

## Simulasi Distribusi Tegangan Sisa Dalam Proses Pengelasan Plat Dengan Metode Elemen Hingga

Utaja<sup>1)</sup> dan B. Bandriyana<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir - Badan Tenaga Nuklir Nasional

<sup>2)</sup> Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir- Badan Tenaga Nuklir Nasional

### ABSTRAK

Simulasi dan pemodelan dilakukan untuk menghitung distribusi tegangan sisa dalam proses pengelasan pelat. Perhitungan dilakukan untuk 3 macam tipe sambungan tumpu (butt welded joint) yaitu tipe I, tipe V dan tipe Y. Untuk model perhitungan ditentukan pelat dari baja St E460 dengan tebal sama 16 mm, sedangkan material standard las dengan data koefisien konduksi panas,  $k = 12 \times 10^6 \text{ W/}^\circ\text{K.m}^2$ , dan angka muai termal,  $\alpha = 10 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$ . Tegangan sisa dihitung berdasarkan iterasi regangan yang timbul akibat distribusi suhu selama pendinginan dari suhu pengelasan sebesar  $2500^\circ\text{C}$  menuju temperatur ruang dengan model perhitungan kondisi transient. Perhitungan berdasarkan metode elemen hingga dengan program ANSYS 5.4. model 2 dimensi. Distribusi tegangan menunjukkan harga tegangan total pada bahan las berkisar antara 100 sampai dengan 550 MPa, bergantung pada tipe sambungan las.

**Kata kunci :** tegangan sisa, pengelasan, elemen hingga

### ABSTRACT

Simulation of Residual Stress Distribution on Welding Process For Plate Using Finite Element Method. Simulation and modeling were performed to calculate the residual stress on plate welding. The calculation was carried out on the 3 kinds of butt welding types of I, V and Y type. The steel plate St E460 with 16 mm thick, and the welding material standard with the heat conductivity of  $k = 12 \times 10^6 \text{ W/}^\circ\text{K.m}^2$  and thermal expansion of  $\alpha = 10 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$  were used as a model. The residual stress was calculated by iteration of the strain which was obtained from the temperature distribution during the cooling process on the welding temperature of  $2500^\circ\text{C}$  to the room temperature by the transient calculation model. The calculation was done by the finite element method using the 2 dimension modeling of ANSYS 5.4. program. The stress distribution showed the residual stress on the welded area was 100 to 550 MPa, depends on the welded junction type.

**Key words :** residual stress, welding, finite element

### 1. PENDAHULUAN

Penyambungan logam dengan pengelasan banyak digunakan dalam berbagai bidang manufaktur dan industri, karena dapat menghasilkan efisiensi sambungan dan tingkat kerapatan yang tinggi, dengan biaya fabrikasi yang relatif kecil. Meskipun demikian, akibat pengelasan akan terjadi tegangan sisa yang timbul karena pemanasan lokal

dalam proses pengelasan dan pendinginan yang cepat. Tegangan sisa yang terjadi pada kampuh las ini dapat menyebabkan getas material, kegagalan fatik atau terjadi SCC (*Stress Corrosion Crack*) dan dapat mengurangi kekuatan dari struktur dan komponen.<sup>[1]</sup> Oleh karena itu tegangan sisa dalam pengelasan perlu dihilangkan sampai sekecil mungkin untuk mengurangi kegagalan desain suatu komponen.

Beberapa penyelidikan dan beberapa metode telah dikembangkan untuk mengurangi tegangan sisa yang dilakukan dengan proses pengolahan setelah pengelasan (*post welding*), diantaranya proses pengolahan panas, *hammering*, pemanasan awal, dan *vibration stress relieving*. Untuk beberapa konstruksi metode dan teknik pengurangan tegangan sisa tersebut kadang-kadang sulit dilakukan sehingga faktor untuk mengurangi tegangan sisa perlu dilakukan dengan pemilihan siklus pengelasan. Oleh karena itu prediksi besar dan distribusi tegangan sisa pada pengelasan perlu diketahui untuk mendukung peningkatan efisiensi dan kekuatan sambungan las.

Prediksi untuk menentukan tegangan sisa dalam pengelasan ini cukup sulit karena berkaitan dengan perubahan sifat mekanik dan termal dari material akibat temperatur lokal yang tinggi dan terjadinya pergerakan dari sumber panas. Salah satu metode yang dikembangkan untuk menghitung besarnya tegangan sisa adalah dengan berdasarkan pada metode elemen hingga. Hasil dan ketelitian dalam perhitungan akan dipengaruhi oleh asumsi yang digunakan untuk model beban pemanasan.

Berdasarkan asumsi yang dipilih dalam perhitungan dapat dilakukan perhitungan tegangan sisa pada berbagai macam bentuk pengelasan. Dalam makalah ini diuraikan teknik penentuan dan perhitungan distribusi tegangan sisa pada pengelasan plat dengan beberapa tipe sambungan *butt weld*. Teknik perhitungan dilakukan dengan metode elemen hingga dengan simulasi menggunakan program ANSYS 5.4. Tujuan dari perhitungan ini untuk memberikan dasar analisis dalam perhitungan awal untuk bisa dikembangkan dengan asumsi dan perhitungan yang lebih teliti sehingga berguna dalam memilih tipe las yang menghasilkan tegangan sisa minimal.

## 2. DASAR TEORI

Perhitungan tegangan sisa dengan metode elemen hingga didasarkan pada perhitungan regangan pada komponen yang diperoleh dari hasil penggabungan dari regangan tiap elemen. Untuk menyelesaikan distribusi regangan dalam komponen digunakan perumusan dan model matematik distribusi regangan dengan menggunakan prinsip energi potensial minimum pada elemen.

Dari penyelesaian matematis dengan memasukkan harga energi dalam dan besarnya kerja oleh gaya luar akan diperoleh persamaan dalam bentuk matrik untuk satu elemen dan bentuk matrik total yang merupakan penggabungan (*assemblage*) matrik elemen. Tegangan sisa yang timbul akibat pengelasan dihitung berdasarkan distribusi regangan yang timbul akibat distribusi suhu yang tidak merata karena perbedaan angka muai bahan. Secara garis besar rumus dasar untuk menghitung tegangan sisa pada proses pengelasan dapat dituliskan dalam rumusan bentuk perkalian matrik dan transpose sebagai berikut:<sup>[2,3]</sup>

$$\sigma = D \epsilon = D [\alpha \Delta T \quad \alpha \Delta T \quad \theta]^T \quad \dots(1)$$

dengan:

$E$  = modulus elastisitas bahan ,

$\alpha$  = angka muai bahan

$\Delta T$  = beda suhu,

$\epsilon$  = matrik regangan akibat suhu

$D$  = matrik konstanta bergantung pada bahan, (angka Poisson:  $\nu$ )

$$D = E/(1-\nu^2) \begin{vmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{vmatrix}$$

.....(2)

Penyelesaian dari rumus matematis dalam bentuk matrik pada rumus (1) dan (2) dapat dilakukan dengan program komputer dengan menghitung metode dekomposisi LU. Selanjutnya untuk penyelesaian dilakukan dengan

menghitung distribusi suhu sebagai beban yang menimbulkan regangan dan tegangan akibat beda suhu dengan temperatur dasar dan perbedaan angka muai material. Untuk program ANSYS 5.4 dapat diperoleh hasil akhir berupa nilai dan distribusi tegangan dan regangan pada seluruh sampel.

### 3. METODA DAN TATA KERJA

#### Metoda perhitungan

Distribusi tegangan sisa ditentukan dengan menghitung distribusi suhu dan perhitungan tegangan mengikuti analisis struktur. Analisis perhitungan dilakukan berdasar rumus (1) dan (2) dengan model perhitungan untuk distribusi suhu dan model perhitungan struktur.<sup>[4]</sup>

#### Model termal untuk perhitungan distribusi suhu

Asumsi yang diambil dalam perhitungan ini adalah, beban termal akibat proses pengelasan diambil merata yang kemudian mengalami pendinginan dengan konveksi bebas dari udara menuju suhu ruang dengan perpindahan panas transien. Dalam perhitungan ini dianggap suhu pengelasan sebesar 2500°C terjadi pada kampuh setelah selesai pengelasan. Pengaruh kenaikan suhu pada tiap langkah dan tiap siklus pengelasan dianggap terjadi dalam waktu singkat dan tidak diperhitungkan. Penurunan suhu menuju kondisi setimbang pada suhu ruang dihitung dengan perpindahan panas konveksi ke udara luar secara bebas dan konduksi ke plat. Angka konveksi untuk perhitungan diambil sebesar 15 W/ m<sup>2</sup>°K. Distribusi suhu pada setiap interval waktu akibat penurunan suhu dihitung dan digunakan sebagai data masukan untuk perhitungan tegangan sisa.

#### Model struktur untuk perhitungan tegangan sisa

Distribusi suhu pada setiap langkah yang dihitung pada analisis termal digunakan sebagai masukan untuk perhitungan tegangan sisa. Tegangan sisa

yang terjadi merupakan akumulasi tegangan sisa dari interval pendinginan setelah proses pengelasan menuju suhu ruang yang dihitung dengan model 2 dimensi menggunakan program ANSYS.

#### Tata kerja

Simulasi perhitungan dengan program ANSYS setelah menentukan beberapa asumsi, dilakukan berdasarkan urutan perhitungan yang baku, yaitu: pembuatan geometri model, meshing, penentuan beban dan syarat batas dan operasi perhitungan serta interpretasi hasil perhitungan.

#### Pembuatan geometri model

Untuk analisis dibuat model pengelasan plat baja dengan tebal 16 mm, dibuat 3 tipe kampuh las yaitu tipe I, tipe V dan tipe Y. Kampuh tipe I dengan lebar 2mm biasanya untuk simulasi pengelasan dengan laser. Tipe V dengan lebar ujung V bawah 2 mm dan sudut 60° untuk simulasi pengelasan dengan las listrik, MIG/Tig. Tipe Y Y ditentukan dari gabungan tipe V dengan tinggi 10 mm dan tipe I tinggi 6 mm.

#### Data material

Material yang digunakan dari baja St E460 dengan data sifat material yang diperlukan untuk analisis seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.<sup>[5]</sup>

Tabel 1. Sifat material pelat dan bahan las

Deskripsi	Plat	Las
Modulus Young, E (N/mm <sup>2</sup> )	215000	2150000
Angka Poison, $\nu$	0,3	0,3
Densitas, $\rho$ (kg/ m <sup>3</sup> )	7180	6000
Koefisien muai termal, $\alpha$ (1/°K)	14x10 <sup>-6</sup>	10x 10 <sup>-6</sup>
Konduktivitas panas, k ( W/°K)	10x10 <sup>5</sup>	12x10 <sup>6</sup>

### Meshing

Meshing dilakukan bergantian untuk pelat dengan material baja St E460 kemudian untuk kampuh las dengan material las. Untuk perhitungan distribusi suhu *meshing* menggunakan elemen tipe PLANE 55 untuk perhitungan tegangan digunakan tipe elemen untuk struktur yaitu PLANE 42.<sup>[4, 6]</sup>

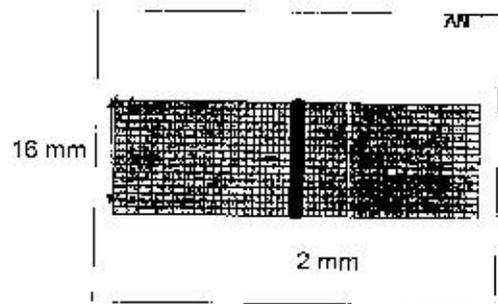
### Beban dan syarat batas

Perhitungan distribusi suhu dan perhitungan tegangan sisa dilakukan berdasarkan asumsi adanya beban termal akibat suhu pengelasan. Suhu las sebesar 2500°C yang dianggap merata pada seluruh kampuh kemudian mengalami penurunan suhu akibat konveksi dengan udara luar dan konduksi pada plat. Bagian ujung kiri pelat dari pada titik tengahnya dipegang dan ditahan sehingga tidak ada pergerakan (*displacement*) ke arah X dan arah Y atau  $D_x$  dan  $D_y = 0$ . Pada ujung kedua titik dilakukan penahanan gerakan ke arah memanjang.  $D_x=0$ . Pada ujung kanan plat dilakukan pemegangan sehingga pergerakan ke arah melintang ( $Y$ ) = 0. Hasil pemodelan geometris, *meshing*, pembebanan dan syarat batas untuk perhitungan ditunjukkan pada Gambar 1.

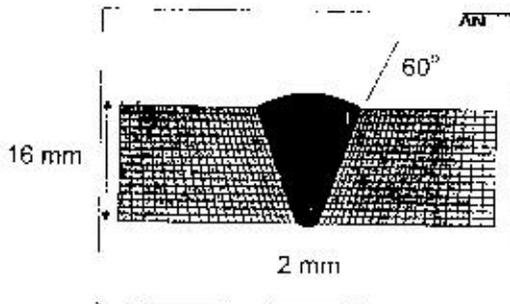
### Input File untuk analisis

```
Salah satu bagian contoh input file (kampuh tipe V)
!filename: v joint-residual stress
!unit: var1
!*simulasi residual stress akibat
pengelasan pada tipe joint V
!*element = 896 element
!*tiap element 2 dimensi; PLANE55 dan
PLANE42
!*material dasar: StE 460
!*****
/PREP7
!*thermal calculation
!*MATERIAL PROPERTIES
!*mat 1 = StE 460 (based material)
MP,EX,1,215000,
MP,ALPX,1,14e-6,
MP,DENS,1,7150e-18,
MP,KXX,1,10.9e6,
MP,C,1,400e12,
TBOAT,,500,0
!*element type for thermal
!*2 dimensional plate 4 nodes
```

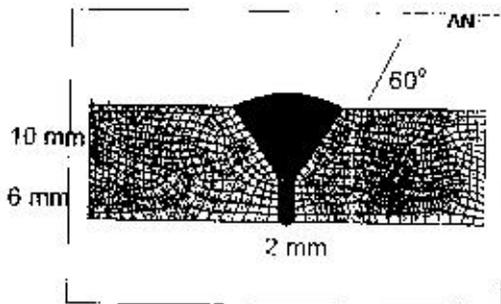
```
ET,1,PLANE55
!* geometry
!*line generate
LSTR,2,21
BSPJTN,11,12,13
!*area generate
AL,1,2,4,3
!*meshing of areas
MSIZE,ALL,,,16
MAT,1
MSKEY,0
AMESH,1
!*solution phase
/SOLU
! *****
ANTYP,TRANS
!*stationer heating
TIMINT,OFF
TIME,1E-6
D,ALL,TEMP,2500
D,ADD,ORMP,30
SOLVE
!*cooling in 3600 sec
TIMINT,ON
TIME,3600
D,ALL,TEMP,30
NSOUS0,10,50,5
SOLVE
/PREP7
!*change of element type to structural
!*Elementtype PLANE42
ET,1,PLANE42,,,2
/SOLU
! *****
!*boundary condition
NSRF,8,LOC,X,25
D,ADD,CX,0,
CP,2,CX,AD1
NSRF,8,LOC,Y,-8
D,ADD,OY,0,
/LOADING of Temperature
NSGRO,CN
solve
```



Kampuh las tipe-I



Kampuh las tipe-V

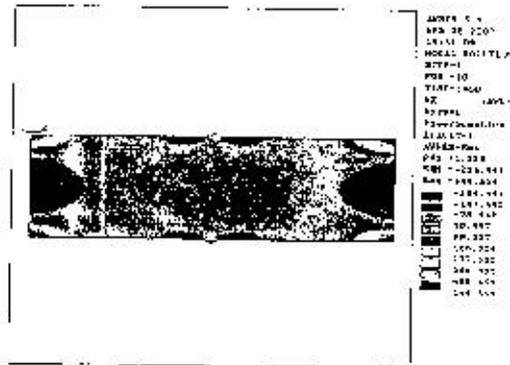


Kampuh las tipe-Y

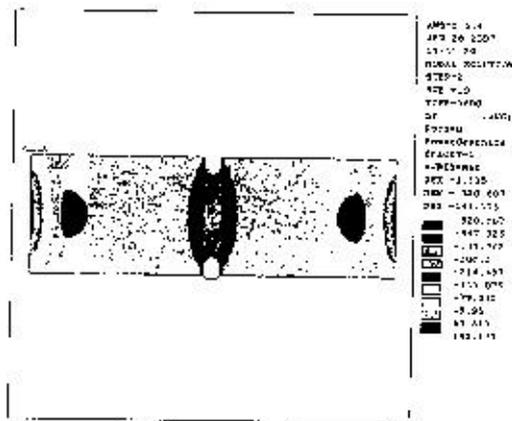
Gambar 1. Geometri sambungan las pada plat

**4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

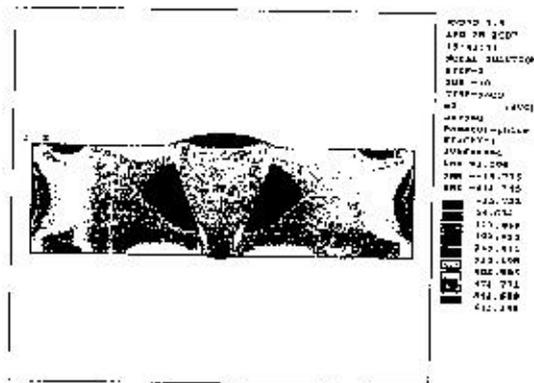
Dari hasil perhitungan dengan program ANSYS diperoleh data distribusi tegangan dan regangan baik dalam arah memanjang (X) arah melintang (Y) ataupun totalnya. Data sebagian hasil perhitungan disajikan dalam Gambar 2, 3 dan 4.



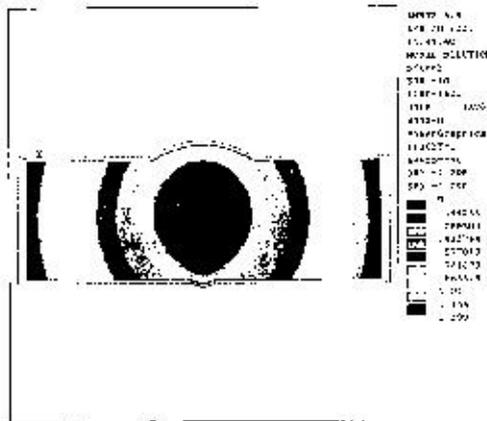
Gambar 2a. Distribusi tegangan sisa arah-X, pengelasan tipe-I



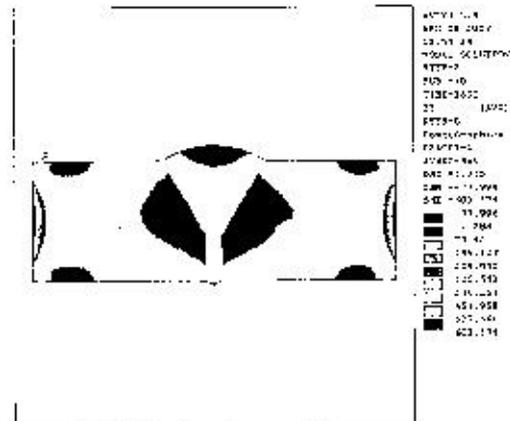
Gambar 2b. Distribusi tegangan sisa arah-Y, pengelasan tipe-I



Gambar 3a. Distribusi tegangan sisa total, pengelasan tipe-V



Gambar 3b. Distribusi regangan sisa total, pengelasan tipe-V

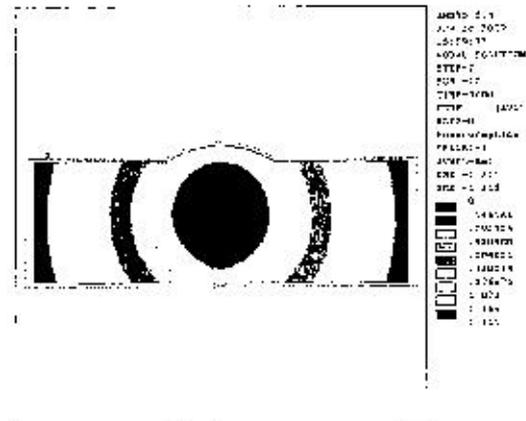


Gambar 4a. Distribusi tegangan sisa total, pengelasan tipe-Y

Dari Gambar 2a dan 2b diperoleh harga tegangan sisa maksimum ke arah-X adalah sekitar 100 MPa, sedang ke arah Y sekitar -300 MPa atau berupa tegangan tarik. Pada daerah perbatasan las dan material plat tegangan maksimum arah X sekitar -76 MPa dan pada arah Y sekitar 140 MPa.

Gambar 3 menunjukkan distribusi tegangan sisa total dan regangan total pada pengelasan tipe-V. Dari Gambar 3a diperoleh harga tegangan sisa total maksimum di bagian las maupun di daerah perbatasan dengan material sampai dengan 500 MPa. Besarnya pergeseran maksimum di bagian las sekitar 0,26 sedangkan di daerah perbatasan dengan material mencapai 0,57 seperti ditunjukkan pada Gambar 4a.

Gambar 4 juga menunjukkan distribusi tegangan sisa total dan regangan total pada pengelasan tipe-Y. Dari Gambar 4a diperoleh harga tegangan sisa total maksimum di bagian las maupun di daerah perbatasan dengan material sampai dengan 550 MPa. Besarnya pergeseran maksimum seperti ditunjukkan dalam Gambar 4b, di bagian las sekitar 0,14 mm sedangkan di daerah perbatasan dengan material mencapai 0,20 mm.



Gambar 4b. Distribusi tegangan sisa total, pengelasan tipe-Y

Distribusi dan nilai dari masing-masing tegangan dan pergeseran dipengaruhi oleh bentuk kampuh lasnya meskipun geometri, bahan yang dilas dan temperatur pengelasan dianggap sama. Tegangan sisa maksimum yang terjadi dalam kampuh las, untuk pengelasan tipe I sekitar 300 MPa, untuk tipe V sekitar 500 MPa dan untuk tipe Y sekitar 550 MPa. Bentuk pengelasan Y akan memberikan peningkatan nilai tegangan sisa karena bentuk ini menimbulkan banyaknya konsentrasi tegangan, meskipun

memberikan kekuatan sambungan las yang tinggi.

Harga tegangan sisa ini akan berpengaruh terhadap kekuatan bahan khususnya menjadi penyebab kerusakan fatik ataupun retak karena korosi. Untuk keperluan desain dan jaminan kekuatan dari komponen biasanya diberikan perlakuan panas setelah proses pengelasan untuk mengurangi atau menghilangkan tegangan sisa. Titik kritis tegangan terjadi pada sambungan material dan menjadi besar untuk bentuk yang mengakibatkan adanya konsentrasi tegangan seperti dalam kampuh tipe Y. Dengan membuat perubahan bentuk untuk setiap proses pengelasan akan diperoleh tipe dan bentuk yang baik dari kampuh las.

Berdasar data dari pola distribusi pergeseran pada Gambar 6, besarnya pergeseran maksimum sekitar 0,7 mm yang terjadi pada daerah lasan. Titik dengan tegangan dan regangan tinggi akan merupakan titik kritis untuk kerusakan fatik atau *creep* jika dioperasikan pada suhu tinggi. Dengan modeling ini dapat dievaluasi batas tegangan dan regangan kritis yang dicapai dan dapat didesain ulang jika melebihi persyaratan desain yang ditentukan. Modeling untuk perhitungan regangan dan tegangan akan membantu dan menjadi alat evaluasi yang efektif.

Masalah utama yang perlu mendapat perhatian dalam modeling ini adalah ketelitian hasil. Ketelitian hasil akan sangat dipengaruhi oleh langkah dalam mengambil model, asumsi data dan ketelitian modeling. Untuk model perhitungan tegangan sisa ini faktor proses pengelasan belum dimodelkan dengan teliti. Lapis pengelasan, waktu pengelasan yang merupakan sumber fluks

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Diucapkan banyak terima kasih kepada Bapak Sunardi Dipl. Ing. Atas diskusi dan bantuannya dalam simulasi dan pembuatan tulisan ini.

panas yang bergerak selama proses perlu dimodelkan untuk mendapat hasil yang lebih teliti. Verifikasi hasil perhitungan dalam modeling ini belum dilakukan dengan teliti baik dibandingkan dengan hasil perhitungan program ataupun hasil eksperimen.

Pengembangan perhitungan dapat dilakukan untuk berbagai model dan ukuran pengelasan untuk memperoleh hasil perhitungan yang teliti. Dengan mengubah data dan *input file* akan dengan mudah diketahui hasil tegangan maksimum dan daerah kritis yang terjadi. Penggambaran geometri menggunakan program AUTOCAD atau SOLID WORK untuk mempermudah pembuatan gambar sebagai masukan program perlu dilakukan untuk pengembangan komputasi.

## 5. KESIMPULAN

Distribusi tegangan sisa dalam pengelasan sambungan pelat dapat dihitung menggunakan metoda elemen hingga. Tegangan sisa pada daerah las yang terbentuk dalam proses pengelasan dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran kampuh las, untuk bentuk kampuh Y tegangan sisa lebih besar dibandingkan dengan yang terjadi untuk kampuh V dan kampuh I.

Dalam simulasi perhitungan ini menghasilkan tegangan maksimum pada las untuk tipe Y adalah 550 MPa sedangkan pergeseran maksimum pada pengelasan tipe V dengan pergeseran maksimum sekitar 0,5 mm. Metode elemen hingga dengan program ANSYS dapat memberikan simulasi untuk analisis dan desain pengelasan dengan mengubah *input file*.

## DAFTAR PUSTAKA

1. D.N. ADYANA, *Metallurgy Las. Bahan Kuliah Teknologi Pengolahan Bahan untuk Perguruan Teknik*, Politeknik dan Industri, Jakarta, 1993.

2. FRANK STASSA. *Applied Finite Element Analysis for Engineers*, CBS Collage Publishing , USA.
3. UTAJA, *Program elemen hingga untuk menyelesaikan distribusi suhu dua dimensi*. Prosiding Komputasi dalam Sains dan Teknologo Nuklir, PPI-BATAN, 1995,
4. ANONIM, *Manual User ANSYS 5.4*, ANSYS Incorporated, Pittsburgh, 1998
5. Anonim, *Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, Metal-Mechanical Testing Elevated and Low Temperature Tests, Metallographic*, Philadelphia, ASTM,1993.
6. ANONIM. *ANSYS Structural Analysis Guide*, ANSYS, Inc , 1994.
7. BANDRIYANA. B, *Perhitungan Distribusi Tegangan Sisa Dalam Pengelasan Sambungan-T Pada Sistem Pemipaan*, Semiloka Teknologi Simulasi dan Komputasi serta Aplikasi, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, BPPT, September 2006.