

Analisa Pengaruh dari *Welding Sequence* Terhadap Tegangan Sisa dan Deformasi Pada *Circular Patch Weld Double Bevel Butt-Joint* Plat ASTM A36 Menggunakan Metode Element Hingga

Taufik Akbar, Budie Santosa

Jurusan TEKNIK Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: budies@na.its.ac.id

Abstrak—Studi tentang pemakaian tanggem dan penentuan *welding sequence* terbaik terhadap pengelasan melingkar pada plat ASTM A36. Studi ini dilakukan dengan cara pemodelan dengan menganalisa *deformasi* dan tegangan sisa yang timbul akibat distribusi panas yang tidak merata selama proses pengelasan dan pendinginan sampai mencapai suhu ruangan. Pemodelan yang dilakukan menggunakan bantuan software yang berprinsip metode elemen hingga pada struktur las. Permodelan kemudian divalidasi dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh Tsao-Liang Teng. Pemodelan akan dilakukan dengan memvariasi *welding sequence*, yakni *progressive welding*, *backstep welding*, dan *jump welding* yang dikombinasikan dengan variasi tanggem, yakni tanpa menggunakan tanggem, 2 tanggem dan 4 tanggem. Dari semua variasi yang dilakukan, variasi 4 tanggem – *backstep welding* adalah yang paling baik dari segi tegangan sisa karena *circumferential* dan *radial residual stress* yang di hasilkan paling kecil. Sedangkan jika ditinjau dari segi deformasi, variasi 4 tanggem – *jump welding* adalah yang paling baik karena deformasi yang dihasilkan adalah yang paling kecil.

Kata Kunci— deformasi, tegangan sisa, *welding sequence*, tanggem.

I. PENDAHULUAN

PROSES penyambungan logam dengan pengelasan sudah sering digunakan dalam *industry fabrication*, termasuk pembuatan kapal, perbaikan kapal, dari penyambungan konstruksinya, seperti penyambungan gading, sekat, pembujur dan lain sebagainya, diantara manfaat tersebut meliputi tingginya efisiensi sambungan struktur. Namun, tegangan sisa dan distorsi dapat terjadi di dekat daerah las karena pemanasan lokal oleh proses pengelasan dan pendinginan cepat [1]. Tegangan sisa yang tinggi di daerah dekat las dapat menimbulkan *brittle fractures*, *fatigue*, atau *stress corrosion cracking* [2]. Sementara itu tegangan sisa pada pelat dapat mengurangi kekuatan tekuk pada struktur. Oleh karena itu, Tegangan sisa pengelasan harus diminimalisasi agar tidak terjadi kegagalan struktur sesuai dengan persyaratan masing-masing.

Pada beberapa kasus pengelasan ada beberapa cara untuk mengurangi tegangan sisa, diantaranya *preheating*, *heat treatment*, *hammering*, dan *weld sequencing*. Dari beberapa

metode ini, pemilihan *welding sequence* lebih ringkas dan efisien untuk mengurangi tegangan sisa. Karena banyak pengelasan struktur tidak dapat dilakukan *post-weld* dan memiliki tegangan sisa beberapa tingkat. Oleh karena itu, mengembangkan urutan pengelasan secara akurat dapat memprediksikan tegangan sisa untuk mendapatkan desain yang paling aman.

Proses pengelasan menyebabkan pemanasan tinggi yang tidak merata pada bagian-bagian yang akan disambung tersebut, dimana area dari benda kerja yang dilas mengalami pemanasan hingga mencapai ± 1600 °C, kemudian mengalami penurunan suhu secara bertahap. Pemanasan lokal dan laju pendinginan bertahap menyebabkan perubahan *volumetric* yang akhirnya menghasilkan penyebaran panas, deformasi dan tegangan sisa. Timbulnya deformasi dan tegangan sisa kemudian menjadi perhatian serius. Sebagai contoh, masalah yang terjadi pada pengelasan melingkar pada pelat yang terletak pada konstruksi sudut lubang palkah kapal, konstruksi *hawse pipe* jangkar, konstruksi *man hole*, dan lain sebagainya. Deformasi dan tegangan sisa yang terlalu besar pada sambungan las, akan mempengaruhi tegangan patah getas dan kekuatan tekuk struktur las. Untuk itulah perlu dilakukan simulasi metode elemen hingga (*finite element method*) pada tahap desain. Sehingga tegangan sisa dan deformasi yang terjadi dalam pengelasan dapat diminimalisasi.

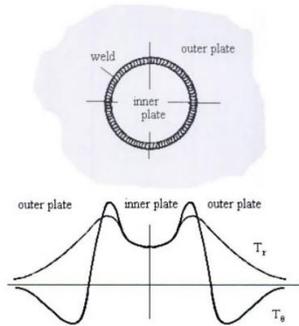
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pengelasan Melingkar

Ketentuan-ketentuan untuk pengelasan sambungan *double bevel butt joint* pada pengelasan melingkar pada pelat berbeda dengan pengelasan horisontal pelat datar. Perbedaan ini disebabkan karena pada proses pengelasan melingkar pada pelat terjadi pemuaian dan penyusutan pada logam las dalam arah radial dan tangensial.

Karena penyusutan yang dialami oleh *inner plate* dan tertahan oleh sekeliling dari *outer plate*, maka dari kondisi tersebut timbulah tegangan sisa. Ciri khas penyebaran tegangan sisa pada pengelasan melingkar dapat dilihat pada gambar 1. tegangan sisa radial (Tr) dan tegangan sisa

melingkar ($T\theta$) terjadi disepanjang diameter material las. Tegangan sisa terbesar terjadi pada daerah kampuh las. Nilai maksimum tegangan sisa melingkar lebih besar dibandingkan dengan nilai maksimum tegangan sisa radial.



Gambar. 1. Penyebaran Tegangan Sisa pada pengelasan melingkar

B. Thermal Las

Distribusi temperatur yang terjadi pada saat proses pemanasan maupun pendinginan tidak merata pada seluruh material. Distribusi yang tidak merata ini terjadi baik dalam hal tempatnya pada material maupun bila ditinjau dari segi waktu terjadinya. Ketidakmerataan distribusi temperatur inilah yang menjadi penyebab timbulnya deformasi pada struktur las. Sehingga untuk dapat menyelesaikan berbagai persoalan dari tegangan dan deformasi hasil pengelasan harus diketahui dahulu bagaimana distribusi dari temperatur yang dihasilkan terhadap material las [3].

Pada proses pengelasan tidak semua energi digunakan untuk memanaskan elektroda dan logam las. Sebagian energi yang dihasilkan terserap ke lingkungan karena adanya kontak dengan udara lingkungan sekitar. Sehingga energi efektif yang digunakan dalam pengelasan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Q = \eta UI$$

di mana :

Q = Net Heat Input/efektif thermal power (W)

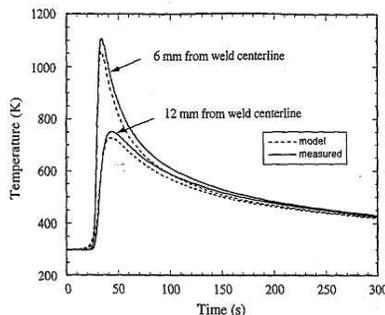
η = Koefisien Efisien busur

U = Daya busur (V)

I = Arus busur (A)

C. Siklus Thermal Las

Siklus *Thermal Las* adalah proses pemanasan dan pendinginan di daerah lasan. Pada gambar 2 dapat dilihat siklus thermal dari beberapa tempat dalam daerah HAZ dengan kondisi pengelasan tetap.



Gambar. 2. Siklus Thermal Las

Lamanya proses pendinginan setelah pengelasan dalam suatu daerah dengan temperatur tertentu dari suatu siklus *termal las* sangat mempengaruhi kualitas sambungan las. Struktur mikro dan sifat mekanis dari daerah HAZ sebagian besar tergantung pada lamanya pendinginan.

D. Distribusi Panas

Distribusi panas pada proses pengelasan pada setiap material tidak sama. Distribusi panas ini dipengaruhi oleh beberapa factor, yakni: Sifat konduktifitas (sifat mampu menghantar panas) dari material kerja, besarnya massa dari logam yang berada di sekeliling daerah las, alur yang tersedia untuk proses konduksi panas, teknik pengelasan yang dilakukan.

E. Heat Affected Zone (HAZ)

Daerah pengaruh panas dalam proses pengelasan besi merupakan bagian yang sangat penting dalam proses pengelasan. Karena daerah ini akan berpengaruh pada kekuatan sambungan las. Struktur logam pada daerah pengaruh panas (HAZ) berubah secara berangsur dari struktur logam induk ke struktur logam las. Pada daerah HAZ yang dekat dengan garis lebur, kristalnya tumbuh dengan cepat dan membentuk butir-butir kasar. Daerah ini dinamakan batas las.

Di dalam daerah pengaruh panas, besar butir dan struktur berubah sesuai dengan siklus termal yang terjadi pada waktu pengelasan. Karena siklus termal yang terjadi sangat rumit maka dengan sendirinya perubahan ketangguhan pada daerah pengaruh panas juga sangat rumit.

F. Deformasi

Deformasi merupakan perubahan pada material baik perubahan dimensi maupun struktur karena mendapat beban dari luar. Beban bisa berupa beban mekanis maupun proses fisika-kimia. Perubahan yang terjadi pada material dapat berupa pemuaihan maupun pengkerutan. Perubahan ini dimulai dari perubahan struktur dalam material sebelum akhirnya berdampak pada perubahan dimensi material. Jadi perubahan dimensi tergantung dari perubahan struktur material. Apabila perubahan struktur dari material teratur maka perubahan dimensi secara umum juga teratur. Namun tidak selalu perubahan struktur pada material terjadi dengan teratur sehingga mengakibatkan perubahan dimensi yang tidak teratur pula.

Pada struktur logam deformasi terjadi mulai dari struktur kristal yang berubah bentuk dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Untuk mengurangi dampak dari batas butir dan untuk mengurangi kerumitan dalam pembahasan selanjutnya kita akan mengkhususkan pada pembahasan pada deformasi kristal tunggal. Deformasi pada logam fasa tunggal berdasarkan prosesnya meliputi deformasi elastis dan deformasi plastis.

G. Residual Stress (Tegangan Sisa)

Tegangan sisa selalu muncul apabila sebuah material dikenai perubahan temperatur *non-uniform*, tegangan-tegangan ini disebut tegangan panas. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan tegangan sisa adalah batas transformasi dan

batastuluh beban, temperatur pemanasan tertinggi, kecepatan pendinginan, tahanan luar dan pemanasan awal. Ketika material dipanasi secara merata, akan terjadi tegangan. Tegangan sisa juga akan terjadi ketika regangan yang didistribusikan tidak merata seperti regangan plastis [2].

H. *Welding Sequence*

Untuk mengetahui urutan pengelasan suatu konstruksi kapal terlebih dahulu perlu diketahui bagian dari konstruksi apa dan dimana konstruksi tersebut ditempatkan sehingga juru las dapat melihat dari gambar kerja yang harus dilas serta prosedurnya. Akibat perlakuan panas pengelasan pada material menyebabkan penyusutan memanjang dan penyusutan melintang serta angular distorsi, sehingga pengurangan penyusutan perlu diusahakan dengan cara mengikuti prosedur urutan pengelasan secara umum. Dari urutan pengelasan atau urutan deposit dapat diuraikan maksud dan tujuan dari setiap metode yaitu : *progressive welding, bacastep welding dan jump welding*.

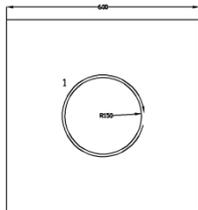
I. *Metode Elemen Hingga*

Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa seperti geometri, pembebanan dan sifat-sifat dari material yang sangat rumit. Hal ini sulit diselesaikan dengan solusi analisa matematis. Pendekatan metode elemen hingga adalah menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (*node*). Dalam prosese penentuan titik simpul yang di sebut dengan pendeskritan (*discretization*), suatu sitem dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi secara menyeluruh.

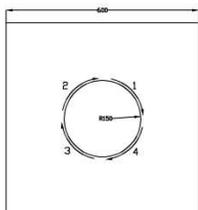
III. METODOLOGI PENELITIAN

A. *Geometri Model*

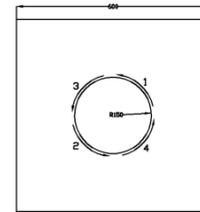
Dalam penelitian ini yang akan divariasikan adalah jumlah tanggem dan urutan pengelasan dari model yang akan diteliti. Untuk variasi jumlah tanggem dan urutan pengelasan adalah sebagai berikut :



Gambar. 3. *Progressive welding*



Gambar. 4. *Backstep welding*



Gambar. 5. *Jump welding*

B. *Material Properties*

Berikut adalah sifat dan karakteristik dari baja karbon A36 secara detail yang digunakan dalam pemodelan tugas akhir ini:

Tabel 1.

Material Properties Based Material ASTM A36

Temperature (°C)	Specific Heat (J/kg°C)	Conductivity (W/m°C)	Yield Stress (MPa)	Thermal Expansion Coefficient (x10 ⁻⁵ /°C)	Young's Modulus (GPa)
0	480	60	380	1.1	210
100	500	50	340	1.15	200
200	520	45	315	1.2	200
400	650	38	230	1.3	170
600	750	30	110	1.42	80
800	1000	25	30	1.45	35
1000	1200	26	25	1.45	20
1200	1400	28	20	1.45	15
1400	1600	37	18	1.45	10
1550	1700	37	15	1.45	10

Tabel 2.

Structural Material Properties

Type	UTS (Mpa)	0.2% YS (Mpa)	Elongation (mm)	Hardness (Rockwell)
A36	414	224	55	160

C. *Parameter Pengelasan*

Prosedur yang digunakan dalam pemodelan ini menggunakan metode pengelasan GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Adapun prosedur pengelasan yang digunakan secara spesifik adalah sebagai berikut:

- Tipe Pengelasan = GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*)
- Kecepatan Pengelasan = 5 mm/detik
- Kuat arus = 90 Ampere
- Voltage = 20 volt
- Efisiensi GTAW = 0.4
- Diameter elektroda = 2.4 mm

D. *Perhitungan Heat Flux*

Untuk perhitungan *heat flux* digunakan beberapa persamaan sebagai berikut:

$$Q = \dot{\eta} U I$$

$$A_f = b \times v \times t$$

$$A_e = \frac{1}{4} \pi D^2$$

$$A_l = p \times l$$

$$q_e = \frac{Q}{A_e}$$

$$q_l = \frac{A_l}{A_f}$$

di mana:

Q = heat input bersih

$\dot{\eta}$ = efisiensi pengelasan

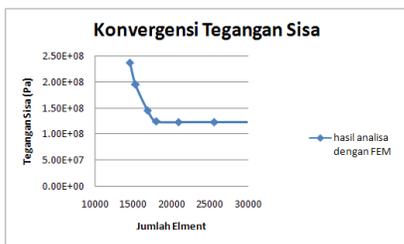
U = voltase

- I = kuat arus
- A_f = luas area pembebanan
- b = lebar kampuh
- v = kecepatan pengelasan
- t = waktu pengelasan per elemen
- A_e = luas penampang elektroda
- D = diameter elektroda
- Al = luas satu elemen
- p = panjang satu elemen
- l = lebar satu elemen
- ql = heat flux

IV. KONVERGENSI DAN VALIDASI

A. Konvergensi Jumlah Elemen

Dari grafik 1 dan table 3 dapat dilihat besarnya tegangan sisa maksimal, pada titik yang telah ditentukan, bahwa pada jumlah elemen 17980 sudah tidak terjadi lagi penurunan nilai yang signifikan terhadap jumlah elemen di atasnya, sehingga dapat dikatakan dengan jumlah elemen tersebut sudah dapat mewakili untuk dapat digunakan sebagai acuan untuk pembuatan model dan pembagian jumlah elemen untuk semua variasi pada tugas akhir ini.



Gambar. 6. Konvergensi Tegangan Sisa

Tabel 3.

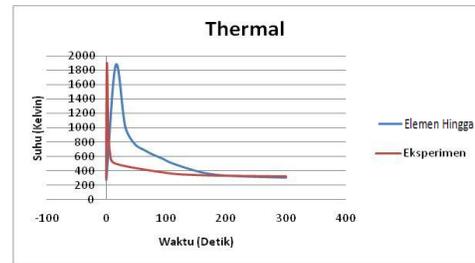
Perbandingan Tegangan Sisa dengan jumlah Elemen

Jumlah Element	Residual Stress (Pa)
14520	2.38E+08
15260	1.96E+08
16850	1.46E+08
17980	1.25E+08
20860	1.23E+08
25570	1.23E+08
30740	1.23E+08
NilaiHasilPengujian	1.16E+08

B. Validasi

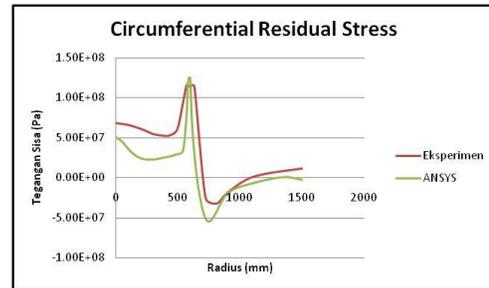
Pada penelitian ini tidak dilakukan pengujian sendiri namun hanya dilakukan simulasi proses variasi jenis sambungan dan urutan pengelasan dengan menggunakan *software* berprinsip elemen hingga sehingga harus dilakukan validasi dengan penelitian yang dilakukan oleh para peneliti sebelumnya dengan data yang sama [4].

Validasi Thermal :



Gambar. 7. Perbandingan Grafik Thermal antara Eksperimen dengan Metode Elemen Hingga

Validasi Strcutural :

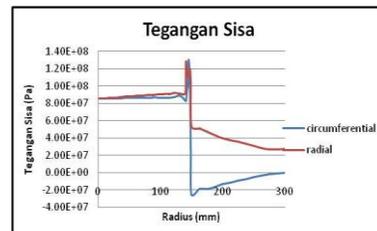


Gambar. 8. Perbandingan Circumferential Residual Stress antara Eksperimen dengan Metode Elemen Hingga

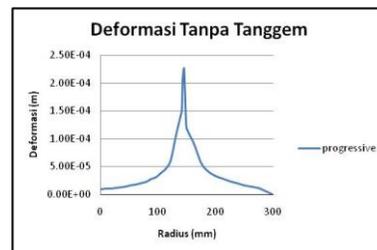
V. ANALISA HASIL PENELITIAN

A. Hasil Permodelan

1. Variasi Tanpa Tanggem – Progressive Welding

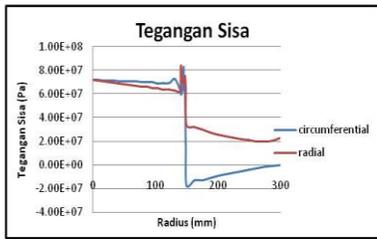


Gambar. 9. Tegangan sisa

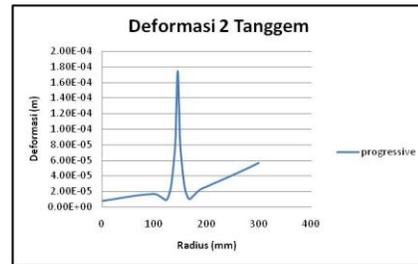


Gambar. 10. Deformasi

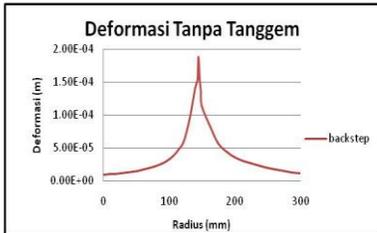
2. Variasi Tanpa Tanggem – Backstep Welding



Gambar. 11. Tegangan Sisa

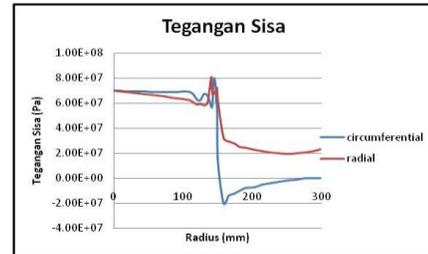


Gambar. 16. Deformasi



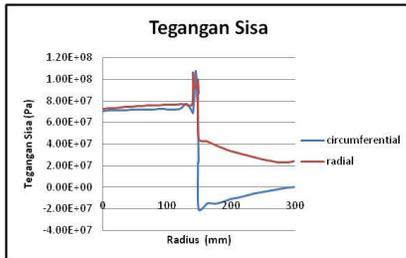
Gambar. 12. Deformasi

5. Variasi 2 Tanggem – Backstep Welding

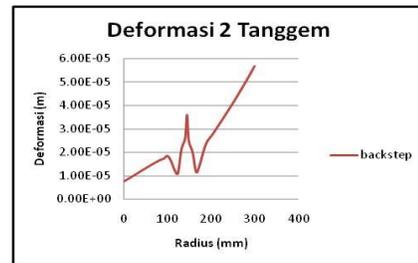


Gambar. 17. Tegangan Sisa

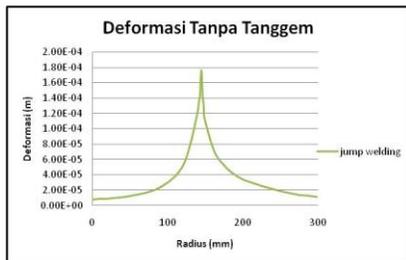
3. Variasi Tanpa Tanggem – Jump Welding



Gambar. 13. Tegangan Sisa



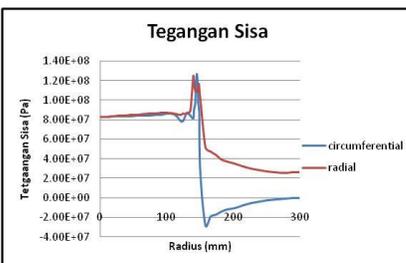
Gambar. 18. Deformasi



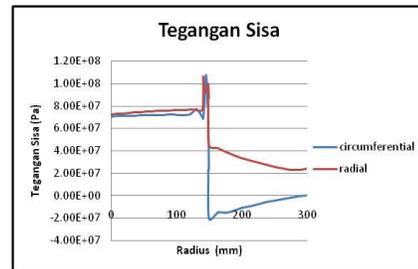
Gambar. 14. Deformasi

6. Variasi 2 Tanggem – Jump Welding

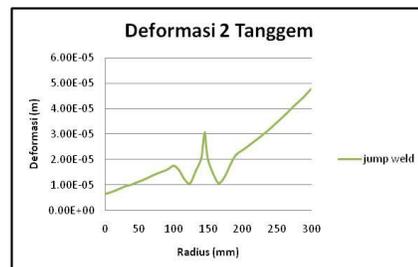
4. Variasi 2 Tanggem – Progressive Welding



Gambar. 15. Tegangan Sisa

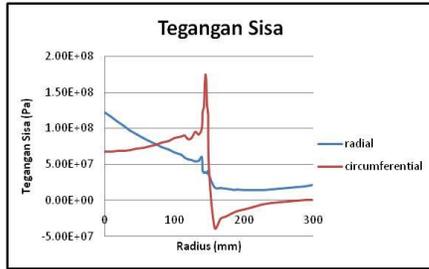


Gambar. 19. Tegangan Sisa

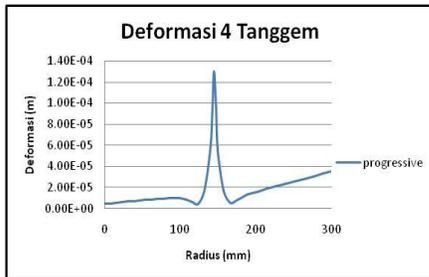


Gambar. 20. Deformasi

7. Variasi 4 Tanggem – Progressive Welding

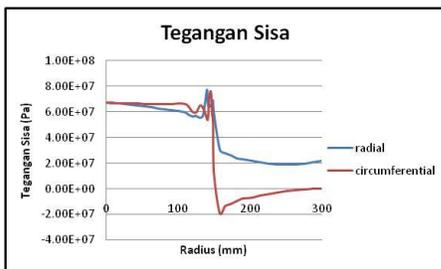


Gambar. 21. Tegangan Sisa

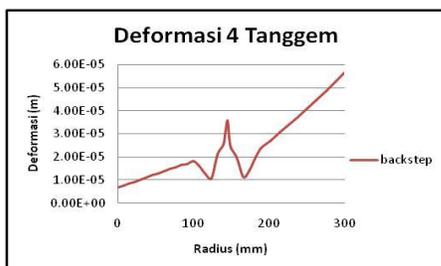


Gambar. 22. Deformasi

8. Variasi 4 Tanggem – Backstep Welding

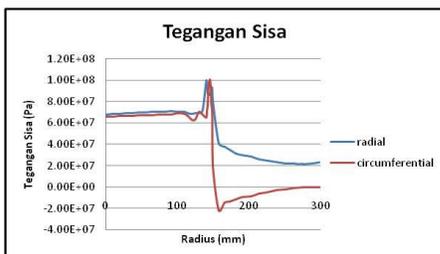


Gambar. 23. Tegangan Sisa

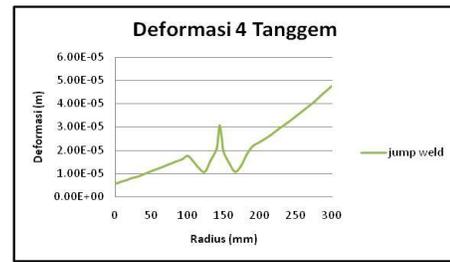


Gambar. 24. Deformasi

9. Variasi 4 Tanggem – Jump Welding



Gambar. 25. Tegangan Sisa



Gambar. 26. Deformasi

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil pemodelan pengelasan melingkar pada pelat dan dari hasil analisa yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Besar heat input dari hasil running Ansys menunjukkan bahwa titik lebur pada kampuh las pada saat pengelasan mencapai $\pm 1900 \text{ }^\circ\text{K}$ ($1627 \text{ }^\circ\text{C}$). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan [T.-L. Teng (2000)].
2. Tegangan sisa melingkar yang ditunjukkan pada grafik tegangan sisa terbesar berada pada variasi tanpa tanggem – progressive welding sebesar 130MPa, sedangkan tegangan terkecil berada pada variasi 4 tanggem – backstep welding yaitu sebesar 79.6 Mpa.
3. Tegangan sisa radial yang ditunjukkan pada grafik tegangan sisa terbesar berada pada variasi tanpa tanggem – progressive welding sebesar 128MPa, sedangkan tegangan terkecil berada pada variasi 4 tanggem – backstep welding yaitu sebesar 76.9 Mpa
4. Besarnya deformasiterbesar berada pada variasi tanpa tanggem – progressive welding sebesar 0.225 mm, sedangkan deformasi terkecil berada pada variasi 4 tanggem – jump welding sebesar 4.77×10^{-2} mm.
5. Dilihat dari besar tegangan sisa melingkar dan tegangan sisa radial, bahwa hasil variasi 4 tanggem – backstep welding adalah yang paling baik, sedangkan jika dilihat dari segi deformasinya variasi 4 tanggem – jump welding memiliki deformasi yang paling baik karena deformasi yang dihasilkan paling minimum

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T.L.Teng, P.H. Chang, W.C. Tseng, Effect of Welding Sequences on Residual Stress. Chung cheng Institute of Technology. Taiwan (2002).
- [2] T.L. Teng, C.P. Fung, P.H. Chang, Effect of Residual Stress on the Fatigue of Butt Joints using Elasto-plastic and Multyaxial Fatigue Theory. Chung cheng Institute of Technology. Taiwan (2002).
- [3] H. Wiryosumarto, T. Okumura, Teknologi Pengelasan Logam. Pradnya Paramita. Jakarta (2010).
- [4] J.J. Dike, A.R. Ortega, C.H. Cadden, Finite Element Modelling and Validation of Residual Stress in 304L Girth Welds. Sandia National Laboratories. Livemore (1998).