859$	g/cm <sup>3</sup>	$\eta_0 =$	0,200
9)	$\epsilon_s = 59 \times 10^{-3}$		5). $P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1} =$	91,872
10)	$T_0 = 725$	°C	$p = \frac{1450}{C \gamma T_m} =$	0,718
11)	$a_0 = 0,068$	cm <sup>2</sup> /s	$K_r =$	0,000
12)	$p = 1$		6) $q_p' = (1 - K_r K_r)q_p =$	3814,800
13)	$\eta = 0,85$		7). $s = 100 \frac{q_p'}{C \gamma \epsilon_s} =$	0,015
14)	$T_m = 1539$	°C	8) $S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} =$	1,497
			9). $\beta =$	0,0012
HASIL			sudut deformasi ( $\beta$ ) = 0,0012	radian.

tabel J.7

PERHITUNGAN SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL PELAT 15 mm  
(Single pass 1)

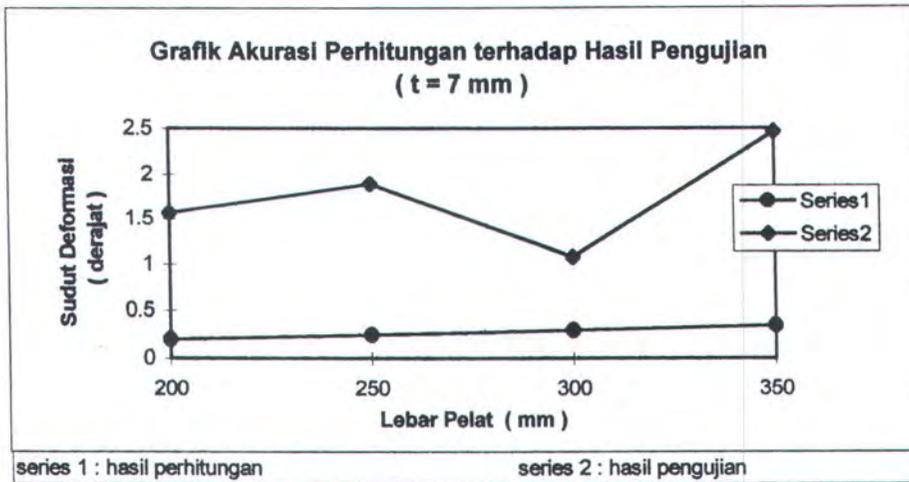
		PERHITUNGAN	
1)	$t_p = 15$ mm	1). $q_p = 0,24 \frac{IU\eta}{V} =$	4161,600
2)	$d_e = 4$ mm	2). $K_r =$	0,300
3)	$I = 600$ A	$q_p' = (1 - K_r)q_p =$	2913,120
4)	$U = 34$ V	$\frac{q_p'}{t^2} =$	1294,720
5)	$V = 0,967$ cm/s	3). $I/d_e =$	125,000
6)	$\alpha = 11,7 \times 10^{-6}$ 1/°C	$\psi_0 =$	0,275
7)	$C = 0,167$ cal/g °C	4). $\epsilon = \frac{q_p' V^2}{C \gamma T_0 a_0^2} =$	619,116
8)	$\gamma = 7,859$ g/cm <sup>3</sup>	$\eta_0 =$	0,207
9)	$\epsilon_r = 59 \times 10^{-3}$	5). $P = p \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1} =$	52,918
10)	$T_0 = 725$ °C	$p = \frac{1450}{C \gamma T_m} =$	0,718
11)	$a_0 = 0,068$ cm <sup>2</sup> /s	$K_r =$	0,000
12)	$p = 1$	6). $q_p' = (1 - K_r K_r)q_p =$	4161,600
13)	$\eta = 0,85$	7). $s = 100 \frac{\alpha}{C \gamma \epsilon_s} =$	0,015
14)	$T_m = 1539$ °C	8). $S = s \psi_0 \eta_0 \frac{q_p'}{t_1^2} =$	1,663
		9). $\beta =$	0,0014
<b>HASIL</b>		sudut deformasi ( $\beta$ ) =	0,0014 radian.

tabel J.8

PERHITUNGAN SUDUT DEFORMASI UNTUK TEBAL PELAT 15 mm  
(Single pass 2)

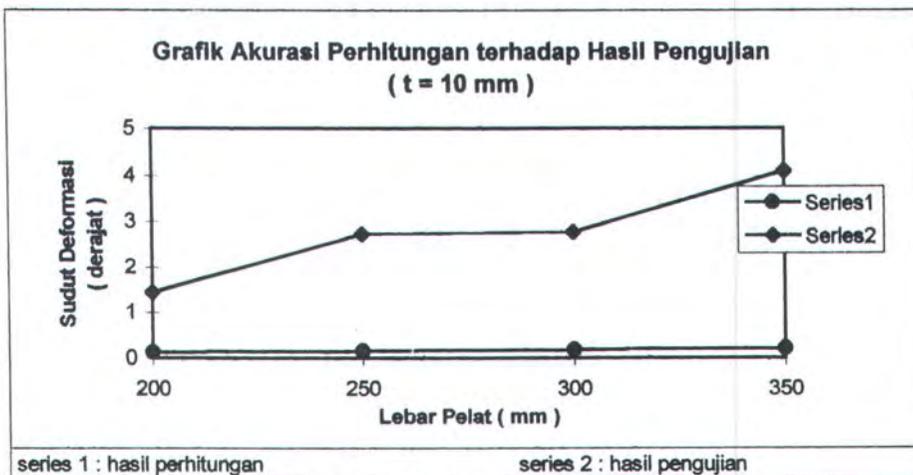
LAMPFRAN **K**

LAMPIRAN K : GAMBAR GRAFIK AKURASI PERHITUNGAN TERHADAP  
TINGGI DEFORMASI MAKSIMUM DAN LEBAR PELAT HASIL  
PENGUJIAN



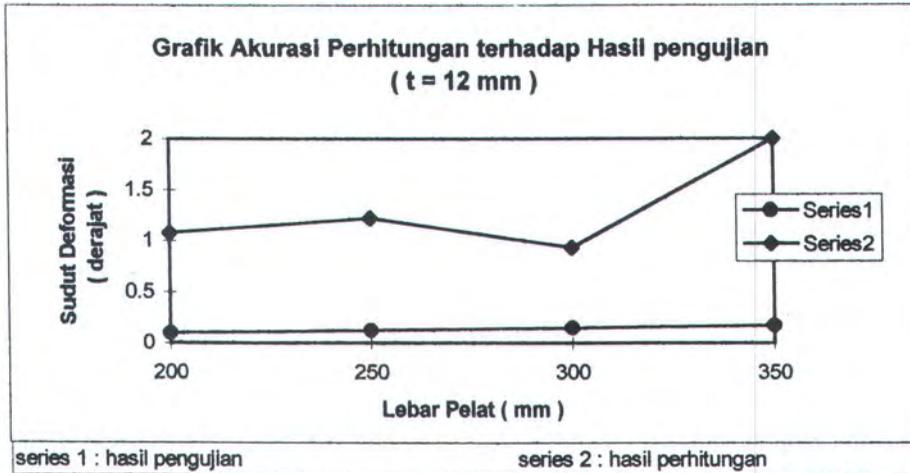
**gambar K.1**

*GRAFIK AKURASI PERHITUNGAN TERHADAP HASIL PENGUJIAN  
UNTUK TEBAL PELAT 7 mm*

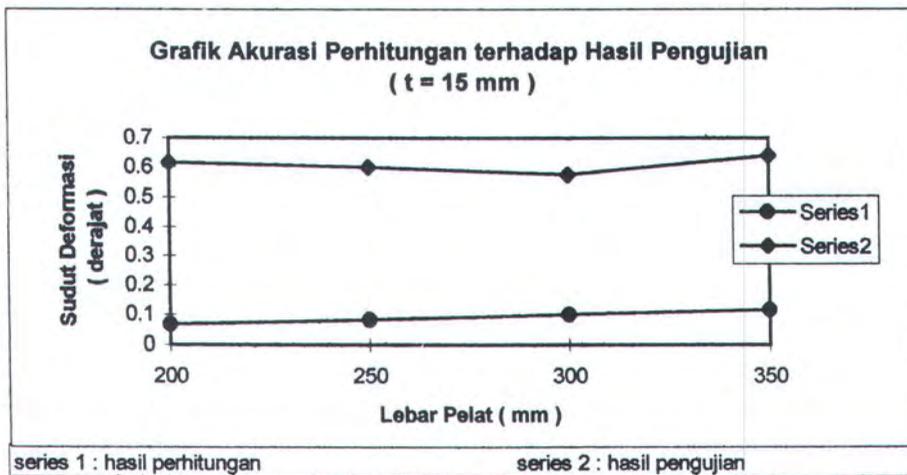


**gambar K.2**

*GRAFIK AKURASI PERHITUNGAN TERHADAP HASIL PENGUJIAN  
UNTUK TEBAL PELAT 10 mm*



**gambar K.3**  
**GRAFIK AKURASI PERHITUNGAN TERHADAP HASIL PENGUJIAN**  
**UNTUK TEBAL PELAT 12 mm**



**gambar K.4**  
**GRAFIK AKURASI PERHITUNGAN TERHADAP HASIL PENGUJIAN**  
**UNTUK TEBAL PELAT 15 mm**

LAMPFRAN **L**

**LAMPIRAN L : PERHITUNGAN PROSENTASE KECENDERUNGAN****GRAFIK REGRESI LINIER ORDE SATU****( Program *TRENDLINE CHART : LINIER TREND/ TYPE* )****1. Berdasarkan gambar grafik dari lampiran G dan H :**a. persamaan regresi garis linier ( gbr. G.1.) :  $Y = -0.0002825 X + 0.469$ 

$$X = 200 , Y = 0.4125$$

$$X = 350 , Y = 0.3701$$

kecenderungan : - 0.1027

prosentase : 10.27 % ( menurun )

b. persamaan regresi garis linier ( gbr. G.2.) :  $Y = 0.0005315 X + 0.489$ 

$$X = 200 , Y = 0.5953$$

$$X = 350 , Y = 0.675$$

kecenderungan : 0.1339

prosentase : 13.39 % ( meningkat )

c. persamaan regresi garis linier ( gbr. G.3.) :  $Y = -0.00003668 X + 0.285$ 

$$X = 200 , Y = 0.2777$$

$$X = 350 , Y = 0.2722$$

kecenderungan : -0.0198

prosentase : 1.98 % ( menurun )

d. persamaan regresi garis linier ( gbr. G.4.) :  $Y = -0.0001881 X + 0.1925$ 

$$X = 200 , Y = 0.1549$$

$$X = 350, Y = 0.1267$$

kecenderungan : -0.1821

prosentase : 18.21 % (menurun)

e. persamaan regresi garis linier ( gbr. H.1.) :  $Y = -0.0002802 X + 0.3285$

$$X = 200, Y = 0.2725$$

$$X = 350, Y = 0.23043$$

kecenderungan : -0.1544

prosentase : 15.44 % (menurun)

f. persamaan regresi garis linier ( gbr. H.2.) :  $Y = -0.00004995 X + 0.35$

$$X = 200, Y = 0.34$$

$$X = 350, Y = 0.3325$$

kecenderungan : -0.022

prosentase : 2.2 % (menurun)

g. persamaan regresi garis linier ( gbr. H.3.) :  $Y = 0.0003512 X + 0.1195$

$$X = 200, Y = 0.1897$$

$$X = 350, Y = 0.2424$$

kecenderungan : 0.278

prosentase : 27.8 % (meningkat)

h. persamaan regresi garis linier ( gbr. H.4.) :  $Y = 0.0003731 X + 0.017$

$$X = 200, Y = 0.0916$$

$$X = 350, Y = 0.1476$$

kecenderungan : 0.6112

prosentase : 61.12 % ( meningkat )

**2. Berdasarkan gambar 6.2. ( Bab VI ) :**

a. persamaan regresi garis linier :  $Y = -0.0007079 X + 0.505$

$X = 200$  ,  $Y = 0.3634$

$X = 350$  ,  $Y = 0.2572$

kecenderungan : -0.2921

prosentase : 29.21 % ( menurun ).

LAMPFRAN **VI**

LAMPIRAN M : PERHITUNGAN PENGUJIAN TINGKAT AKURASI DENGAN  
 METODE *KOEFISIEN KORELASI SPEARMAN* UNTUK TARAF  
 SIGNIFIKASI ( $\alpha$ ) 0.05.

1. Uji Akurasi terhadap Variabel Tinggi Deformasi Maksimum

$$\alpha = 0.05 \quad ; \quad r' = 1 - \frac{6 \sum b^2}{n(n^2 - 1)}$$

Ho : tidak ada persamaan antara kedua hasil perlakuan ( $r'$  perhitungan  $>$   $r'$  tabel )

Hi : terdapat persamaan antara kedua hasil perlakuan ( $r'$  perhitungan  $\leq$   $r'$  tabel )

Maksimum Tinggi Deformasi $fB = Bb/8$ ( metode ); ( mm )	Maksimum Tinggi Deformasi $fB$ ( ukur ); ( mm )	Beda (bi) (Xi-Yi)	Beda ( bi <sup>2</sup> )
0.1974475	1.563	-1.365553	1.86473363
0.246808873	1.889	-1.642191	2.6967917
0.296170648	1.077	-0.780829	0.60969448
0.345532423	2.462	-2.116468	4.47943501
0.121248226	1.438	-1.316752	1.73383523
0.151560283	2.727	-2.57544	6.63288974
0.18187234	2.77	-2.588128	6.69840479
0.212184396	4.1	-3.887816	15.1151102
0.101696219	1.077	-0.975304	0.95121747
0.127120273	1.219	-1.09188	1.19220134
0.152544328	0.933	-0.780456	0.60911106
0.177968383	2	-1.822032	3.31979921
0.066597251	0.615	-0.548403	0.30074558
0.083246564	0.6	-0.516753	0.26703411
0.099895876	0.575	-0.475104	0.22572393
0.116545189	0.64	-0.523455	0.27400494
		Jumlah =	46.9707324

$$n = 16$$

$$r' = 0.930925$$

dari tabel : *Batas Nilai Kritis untuk Uji Korelasi Berdasarkan Koefisien Korelasi Rank* ( Hoel, P.G., 1960 ) ( lihat tabel M.1 ).

$r'$  tabel ( $\alpha = 0.05 ; n = 16$ ) = 0.425

$r'$  perhitungan >  $r'$  tabel :  $H_0$  diterima

kesimpulan : Hasil akurasi metode ditolak.

## 2. Uji Akurasi terhadap Variabel Sudut Deformasi

$$\alpha = 0.05 \quad ; \quad r' = 1 - \frac{6 \sum b_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

$H_0$  : tidak ada persamaan antara kedua hasil perlakuan ( $r'$  perhitungan >  $r'$  tabel)

$H_1$  : terdapat persamaan antara kedua hasil perlakuan ( $r'$  perhitungan  $\leq$   $r'$  tabel)

Sudut Deformasi Perhitungan (derajat)	Sudut Deformasi Pengukuran (derajat)	Beda (bi) (Xi-Yi)	Beda (bi <sup>2</sup> )
0.452333351	0.3805	0.0718334	0.00516003
0.277738663	0.378	-0.100261	0.01005234
0.232976791	0.226	0.0069768	4.8676E-05
0.152568247	0.129	0.0235682	0.00055546
		<b>Jumlah =</b>	0.0158165

$n = 4$

$r' = 0.99841835$

dari tabel : *Batas Nilai Kritis untuk Uji Korelasi Berdasarkan Koefisien Korelasi Rank (Hoel, P.G., 1960) (lihat tabel M.1).*

$r'$  tabel ( $\alpha = 0.05 ; n = 4$ ) = 1.000

$r'$  perhitungan <  $r'$  tabel :  $H_0$  ditolak

kesimpulan : Hasil akurasi metode diterima .

UKURAN SAMPEL (n)	NILAI KRITIS UNTUK TARAF NYATA $\alpha = 0.01$	NILAI KRITIS UNTUK TARAF NYATA $\alpha = 0.05$
4	---	1.000
5	1.000	0.900
6	0.943	0.829
7	0.893	0.714
8	0.833	0.643
9	0.783	0.600
10	0.746	0.564
12	0.701	0.504
14	0.645	0.456
16	0.601	0.425
18	0.564	0.399
20	0.534	0.377
22	0.508	0.359
24	0.485	0.343
26	0.465	0.329
28	0.448	0.317
30	0.432	0.306

tabel M.1

BATAS NILAI KRITIS UNTUK UJI KORELASI BERDASARKAN KOEFISIEN  
KORELASI RANK. (Hoel, P., G., 1960)

LAMPFRAN **N**



PT.

HEAD OFFICE : Cilegon - West Java  
 Phone : 5202869 (4 lines), 5202873 (5 lines)  
 Facsimile : 348275, 5203159, 5203181, 5202883  
 Telex : 45595, 44490 KS LOG IA - 45533 KS PROD IA  
 P.O. Box : 14 Cilegon

PURCHASER :

NO. : C1F129101127908/MC/DM/XII/91  
 : DECEMBER 10, 1991

SUPPLIER D.NO. :  
 COMMODITY D.NO. :

SPECIFICATION R : F129101 ✓

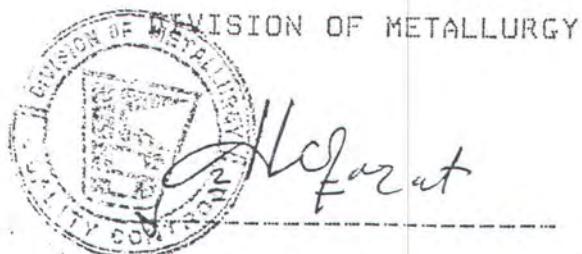
PAGE : 001 OF 002

HEAT NO.	(%)	TENSILE TEST			IMPACT	REMARK		
		L	RE	RM	A		TEST	
			[N/MM2]	[N/MM2]	(%)	AVG	°C	REF
79800B ✓	4.4		344	472	21			
"	"		"	"	"			
"	"		"	"	"			
"	"		354	"	25			
"	"		"	"	"			
81474B ✓	4.0		343	487	22			
61891B ✓	5.0		319	452	25			
"	"		"	"	"			
61893B ✓	"		317	454	24			
81775B ✓	5.0		322	465	20			
"	5.6		314	467	22			
"	"		"	"	"			
"	"		324	466	25			
51007B ✓	5.1		334	473	23			
61892B ✓	4.8		303	447	24			
"	"		"	"	"			
"	"		299	441	24			
"	"		"	"	"			
"	"		"	"	"			

NOTES : R=

SUR  
 BIRO KLASIF

*MTC*



P.T. DIKARTASIA COMPUTER SUPPLIES B (1/99)



**p.t. k**

Jakarta Office : Office : Industrial Steel Complex, Cilegon, Jawa Barat  
Phone : 5202883 (4 lines), 5202873 (5 lines)  
Telex : 45595, 44490 KSLOG IA - 45533 KSPROD IA PO Box : 14 Cilegon  
Facsimile : 348275, 5203159, 5203181, 5202883

(2)

PURCHASER :

Order No. : C1F128301126438/MC/DM/X/91  
Date : OCTOBER 23, 1991

SUPPLIER : 0.:

COMMODITY : 0.:

0.:

SPECIFICATION : F128301 ✓

PAGE : 001 OF 001

HEAT NO.	SL/NO	TENSILE TEST			IMPACT	REMARK
		RE	RM	A	TEST	
		N/MM2	N/MM2	(%)	AVG   °C	REF
79350B ✓	11					
79348B ✓	13	330	473	20		
"	"	312	450	20		
50456A ✓	13	"	"	"		
"	"	317	467	22		
"	"	"	"	"		
81036B ✓	31	"	"	"		
61133B ✓	11	285	439	23		
"	"	306	451	25		
"	"	"	"	"		
"	"	"	"	"		
"	"	"	"	"		
50394B ✓	54	"	"	"		
"	"	317	468	23		
81072A ✓	11	"	"	"		
"	"	348	480	23		
61186B ✓	11	"	"	"		
50527B ✓	31	288	430	22		
"	"	298	435	25		

NOTES : R=KI

SURVEI  
BIRO KLASIFIKASI



DIVISION OF METALLURGY

*Handwritten signature*