TUGAS AKHIR – TL184834

SIMULASI TEGANGAN SISA PENGELASAN BUTT-JOINT SMAW MATERIAL A36 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA MENGGUNAKAN ANSYS APDL

BISMA AJI MANGGALA
NRP. 02511540000078

Dosen Pembimbing:
Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D
Dr. Lukman Noerochiem, ST., MSc.Eng

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

FINAL PROJECT – TL184834

SIMULATION RESIDUAL STRESS BUTT-JOINT SMAW MATERIAL A36 WITH FINITE ELEMENT METHOD USING ANSYS APDL

BISMA AJI MANGGALA
NRP: 02511540000090

Advisors:
Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D
Dr. Lukman Noerochiem, ST., MSc.Eng

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULASI TEGANGAN SISA PENGELASAN BUTT-JOINT SMAW MATERIAL A36 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA MENGGUNAKAN ANSYS APDL

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Teknik Material Inovatif
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekaya Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

BISMA AJI MANGGALA

NRP. 02511540000090

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D..... (Pembimbing 1)
2. Dr. Lukman Noerochiem, ST., MSc.Eng..... (Pembimbing 2)

SURABAYA
Januari 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SIMULASI TEGANGAN SISA PENGELASAN *BUTT-JOINT* SMAW MATERIAL A36 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA MENGGUNAKAN ANSYS APDL

Nama Mahasiswa : Bisma Aji Manggala
NRP : 0251154000090
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing 1 : Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D
Pembimbing 2 : Dr. Lukman Noerochiem, ST., MSc.Eng

Abstrak

Deformasi pada pengelasan busur logam berpelindung (SMAW) sering dihubungkan dengan tegangan sisa selama pengelasan. Hal tersebut tidak dapat dihindari dan pengaruhnya terhadap struktur material yang dilas tidak dapat diabaikan. Sehingga, desain dan kondisi manufaktur, seperti ketebalan struktur, desain sambungan, kondisi las dan urutan las, harus diatur supaya efek merugikan dari tegangan sisa dapat dikurangi hingga dapat ditoleransi. Pada penelitian sebelumnya didapatkan kecepatan optimal dari pemodelan termal. Namun, belum dilakukan pemodelan structural untuk mendapatkan data yang lebih lengkap untuk dianalisa. Oleh karena itu, pada simulasi ini dilakukan pemodelan termal dan struktural menggunakan ANSYS APDL. Simulasi ini dilakukan pada pelat ASTM A36 dengan ketebalan dan tipe sambungan butt-joint berbeda. Tipe butt-joint yang digunakan adalah closed square dan square pada pelat dengan ketebalan 2 mm, 4 mm, dan 6 mm. Didapatkan hasil dari pemodelan termal yaitu temperatur maksimal pengelasan terjadi pada tipe sambungan square dengan ketebalan yang lebih tipis. Sedangkan dari pemodelan struktural tegangan sisa lebih banyak terjadi pada pelat yang lebih tipis, dengan nilai distorsi berbanding lurus dengan tegangan sisa. Sehingga dari data

simulasi didapatkan sambungan butt-joint yang optimal adalah tipe sambungan closed square.

Kata Kunci: Butt-joint, Metode Elemen Hingga, Pengelasan, Simulasi, Tegangan sisa.

SIMULATION RESIDUAL STRESS BUTT-JOINT SMAW MATERIAL A36 WITH FINITE ELEMENT METHOD USING ANSYS APDL

Name : Bisma Aji Manggala
NRP : 0251154000090
Departmen : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D
Co-supervisor : Dr. Lukman Noerochiem, ST., MSc.Eng

Abstract

Deformation in shielded metal arc welding (SMAW) is often related to residual stresses during welding. which cannot be avoided and its effect on the welded structure cannot be ignored. Thus, design and manufacturing conditions, such as structure thickness, joint design, welding conditions and welding sequence, must be adjusted so that the adverse effects of residual stresses reduced until can be tolerated. In previous studies, the optimal welding speed obtained from thermal modeling. However, structural modeling has not been carried out to obtain complete data for analysis. Therefore, in this simulation thermal and structural modelled using ANSYS APDL. The simulation was carried out on ASTM A36 plates with different thickness and type of butt-joint joints. Butt-joint types used are closed square joint and square joint on plates with thicknesses of 2 mm, 4 mm and 6 mm. The results obtained from thermal modeling are that the maximum welding temperature occurs in the type of square connection with thinner thickness. Whereas from structural modeling residual stress is more common in thinner plates, with the value of distortion directly proportional to the residual stress. Consecuently from the simulation data, the optimal butt-joint connection is closed square joint.

Keywords: Butt-joint, Finite Elemnt Method, Residual Stress, Simulation, Welding.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya kepada kita sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul "**Simulasi Tegangan Sisa Pengelasan *Butt-joint* SMAW Material A36 dengan Metode Elemen Hingga"**. Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program Strata-1 di Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penulis menyadari dalam penyusunan Tugas Akhir ini tidak akan selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua yang telah yang telah mendidik, membina, dan memberikan dorongan semangat kepada penulis.
2. Bapak Sigit Tri Wicaksono S.Si., M.Si., Ph.D, selaku Kepala Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D, selaku dosen wali dan dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan arahan serta ilmu yang sangat bermanfaat.
4. Dr. Lukman Noerochiem, ST., MSc.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan banyak masukan serta semangat.

Penulis menyadari Tugas Akhir ini tidak luput dari kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik demi kesempurnaan dan perbaikannya.

Surabaya, Januari 2020
Penulis

Bisma Aji Manggala

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **v**
ABSTRAK ..... **viii**
ABSTRACT ..... **ix**
KATA PENGANTAR ..... **xi**
DAFTAR ISI ..... **xiii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xv**
DAFTAR TABEL ..... **xix**
BAB I PENDAHULUAN **1**
2.1 Latar Belakang 1
2.2 Rumusan Masalah 2
2.3 Batasan Masalah 2
2.4 Tujuan Penelitian 2
2.5 Manfaat Penelitian 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Pemodelan Pengelasan Menggunakan Metode Elemen Hingga 5
2.2 Simulasi Pengelasan Menggunakan APDL 6
2.3 Distribusi Temperatur 6
2.4 Tegangan Sisa pada Pengelasan 8
2.4.1 Tegangan Sisa dan Distorsi di SMAW 8
2.4.2 Tekanan Sisa pada *Butt-joint* 9
2.5 Tegangan Sisa pada Pelat dengan Ketebalan Berbeda 10
2.6 Perpindahan Panas Dalam Proses Pengelasan 12
2.7 Shielded Metal Arc Welding (SMAW) 13
BAB III METODOLOGI **15**
3.1 Diagram Alir Penelitian 15
3.2 Pemodelan dengan ANSYS APDL 17 16

3.2.1 Preproses 16
3.2.2 Solusi 19
3.2.3 Postproses 19
3.3 Bahan Penelitian 20
3.3.1 Spesifikasi Material 20
3.3.2 Elektroda 21
3.3.3 Geometri 22
3.4 Parameter Pengelasan 24
3.5 Alat Penelitian 26
3.6 Pengujian 27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 28
4.1 Perhitungan Pembebanan SMAW 29
4.2 Hasil Simulasi 30
4.2.1 Pengelasan Pelat Ketebalan 2 mm 30
4.2.2 Pengelasan Pelat Ketebalan 4 mm 41
4.2.3 Pengelasan Pelat Ketebalan 6 mm 52
4.3 Pembahasan Hasil Simulasi 65
4.3.1 Hasil Pemodelan Termal 66
4.3.2 Hasil Pemodelan Struktural 69
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 71
5.1 Kesimpulan 71
5.2 Saran 71
DAFTAR PUSTAKA 73
BIODATA PENULIS 75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Distribusi temperatur pengelasan plat pada APDL 6
Gambar 2.2 Jenis deformasi pengelasan dalam proses pengelasan 9
Gambar 2.3 Distribusi tegangan sisa pada butt-joint.....10
Gambar 2.4 Temperatur puncak pada ditribusi panas pada pelat metal dengan ketebalan berbeda 11
Gambar 2.5 Pengelasan SMAW 14
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian 15
Gambar 3.2 Pemodelan dengan ANSYS APDL 17.....16
Gambar 3.3 SOLID70 3D structural solid.....17
Gambar 3.4 SOLID185 3D structural solid.....17
Gambar 3.5 Model meshed dari geometri pelat lasan 19
Gambar 3.6 Geometri spesimen closed square.....22
Gambar 3.7 Geometri spesimen *square*.....23
Gambar 3.8 Tipe sambungan butt-joint.....23
Gambar 3.9 Gambar kurva arus tegangan konstan.....26
Gambar 3.10 ANSYS APDL 17.....26
Gambar 4.1 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan closed square dengan ketebalan 2 mm 31
Gambar 4.2 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan square dengan ketebalan 2 mm.....31
Gambar 4.3 Distribusi panas jenis sambungan *closed square* (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas.....34

Gambar 4.4 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 2 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas.....35
Gambar 4.5 Distribusi tegangan sisa jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 2 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping.....37
Gambar 4.6 Distribusi tegangan sisa jenis sambungan *square* dengan ketebalan 2 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping.....38
Gambar 4.7 Distorsi pada jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 2 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas.....40
Gambar 4.8 Distorsi pada jenis sambungan *square* dengan ketebalan 2 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas.....40
Gambar 4.9 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 4 mm 42
Gambar 4.10 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 4 mm.....43
Gambar 4.11 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 4 mm 44
Gambar 4.12 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 4 mm.....44

Gambar 4.13 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 4 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping.....46
Gambar 4.14 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 4 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping.....48
Gambar 4.15 Distorsi pada jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 4 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping.....50
Gambar 4.16 Distorsi pada jenis *sambungan square* dengan ketebalan 4 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping 52
Gambar 4.17 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan *closed square* dengan ketabalan 6 mm 53
Gambar 4.18 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 6 mm.....54
Gambar 4.19 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas 56
Gambar 4.20 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas.....57

Gambar 4.21 Distribusi tegangan sisa jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping.....59
Gambar 4.22 Distribusi tegangan sisa jenis sambungan *square* dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping.....61
Gambar 4.23 Distorsi pada jenis sambungan closed square dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping.....63
Gambar 4.24 Distorsi pada jenis sambungan *square* dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping 65
Gambar 4.25 Siklus panas pengelasan pelat (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm 68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Efisiensi busur untuk beberapa proses pengelasan 8
Tabel 3.1 Properti (a) fisik (b) mekanik (c) kimia material ASTM A36 20
Tabel 3.2 Sifat ASTM A36 terhadap suhu (Jeyakumar & Thankaiyan, 2013) 21
Tabel 3.3 Spesifikasi elektroda..... 22
Tabel 3.4 Parameter pengelasan 24
Tabel 3.5 Amperage range SMAW menurut ukuran elektroda..... 25
Tabel 3.6 Variasi pengujian..... 27
Tabel 4.1 Temperatur puncak terhadap ketebalan dan variasi 66
Tabel 4.2 Tegangan sisa terhadap ketebalan dan variasi..... 69
Tabel 4.3 Distorsi terhadap ketebalan dan variasi..... 69

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I
PENDAHULUAN

2.1 Latar Belakang

Las banyak diaplikasikan di berbagai bidang industri seperti industri manufaktur, baja konstruksi dan industri *maintenance* dan perbaikan. SMAW merupakan salah satu proses las yang populer karena aplikasinya luas, prosesnya sederhana dan biayanya relatif murah dibanding proses las lain. Proses ini utamanya digunakan untuk pengelasan baja, baja anti karat, dan beberapa macam baja paduan. Meskipun prosesnya sederhana, SMAW dapat menghasilkan kualitas hasil sambungan yang kurang bagus akibat adanya deformasi dan tegangan sisa pada komponen las akibat panas berlebih pada proses lasnya.

Tegangan sisa diklasifikasikan sebagai tegangan sekunder yang ada setelah semua beban dihilangkan. Tegangan sisa bisa menguntungkan atau merugikan beberapa komponen, tergantung pada jenisnya. Tegangan sisa tarik dapat membahayakan komponen karena meningkatkan kemungkinan terjadinya patahan. Banyak peneliti sepakat bahwa tegangan sisa tarik dapat ditemukan di area logam las(Nasir et al., 2006). Tegangan sisa selama pengelasan tidak dapat dihindari dan pengaruhnya terhadap struktur yang dilas tidak dapat diabaikan. Desain dan kondisi manufaktur, seperti ketebalan struktur, desain sambungan, kondisi las dan urutan las, harus diatur supaya efek merugikan tegangan sisa dapat dikurangi hingga dapat ditoleransi (Gery et al., 2005).

Pada penelitian sebelumnya oleh Syukri yang berjudul simulasi termal dengan perbedaan kecepatan pengelasan berbeda dan ketebalan metal pada pengelasan *butt-joint* menggunakan ANSYS. Dari penelitian tersebut didapatkan kecepatan pengelasan optimal terhadap ketebalan pelat melalui simulasi. Untuk mendapatkan analisa yang lebih lengkap maka diperlukan pula

pemodelan struktural. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan simulasi pada desain las *butt-joint* dengan proses las SMAW menggunakan ANSYS untuk mendapatkan data distribusi panas, tegangan sisa dan distori. Sehingga akan diperoleh desain sambungan yang optimal.

2.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh tipe sambungan *butt-joint* dan ketebalan terhadap tegangan sisa dan distorsi?
2. Bagaimana distribusi panas, tegangan sisa dan distorsi pada simulasi las *butt-joint* material A36?
3. Bagaimana jenis sambungan *butt-joint* yang optimal?

2.3 Batasan Masalah

Supaya diperoleh hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan, serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material A36 dianggap homogen
2. Kecepatan pengelasan pada simulasi dianggap konstan
3. Arus listrik dan tegangan pada simulasi dianggap konstan

2.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah:

1. Untuk menganalisa pengaruh tipe sambungan *butt-joint* dan ketebalan logam terhadap tegangan sisa dan distorsi.
2. Untuk menganalisa distribusi panas, tegangan sisa dan distorsi pada simulasi las *butt-joint* material A36
3. Untuk menganalisa jenis sambungan *butt-joint* yang optimal.

2.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah didapatkannya informasi mengenai fenomena yang terjadi pada saat dan hasil pengelasan yang bisa menjadi rujukan pemilihan desain sambungan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

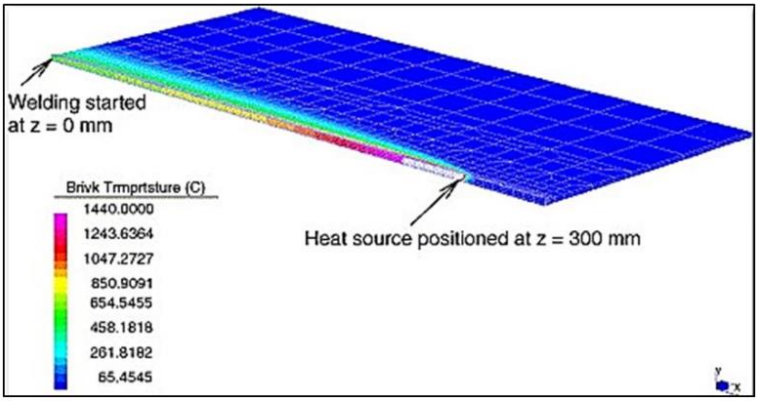
2.1 Pemodelan Pengelasan Menggunakan Metode Elemen Hingga

Di tengah perkembangan zaman yang begitu pesat, kemajuan bidang ilmu (science) dan rekayasa (engineering) memberikan penting dalam kehidupan. Kemajuan teknologi memiliki andil yang besar dalam membantu manusia menyelesaikan pekerjaannya. Salah satu bidang ilmu rekayasa yang mengalami banyak pengembangan adalah pengelasan. Beragam upaya dalam mengembangkan teknologi las terus dilakukan untuk memperluas ruang lingkup pemakaian yang semakin beragam di dunia industry. Salah satu rekayasa yang banyak dilakukan para insinyur adalah mengambangan metode anaisa kualitas pengelasan yang dihasilkan. Metode umum yang digunakan adalah menggunakan pengujian merusak (*destructive test*) dana tau pengujian tidak merusak (*non destructive test)*. Namun, kedua metode tersebut juga memiliki beberapa kekurangan. Salah satunya adalah tidak mampu menganalisa tegangan sisa yang ditimbulkan dari pengelasan secara akurat. Sedangkan tegangan sisa dari hasil pengelasan berpengaruh terhadap sifat-sifat mekanis struktur las seperti patah getas, kelelahan dan retak.

Guna menganalisa hasil las, maka dilakukan metode elemen hingga atau finite element method (FEM) yang efektif untuk memprediksi tegangan sisa, *heat affected zone*, dan kekuatan dari produk pengelasan. Dalam beberapa tahun belajangan, penelitian yang telah dilakukan menunjukan bahwa aplikasi FEM memiliki keandalan yang sesuai dengan tujuan yang diharapkan (Abdullah & Schlattmann, 2012)

2.2 Simulasi Pengelasan Menggunakan APDL

Dalam praktik teknik modern, studi berbagai proses pengelasan didirikan dengan bantuan metode alat komputasi dan simulasi tingkat lanjut yang mirip dengan FEM. Gambar 2.1 menunjukkan distribusi suhu pada pelat yang dilas pada APDL. Desain dan asumsi data dapat digunakan dalam simulasi untuk menghitung tegangan sisa dan distorsi. Meskipun demikian, simulasi dan perhitungan distorsi pengelasan dan tegangan sisa adalah tantangan yang tenang. Ini disebabkan geometri yang rumit dari lasan, komponen dan kompleksitas parameter proses pengelasan. Karena itu penting untuk memiliki pemahaman yang mendalam tentang pengaruh parameter pengelasan bahwa simulasi yang efektif dapat dikembangkan dengan termal dan mekanik yang memadai untuk akurasi analisis proses pengelasan yang baik. (Soul & Hamdy, 2012)



Gambar 2.1 Distribusi temperatur pengelasan plat pada APDL (Soul & Hamdy, 2012)

2.3 Distribusi Temperatur

Sumber panas yang dihasilkan selama proses pengelasan paling besar dihasilkan tenaga listrik, *H* (watt)(Masubuchi, 2013), dengan rumus sebagai berikut:

$$H = VI \quad (2.1)$$

dengan input energi atau intensitas *heat input, hi* (joule/in) sebagai berikut:

$$hi = 60 \times (VI/v) \quad (2.2)$$

dimana:

V= voltase busur, (Volt)
I = arus busur, (A)
v = adalah kecepatan busur las dalam in per menit

Sebagian besar panas tersebut digunakan untuk meleburkan elektroda. Densitas sumber panas juga merupakan karakteristik yang penting dalam proses pengelasan. bahwa semua energi listrik diubah menjadi energi panas, tetapi energi tersebut tidak digunakan untuk memanaskan elektrode dan logam induk. Sebagian dari energi tersebut hilang ke udara sekitamya, untuk pemanasan gas atau *flux* dan lain-lain. Sehingga energi efektif busur las dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$Qi = \eta_a \mathrm{VI} \quad (2.3)$$

Dimana:

Qi = efektif *heat input* (W)

η_a = efisiensi busur

Harga efisiensi busur pada beberapa proses pengelasan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Efisiensi busur untuk beberapa proses pengelasan (Karkhin, 2013)

Proses Pengelasan	Efisiensi busur	
	Range	Rata-rata
SAW (steel)	0.91-0.99	0.95
SMAW (steel)	0.66-0.85	0.80
GMAW (COz-steel)	0.75-0.93	0.85
GMAW (Ar-steel)	0.66-0.70	0.70
GTAW (Ar-steel)	0.25-0.75	0.40
GTAW (He-Al)	0.55-0.80	0.60
GTAW (Ar-Al)	0.22-0.46	0.40

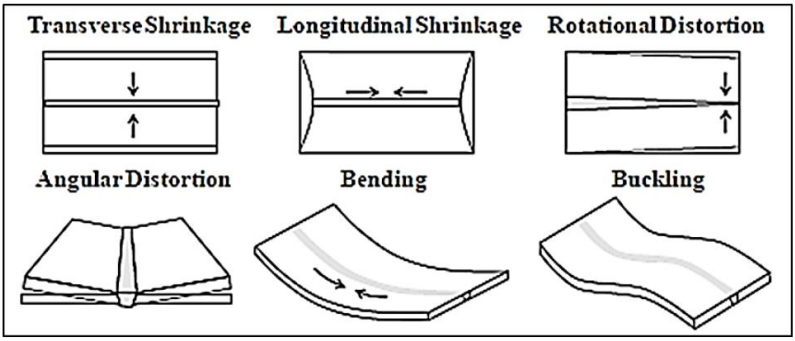
2.4 Tegangan Sisa pada Pengelasan

Siklus pemanasan dan pendinginan yang kompleks yang ditemui dalam pengelasan menyebabkan transien panas. tegangan dan galur yang tidak cocok diproduksi di daerah dekat lasan. Setelah siklus panas pengelasan berkurang, strain yang tidak kompatibel tetap ada dan memicu tekanan terkunci atau sering disebut sebagai tegangan sisa pengelasan. Secara umum, istilah tegangan sisa berhubungan dengan stres yang tersisa dalam struktur meskipun tidak ada beban eksternal yang diterapkan(Masubuchi, 2013). Beberapa istilah yang memiliki arti yang sama dengan tegangan sisa ditemukan di beberapaliteratur, yaitu: tegangan internal, tegangan awal, tegangan bawaan, tegangan reaksi, tegangan penguncian, dll. Dalam hal proses pengelasan, tegangan sisa adalah tegangan internal yang tersisa setelah pengelasan dan pendinginan ke suhu kamar.

2.4.1 Tegangan Sisa dan Distorsi di SMAW

Proses pemanasan dan pendinginan yang tidak merata di SMAW menyebabkan tegangan sisa dan distorsi pada logam las karena tekanan dan tegangan termal yang rumit. Mirip dengan yang proses las konvensional lainnya, input panas yang dikirim selama proses SMAW akan mempengaruhi perilaku karakteristik

mikrostruktur logam, sehingga pengaruhnya signifikan dalam deformasi pengelasan. Distribusi suhu pada logam las secara signifikan berdasarkan parameter pengelasan seperti kecepatan pengelasan, ketebalan pelat logam dan ukuran elektroda yang dilapisi karena, itu akan memulai tegangan sisa dan distorsi pada logam las (Mahapatra et al., 2006). Gambar 2.2 menunjukkan jenis deformasi pengelasan dalam proses pengelasan.

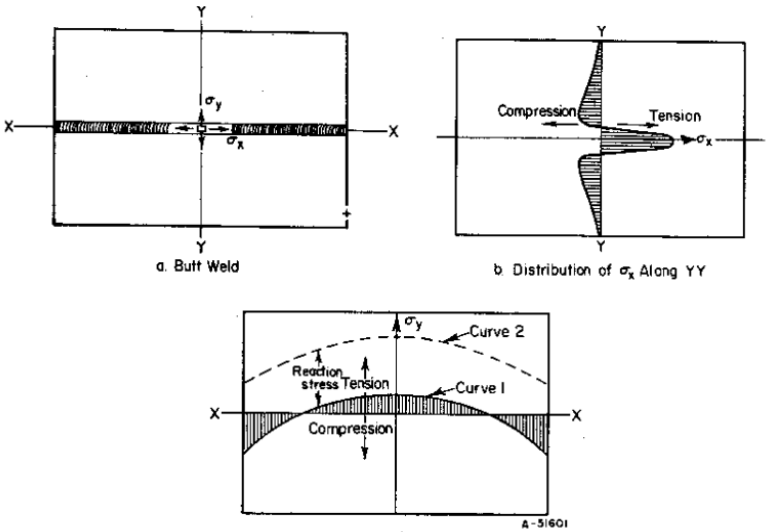


Gambar 2.2 Jenis deformasi pengelasan dalam proses pengelasan (Soul & Hamdy, 2012)

2.4.2 Tekanan Sisa pada *Butt-joint*

Distribusi tegangan sisa dari *butt-joint* pada plat disajikan pada Gambar. 2.3. Komponen tegangan sisa dikategorikan menjadi melintang dan memanjang, yang ditunjuk sebagai σ_x dan σ_y (Gambar 2.3a). Melintasi garis las, tegangan sisa tarik dalam arah memanjang sejajar dengan garis pengelasan ditemukan di daerah pengelasan dan tegangan sisa tekan terjadi di wilayah lain yang jauh dari garis las (Gambar 2.3b). Tegangan sisa melintang distribusi sepanjang jalur las biasanya merupakan bagian tekan di ujung pelat, jika tidak adalah bagian tarik dengan besarnya tegangan lebih rendah dari tegangan sisa longitudinal (Gambar 2.3c). Masubuchi dan Martin (Masubuchi, 2013) telah mengembangkan distribusi longitudinal tegangan sisa σ_x yang dapat diperkirakan sebagai berikut :

$$\sigma_x = \sigma_m \left\{ 1 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right\} e^{-\frac{1}{2}(y/b)^2} . \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.4)$$



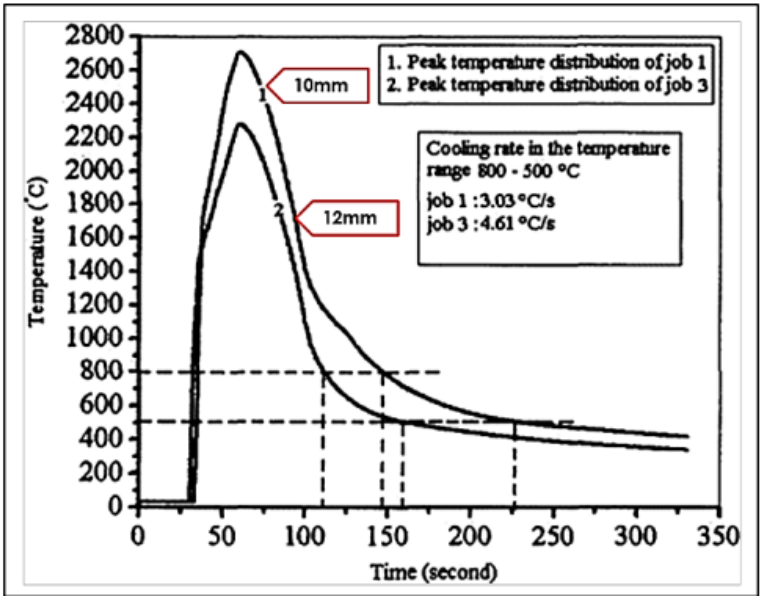
Gambar 2.3 Distribusi tegangan sisa pada b*utt-joint* (Masubuchi, 2013)

2.5 Tegangan Sisa pada Pelat dengan Ketebalan Berbeda

Tegangan sisa dalam spesimen las dapat dikurangi jika SMAW diterapkan pada spesimen logam yang lebih tebal. Penelitian sebelumnya telah dilakukan pada berbeda ketebalan spesimen las untuk memperjelas hipotesis. Telah terbukti spesimen las dengan dimensi lebih tebal mampu menyerap lebih banyak energi per satuan volume. Dimana dalam hal ini, distribusi tegangan tarik selalu bertindak dari lapisan atas pengelasan *butt-joint* dan berkurang saat melakukan perjalanan ke bagian bawah spesimen las, menghasilkan

pengurangan tegangan sisa dengan ketebalan spesimen yang lebih tebal (Mahapatra et al., 2006) .

Pelat logam yang lebih tebal mampu menyerap lebih banyak energi panas karena memiliki volume yang lebih besar dibandingkan dengan pelat logam yang lebih tipis dengan demikian, laju disipasi panas pada pelat logam yang lebih tebal lebih tinggi. Pola ini menunjukkan panas berlebihan yang bekerja pada pelat logam selama proses pengelasan dan kecepatan pengelasan yang lebih tinggi harus diterapkan pelat logam lebih tipis. Oleh karena itu, kecepatan pengelasan optimal akan bervariasi sesuai dengan ketebalan logam berbeda karena memiliki laju disipasi panas yang berbeda (Syukri, 2015)



Gambar 2.4 Temperatur puncak pada ditribusi panas pada pelat metal dengan ketebalan berbeda (Mahapatra et al., 2006)

2.6 Perpindahan Panas Dalam Proses Pengelasan

Perpindahan panas pada Pelat Logam Sepanjang proses SMAW, distribusi suhu pada pelat logam akan bervariasi karena pemanasan lokal dari proses pengelasan. Perpindahan panas selama SMAW baik pada pelat logam dan sekitarnya dapat dikategorikan ke tiga metode perpindahan panas yang berbeda yang merupakan konduksi panas, konveksi panas dan radiasi panas(Chen, 2011). Panas dari busur las di SMAW sebagian besar ditransfer ke pelat logam melalui panaskonduksi sedangkan daerah dengan suhu yang lebih tinggi akan melewatkan energi panasnya wilayah dengan suhu lebih rendah. Dalam simulasi termal ini, konduksi panas dilambangkan sebagai jumlah fluks panas membentuk busur pengelasan di (Kearns, 1978).

Selain itu, perpindahan panas antara busur pengelasan dan sekitarnya dikategorikan sebagai konveksi panas yang dihitung menggunakan (2.5). Menurut Hukum Gas Ideal, panas konveksi terjadi ketika panas ditransfer oleh pergerakan cairan di mana Proses SMAW, panas dari pelat logam ditransfer ke sekitarnya melalui udara dan dihitung sebagai (Soul & Hamdy, 2012). Untuk menyederhanakan model termal SMAW *butt-joint*, transfer panas melalui radiasi biasanya dapat diabaikan karena efek radiasi panas padamodel termal dalam proses pengelasan relatif kecil.

$$qconv = hf(T^4 - T_\infty{}^4) \quad (2.5)$$

q_{conv} adalah konveksi panas

$\mathbf{h_f}$ adalah koefisien transfer panas konveksi

T adalah temperature spesimen

$\mathbf{T_\infty}$ adalah temperature ruang

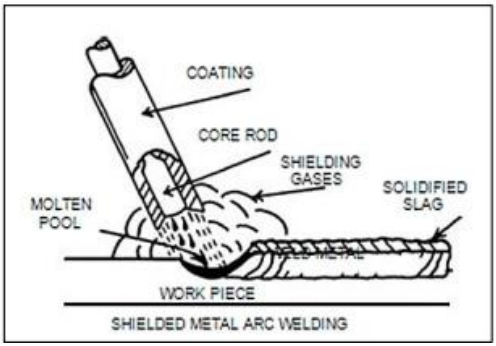
Proses pengelasan ditandai dengan energi pengelasan E = U.I / v (di mana I dan U berada masing-masing intensitas dan tegangan pengelasan dan v kecepatan obor) dan pemanasan awal suhu. Hanya sebagian kecil dari energi ini yang ditransfer ke bahan las, yaitu panasi nput ke dalam materi yang disimpan diberikan oleh ekspresi:

$$QR = \eta \cdot \frac{UI}{v(t)} \qquad (2.6)$$

(1)Koefisien efisiensi (η) adalah karakteristik dari proses pengelasan dan diperoleh melalui kalibrasi ukuran zona leleh, ukuran Zona Terpengaruh Panas dan / atau siklus termal terukur (Youtsos, 2006)

2.7 Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

Prinsip dasar SMAW adalah bahwa ia menggunakan elektroda habis pakai yang dilapisi dengan fluks letakkan las seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Pasokan arus bolak-balik atau arus searah akan menghasilkan busur listrik antara elektroda dan logam yang akan disatukan. Pengelasan dilakukan dengan panas busur listrik yang dipertahankan untuk melelehkan logam tidak mulia, batang inti elektroda dan pelapis. Saat tetesan logam cair ditransfer melintasi busur dan ke dalam kolam las, lapisan fluks elektroda akan hancur, mengeluarkan gas yang berfungsi sebagai perisai dan menyediakan lapisan terak yang melindungi daerah lasan dari kontaminasi atmosfer selama solidifikasi (Metal, 2000).

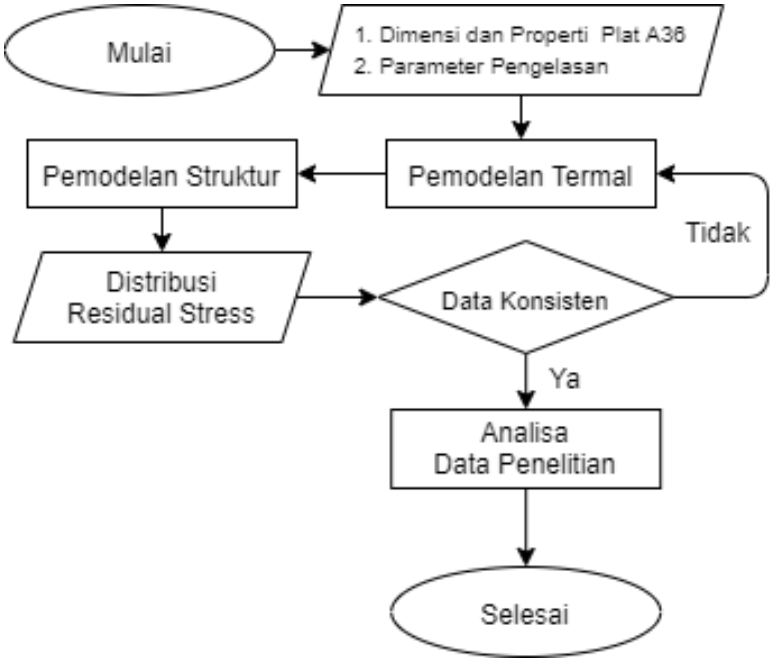


Gambar 2.5 Pengelasan SMAW (ESAB, 2000)

BAB III
METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

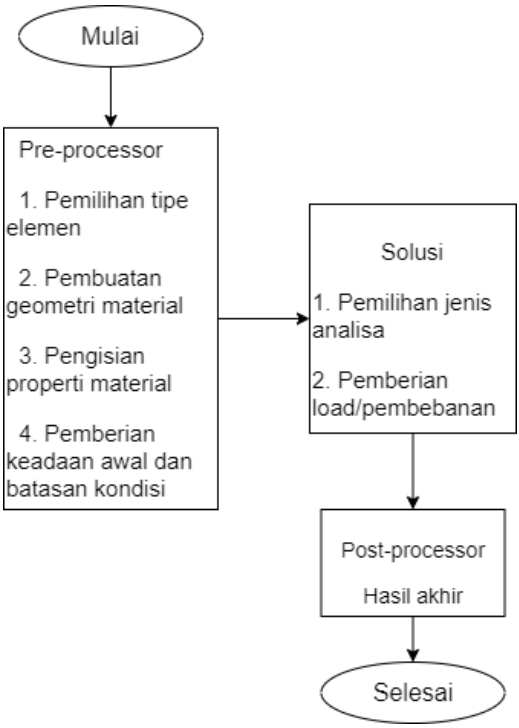
Adapun diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Pemodelan dengan ANSYS APDL 17

Rancangan pemodelan simulasi dengan menggunakan ANSYS APDL 17 dapat dilihat pada Gambar 3.2.

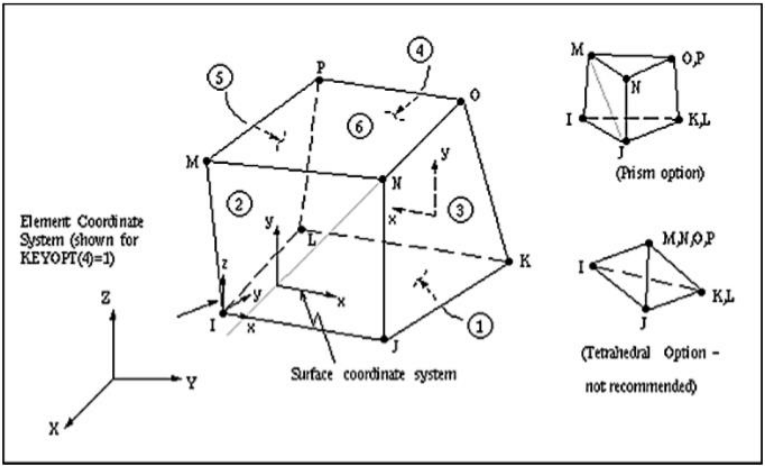


Gambar 3.2 Pemodelan dengan ANSYS APDL 17

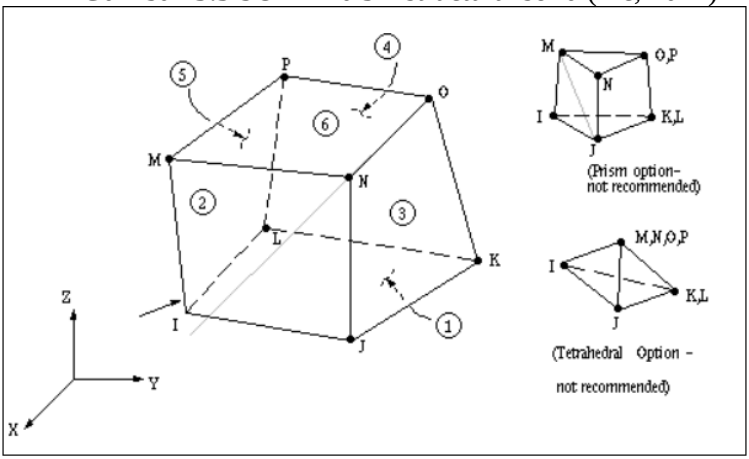
3.2.1 Preproses

Tipe elemen SOLID70 pada Gambar 3.3 akan digunakan untuk model termal dalam simulasi sesuai dengan itu karakteristik khusus yang memiliki delapan node dan derajat kebebasan tunggal. SOLID70 mampu mengkompensasi aliran panas transportasi massa dari medan kecepatan konstan pada model termal pelat logam

(Matweb, 2015). Jenis dan ukuran elemen yang dipilih untuk simulasi ini sangat penting dalam mencapai hasil yang akurat dan meminimalkan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan Analisis Elemen Hingga.



Gambar 3.3 SOLID70 3D structural solid (Inc, 2017)



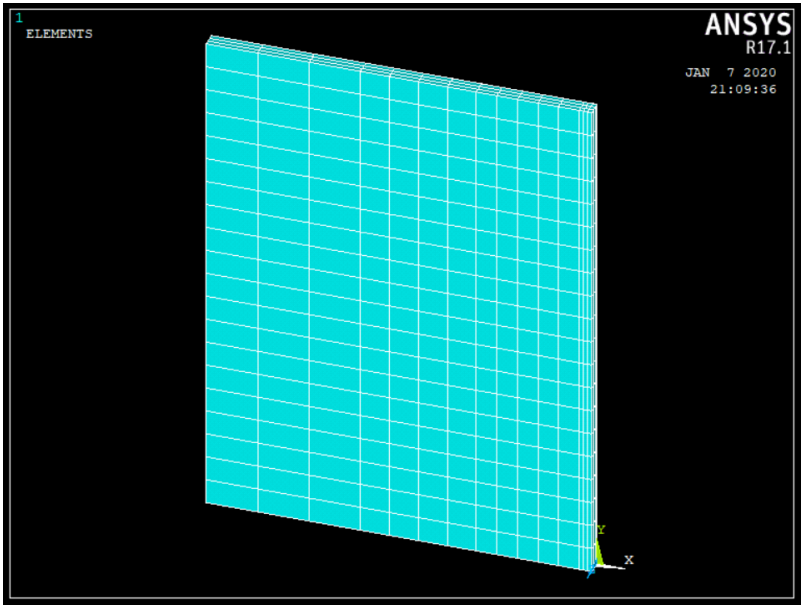
Gambar 3.4 SOLID185 3D structural solid (Inc, 2007)

Sifat-sifat yang bergantung pada temperatur termal dari baja karbon ASTM A36 seperti konduktivitas termal, kapasitas panas spesifik dan kepadatan pada Tabel 3.3 akan digunakan ke dalam sifat-sifat material dari elemen tipe SOLID70 untuk simulasi termal. Oleh karena itu, model termal pengelasan SMAW *butt-joint* akan memiliki karakteristik yang mirip dengan ASTM A36 sehingga efek dari input panas dari proses pengelasan dapat disimulasikan.

Pemodelan model termal pengelaasan SMAW *butt-joint* akan dihasilkan dengan menggunakan teknik generasi langsung karena geometri pelat logam tidak kompleks. Mengingat lokasi jalur pengelasan berada di tengah pelat logam, hanya setengah pelat logam yang akan dimodelkan untuk menyederhanakan simulasi karena pelat logam lasan simetris. Sehingga beban komputasi berkurang dan mengurangi waktu komputasi (Narayanan & Dixit, 2015). Geometri pada *butt-joint* SMAW akan dimodelkan dengan tiga ketebalan pelat logam yang berbeda sesuai Tabel 3.6.

Untuk menganalisa distribusi panas dari proses pengelasan pada pelat logam, zona yang terpengaruh panas di dekat garis pengelasan akan dimodelkan dengan ukuran mata jaring yang lebih halus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8. Ketika jaring yang lebih halus diaplikasikan di sepanjang garis lasan, jumlah elemen dan simpul pada geometri pelat logam akan meningkat dan akurasi data yang lebih tinggi dari distribusi panas di sepanjang garis lasan dapat dicapai. Setelah Analisa panas selesai dilakukan perubahan elemen otomatis dari SOLID70 menjadi SOLID185 untuk menganalisa struktural dari pelat logam. Tipe elemen SOLID185 dapat dilihat di gambar 3.4.

\



Gambar 3.5 Model meshed dari geometri pelat lasan

3.2.2 Solusi

Simulasi termal pada pengelasan SMAW *butt-joint* dilakukan dengan menggunakan analisis termal transien. Analisis perpindahan panas terutama simulasi pengelasan biasanya dilakukan dengan menggunakan analisis termal dan structural transien karena distribusi suhu pada pelat logam akan bervariasi sesuai waktu. Berbeda dari analisis termal kondisi tunak, beban termal dalam analisis transien akan diterapkan dalam fungsi waktu atau beban

3.2.3 Postproses

Hasil dari simulasi termal SMAW *butt-joint* akan diamati dan dianalisis selama tahap akhir ini. Perubahan suhu pada pelat logam akan ditampilkan dalam bentuk kontur panas untuk

memvisualisasikan distribusi panas pada logam selama proses pengelasan. Oleh karena itu, pola plot kontur dari distribusi suhu, tegangan sisa dan distorsi pada nodal yang diinginkan pada pelat logam akan diperoleh dengan menggunakan *viewer* hasil.

3.3 Bahan Penelitian

3.3.1 Spesifikasi Material

Pada simulasi ini digunakan baja karbon ASTM A36 sebagai spesimen proses las *butt-joint* SMAW. Pemilihan material berdasarkan kebutuhan nyata industri yang banyak menggunakan baja karbon sebagai bahan lasan. ASTM A36 memiliki sifat mampu las yang baik dan dapat digunakan dalam berbagai macam proses permesinan. Tabel 3.2 menunjukkan ketergantungan sifat material terhadap suhu dari ASTM A36.

Tabel 3.1 Properti (a) fisik (b) mekanik (c) kimia material ASTM A36 (Matweb, 2015)

(a)

Physical Properties	Metric
Density	7.85 g/cc

(b)

Mechanical Properties	Metric
Tensile Strengh, Ultimate	400 – 550 MPa
Tensile Strengh, Yield	250 Mpa
Elongation at Break	20 – 23,0 %
Modulus of Elasticity	200 Gpa
Compressive Yield Strengh	152 Mpa
Bulk Modulus	140 Gpa
Possions Ratio	0,260
Shear Modulus	79,3 Gpa

Component Elements Properties	Metric
Carbon, C	0,260 %
Copper, Cu	0,20 %
Iron, Fe	99,0 %
Manganese, Mn	0.75 %
Phosphorous, P	≤ 0,040 %
Sulfur, S	≤ 0,050 %

(c)

Tabel 3.2 Sifat ASTM A36 terhadap suhu (Jeyakumar & Thankaiyan, 2013)

Temp (K)	Thermal conductivity W/(mK)	Density (kg/m^3)	Heat transfer coefficient W/(m^{2}K)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient (10^{-6}K^{-L})	Yie1d stress (MPa)
273	60	7880	15,9	210	0280	1,10	380
373	50	7880	16,5	200	0,285	1,15	340
473	45	7800	17,3	200	0290	1,20	315
673	38	7760	20,1	170	0,310	1,30	2,30
873	30	7600	24,6	80	0,330	1,42	110
1073	25	7520	31,4	35	0,330	1,45	30
1473	28	7300	53,6	15	0360	1,45	20
1573	37	7250	61,2	10	0,380	1,45	18
1823	37	7180	84,8	10	0,390	1,45	15

3.3.2 Elektroda

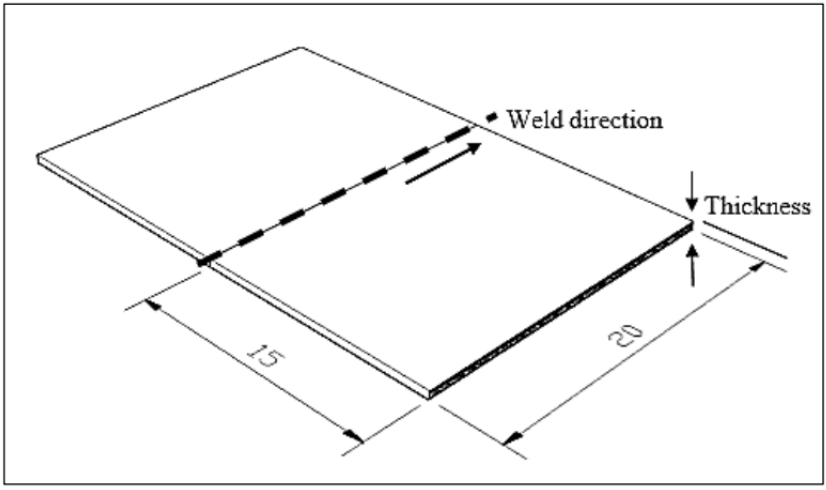
Untuk mesimulasikan proses las SMAW dipilih parameter berdasarkan tipe elektroda dan spesifikasi penggunaannya. Tipe elektroda yang dipilih akan menentukan jankauan amper pada simulasi las. Tabel 3.2 menunjukkan jenis elektroda dengan spesifikasi dan penggunaan masing-masing. Jadi, elektroda E6013 dipilih karena penggunaannya umum dan tingkat penetrasi yang rendah karena ketebalan logam untuk simulasi ini bervariasi dari 2 mm hingga 6 mm.

Tabel 3.3 Spesifikasi elektroda (Electric, 1994)

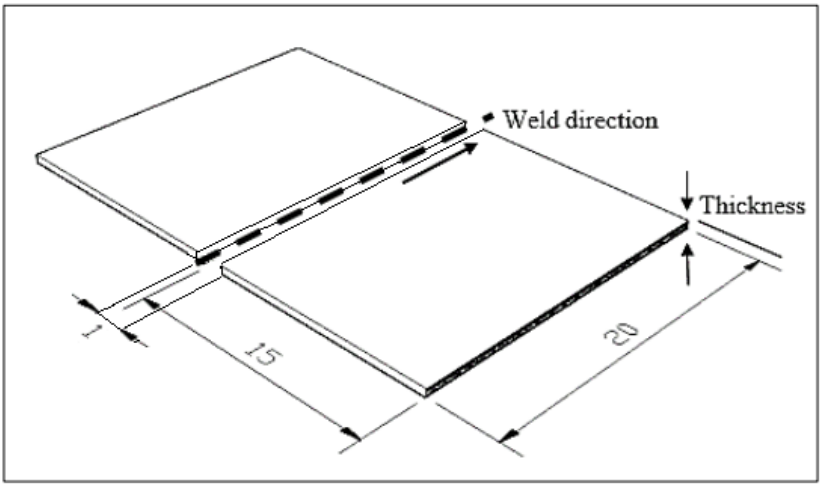
Electrode	DC	AC	Penetration	Usage
6010	EP	✓	Deep	Rough, high spatter
6011	EP	✓	Deep	
6013	EP,EN	✓	Low	General
7014	EP,EN	✓	Medium	Smooth, easy, fast
7018	EP	✓	Medium	Low hydrogen, strong
7024	EP,EN	✓	Low	Smooth, easy, faster
NI-CL	EP	✓	Low	Cast Iron
3D8L	EP	✓	Low	Stainless

3.3.3 Geometri

Pada penelitian ini, simulasi pengelasan SMAW pada *butt-joint* dilakukan dengan metode elemen hingga. Untuk mencapai tujuan pada pengelasan ini menggunakan variasi ketebalan pelat. Tiga variabel untuk ketebalan pelatnya adalah 2mm, 4mm dan 6mm akan disimulasikan.



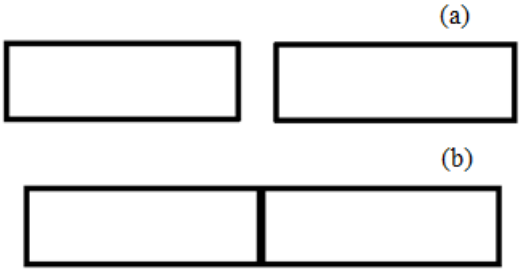
Gambar 3.6 Geometri spesimen *closed square*



Gambar 3.7 Geometri spesimen *square*

Tipe sambungan yang akan disimulasikan pada penelitian ini adalah 2 tipe sambungan yang umum digunakan untuk pelat tipis, diantaranya :

1. Tipe sambungan *closed square*, pada sambungan ini diasumsukan tidak ada celah.
2. Tipe sambungan *square*, celah sambungan yang digunakan untuk sambungan ini 1 cm.



Gambar 3.8 Tipe sambungan *butt-joint* (a) square (b) closed square

3.4 Parameter Pengelasan

Tabel 3.4 Parameter pengelasan

Parameter	Nilai
Diameter Elektroda	6.35 mm
Arus	300A
Tegangan	32V
Kecepatan Pengelasan	20mm/detik
Efisiensi Pengelasan	75%
Koefisien konveksi udara	15 W/m^2 °C
Temperatur kamar	27°C

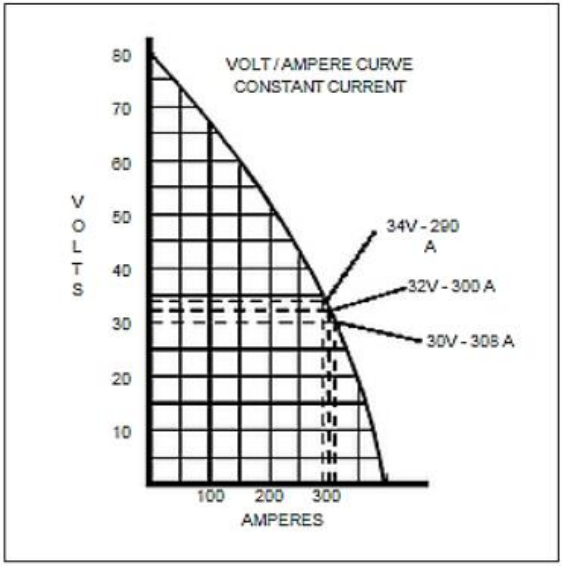
Berdasarkan jenis elektroda yang dipilih yaitu E6013, pemodelan proses pengelasan untuk simulasi termal ini dilakukan pada arus operasi sesuai dengan ukuran elektroda seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.3(Electric, 1994). Oleh karena itu, untuk memaksimalkan efek distribusi panas selama proses penyambungan, rentang ampere maksimum yaitu 300A untuk diameter elektroda 0,25 inci akan digunakan untuk mensimulasikan proses pengelasan. Dengan demikian, efek pada pelat logam dari distribusi panas dari proses pengelasan akan lebih jelas untuk analisis dan interpretasi hasil.

Tabel 3.5 Amperage range SMAW menurut ukuran elektroda (Electric, 1994)

Electrode	Diameter (inch)	Amperage Range							
		50	100	150	200	250	300	350	400
6013	1/16								
	5/64								
	3/32								
	1/8								
	5/32								
	3/16								
	7/32								
	1/4								

Dalam proses SMAW yang sebenarnya, arus atau arus listrik diatur oleh operator saat tegangan dirancang ke dalam unit. Jenis mesin ini sering disebut '*Drooper*'. Gambar 3.3 menampilkan kurva ampere tegangan arus konstan untuk proses pengelasan (ESAB, 2000). Dari kisaran ampere kerja 300A, pasokan tegangan untuk proses akan diatur oleh *drooper* berdasarkan grafik yang memplot kurva volt-ampere yang menunjukkan sekitar 32V pasokan tegangan untuk ampere kerja pada 300A telah dipilih untuk mensimulasikan kondisi pengelasan dalam analisis termal.

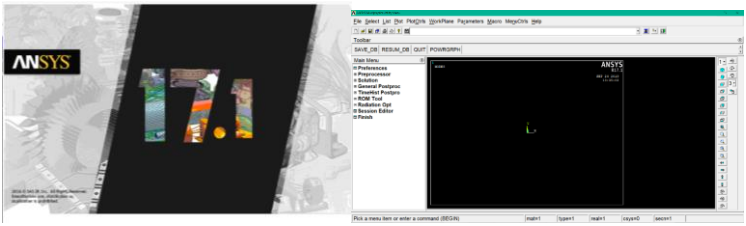
Nilai tegangan busur pengelasan dan arus busur pengelasan dipilih pada kisaran maksimum untuk membuat efek pada distribusi suhu pada pelat logam lebih terlihat. Oleh karena itu, hasil dari analisis termal dapat dengan mudah dianalisis. Namun, dalam industri, SMAW untuk ketebalan pelat logam 2mm hingga 6mm biasanya dilakukan dengan 240A dan tegangan dari 15 hingga 45 V. Pemilihan catu daya yang tepat untuk proses pengelasan tergantung pada jenis logam yang dilas, jenis dan panjang elektroda, dan kedalaman penetrasi las diperlukan.



Gambar 3.9 Gambar kurva arus tegangan konstan *(ESAB, 2000)*

3.5 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini berupa perangkat lunak (*software*) yaitu ANSYS *Workbench* dan APDL. Simulasi panas unutk proses SMAW pada *butt joint* untuk penelitian ini akan dilakukan menggunakan APDL untuk mensimulasikan proses las yang aktual berdasarkan parameter las yang telah dipilih.



Gambar 3.10 ANSYS APDL 17

3.6 Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian untuk mendapatkan data yang sesuai dengan tujuan penelitian. Pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut

Tabel 3.6 Variasi pengujian

Ketebalan	Variasi
2 mm	Closed Square Square
4 mm	Closed Square Square
6 mm	Closed Square Square

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan membahas mengenai hasil simulasi sistem yang telah dirancang dan dibuat. Pengujian dilakukan untuk menganalisis hubungan antara ketebalan, tipe sambungan *butt-joint*.

4.1 Perhitungan Pembebanan SMAW

Untuk beban dalam model plat *butt-joint* ini akan dibebankan pada elemen load yang secara otomatis oleh ANSYS ditransfer menjadi nodal load. Input beban yang dimasukkan dalam analisa adalah berupa *heat flux*, besarnya *heat flux* efektif yang dihasilkan oleh busur las dengan satuan watt seperti telah di cantumkan pada Gambar 3.9. Dimana, Tegangan busur las = 32 V, Arus busur las = 300 A =4,868 × 10^3 $m^{2.}$

Sumber panas

$$H = VI$$

$$H = 32\ x\ 300 = 9600\ watt$$

Sumber panas efektif busur

$$Qi = \eta_a \mathrm{VI}$$

$$Qi = 75\% \text{ x } 9600$$

$$Qi = 7200\ watt$$

Sumber Energi (*heat input)*

$$hi = 60\ X\ (VI/\ v)$$

$$hi = 60\ X\ (9600/\ 0{,}02)$$

$$hi = 28800\ kj$$

Heat Flux Elektroda

$$Q = \eta VI / A$$

= 75% × 32 Volt × 300Ampere / (4,868 × 10^3 m^2)

= 96.7×106 Watt/ m^2

4.2 Hasil Simulasi

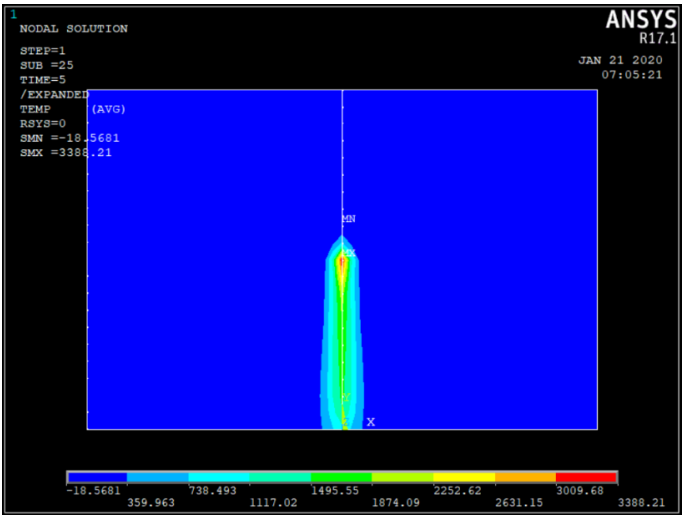
Hasil Simulasi Pengelasan dengan pembebanan termal dan structural dilakukan pada beberapa macam ketebalan, yaitu 2 mm, 4 mm, dan 6 mm dengan variasi jenis sambungan berbeda meliputi variasi *butt-joint* tipe *closed square* dan *square*.

4.2.1 Pengelasan Pelat Ketebalan 2 mm

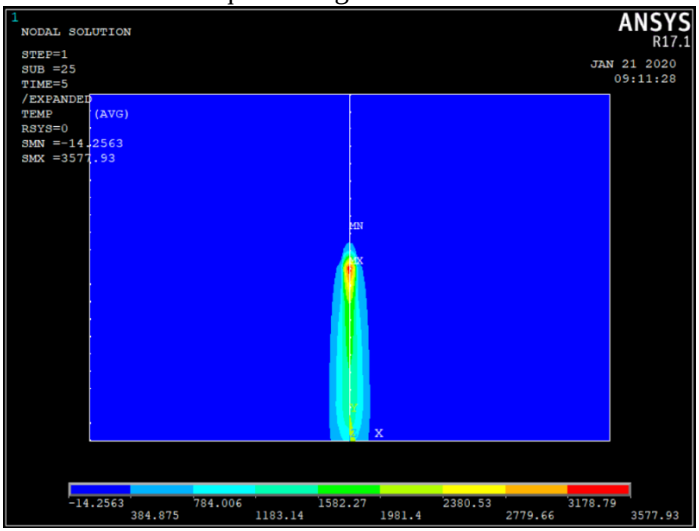
Berikut akan dijelaskan distribusi panas, distribusi tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan pelat dengan ketebalan 2mm.

1. **Distribusi Panas pada Saat Pengelasan**

Temperatur pada proses ini terdistribusi tepat seperti acuan teori sebaran panas pada pelat pejal yaitu temperature tertinggi pada daerah yang dikenai busur lasan. Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 adalah plot temperature pengelasan pada step ke-1 (detik ke-5) dengan temperature puncak 3388,21 derajat celcius pada sambungan closed square, dan 3577,93 derajat celcius pada sambungan square.



Gambar 4.1 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan closed square dengan ketebalan 2 mm



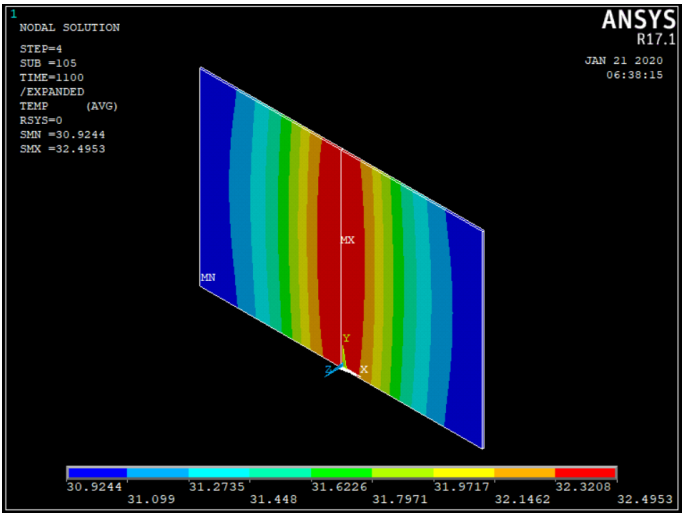
Gambar 4.2 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan square dengan ketebalan 2 mm

Selain perbedaan temperatur puncak, terdapat perbedaan pada distribusi panas kedua jenis sambungan. Perbedaannya yaitu bentuk persebaran panas pada sambungan square lebih lancip di bagian depan karena energi panas lasan lebih fokus ke daerah lasan membentuk *filler* daerah celah pada sambungan *square*. Sedangkan pada sambungan *closed square* panas terdistribusi lebih merata.

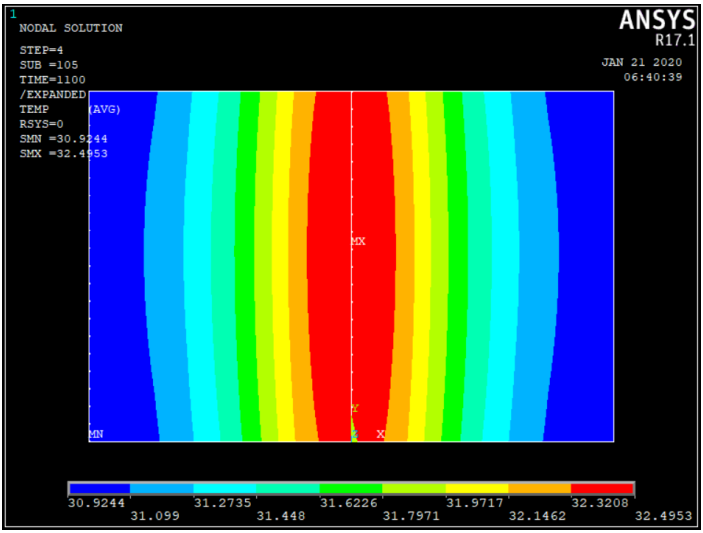
2. Distribusi Panas setelah Pengelasan

Setelah pengelasan distribusi temperature menjadi lebih merata, dimana temperature puncak terletak pada daerah yang dikenai busur las. Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 merupakan plot temperature pada waktu 1100 detik simulasi dimana spesimen las telah mengalami pendingian. Pada sambungan *closed square* temperature puncaknya 32,4953 derajat celcius dan pada sambungan *square* 29,2494 derajat celcius.

Distribusi panas pada sambungan *closed square* dan *square* memiliki perbedaan. Dimana pada sambungan *closed square* persebaran panasnya lebih merata namun suhunya lebih tinggi. Hal tersebut diakibatkan oleh perbedaan penyerapan energi panas pada kedua jenis sambungan. Kemudian pada sambungan *square* distribusi panasnya lebih berpusat di tengah pelat, hal ini merupakan pengaruh dari celah lasan pada sambungan *square*. Sedangkan pada sambungan *closed square* lebih melebar karena sumber panas lebih banyak mengenai pelat dibandingkan sambungan *square*.

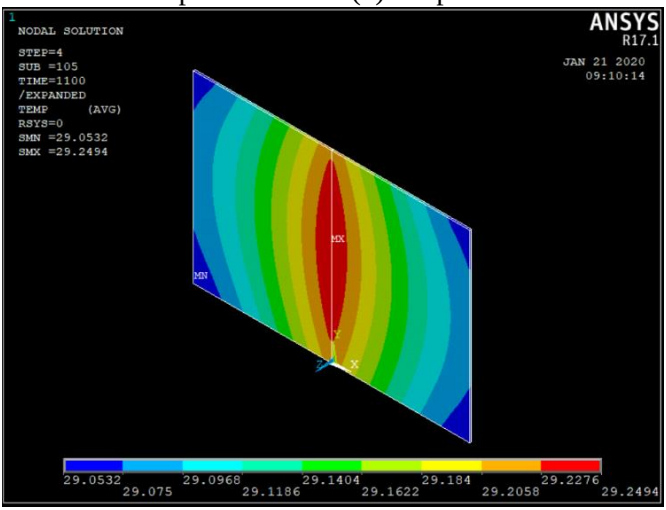

1
NODAL SOLUTION
STEP=4
SUB =105
TIME=1100
/EXPANDED
TEMP (AVG)
RSYS=0
SMN =30.9244
SMX =32.4953
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
06:38:15
MX
MN
Y
Z
X
30.9244
31.099
31.2735
31.448
31.6226
31.7971
31.9717
32.1462
32.3208
32.4953

(a)

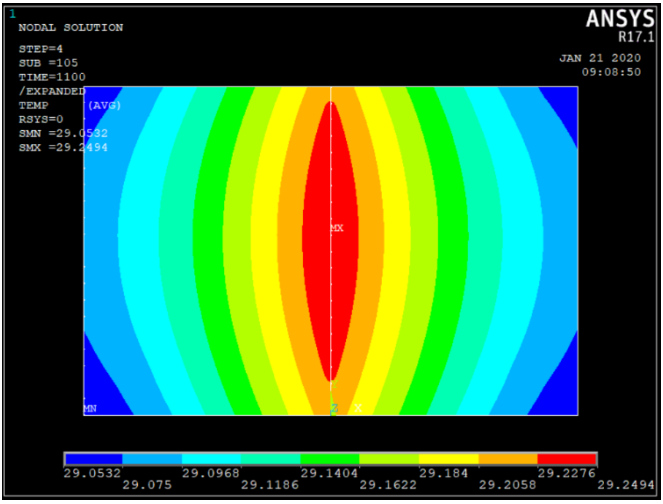

1
NODAL SOLUTION
STEP=4
SUB =105
TIME=1100
/EXPANDED
TEMP (AVG)
RSYS=0
SMN =30.9244
SMX =32.4953
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
06:40:39
MX
MN
Y
Z
X
30.9244
31.099
31.2735
31.448
31.6226
31.7971
31.9717
32.1462
32.3208
32.4953

(b)

Gambar 4.3 Distribusi panas jenis sambungan *closed square* (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas



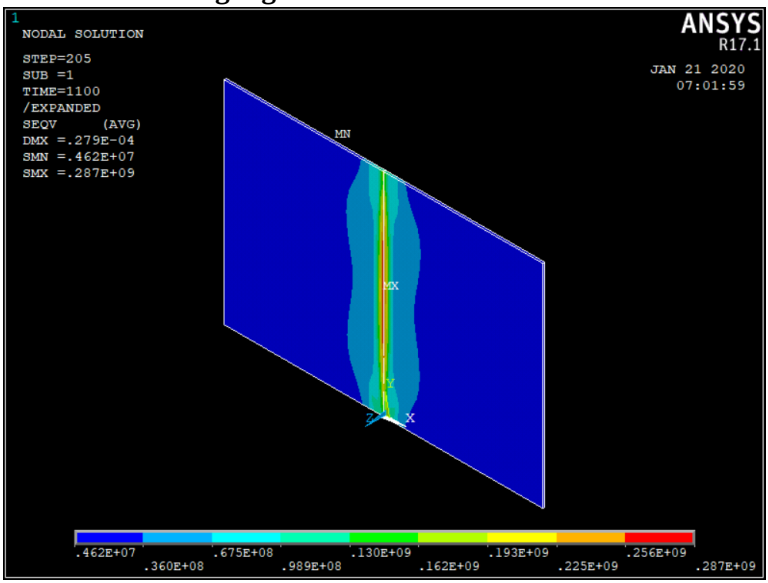
(a)



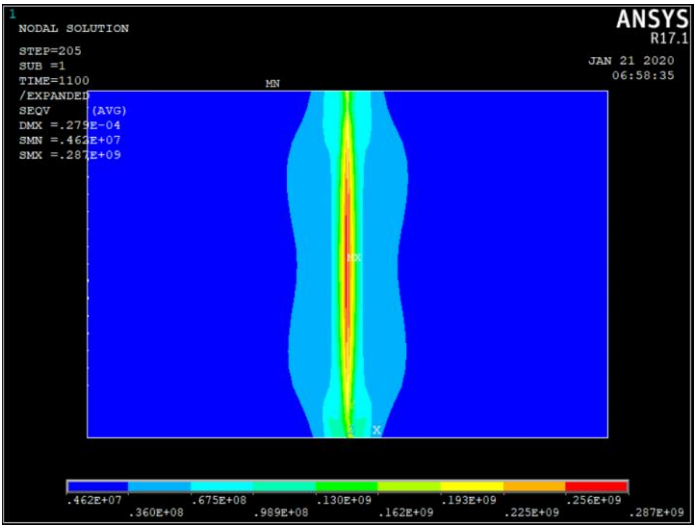
(b)

Gambar 4.4 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 2 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas

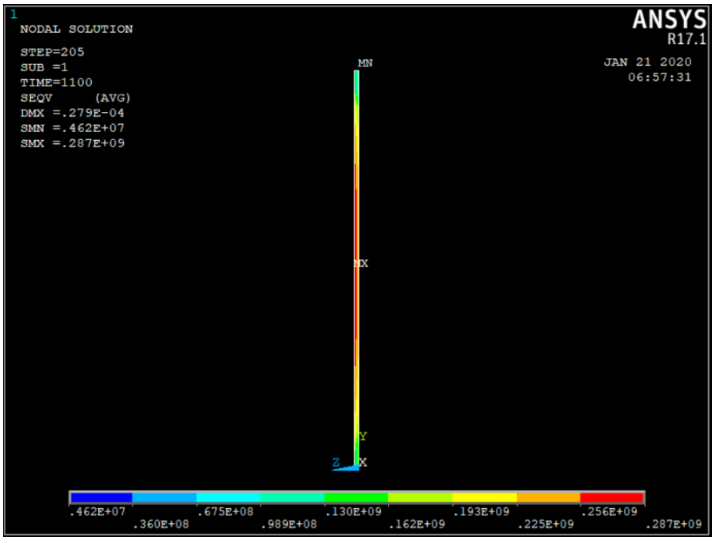
3. Distribusi Tegangan Sisa



(a)

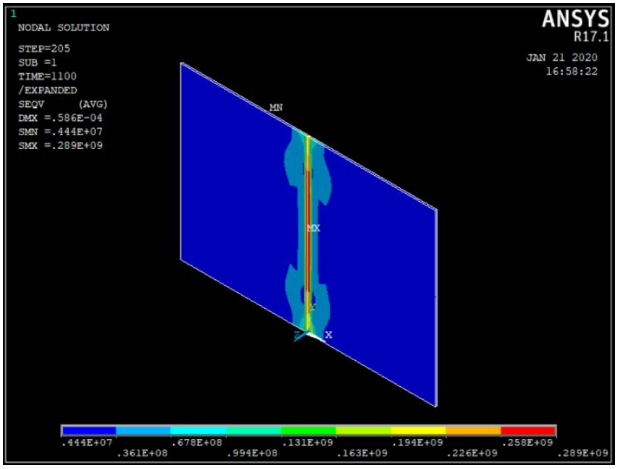

1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
SEQV (AVG)
DMX =.279E-04
SMN =.462E+07
SMX =.287E+09
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
06:58:35
MN
MX
.462E+07
.360E+08
.675E+08
.989E+08
.130E+09
.162E+09
.193E+09
.225E+09
.256E+09
.287E+09

(b)

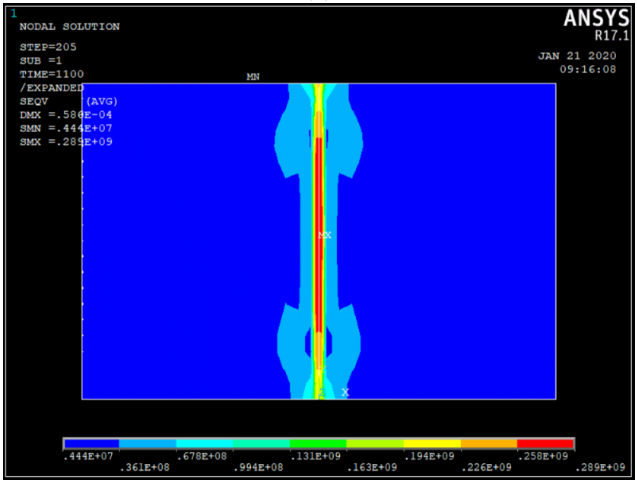

1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
SEQV (AVG)
DMX =.279E-04
SMN =.462E+07
SMX =.287E+09
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
06:57:31
MN
MX
Y
Z
X
.462E+07
.360E+08
.675E+08
.989E+08
.130E+09
.162E+09
.193E+09
.225E+09
.256E+09
.287E+09

(c)

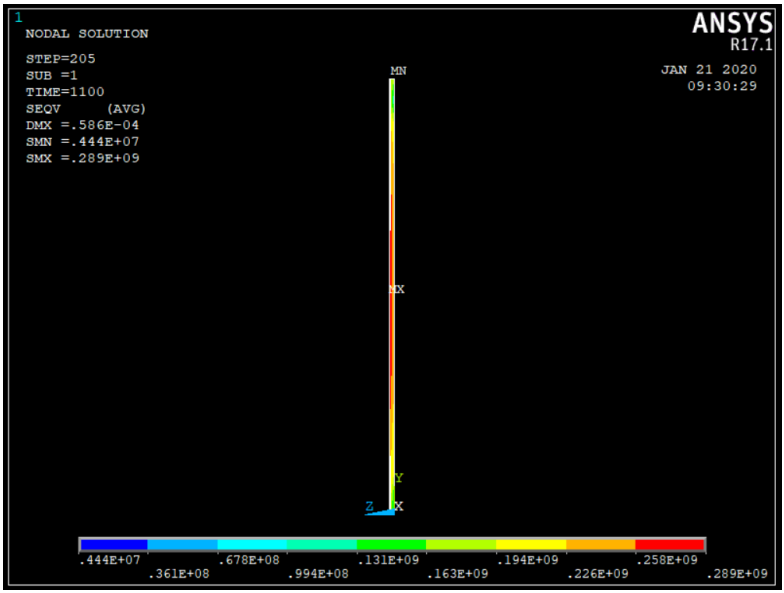
Gambar 4.5 Distribusi tegangan sisa jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 2 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping



(a)



(b)



(c)

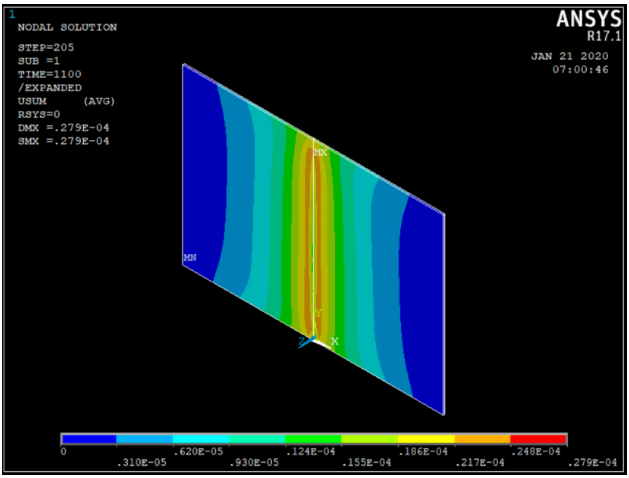
Gambar 4.6 Distribusi tegangan sisa jenis sambungan *square* dengan ketebalan 2 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping

Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 merupakan hasil plot tegangan sisa yang didapat dari pemodelan structural. Pada sambungan *closed square* tegangan sisa maksimalnya 287 MPa, dan pada sambungan *square* tegangan sisanya 289 MPa. Kedua jenis sambungan memiliki tegangan sisa yang tidak jauh berbeda.

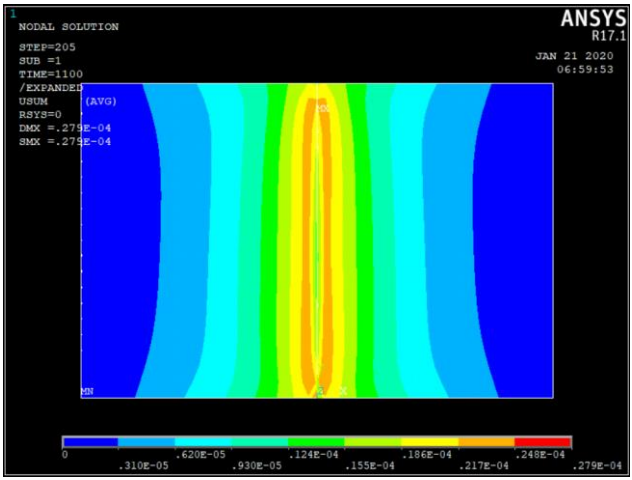
4. Distorsi

Distorsi pada pemodelan struktural gambarkan dengan plot pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8. Distorsi maksimal yang terjadi pada sambungan *closed square* 0,0279 mm dan pada sambungan *square* 0,0586 mm. Distorsi maksimal yang terjadi pada

sambungan *square* lebih besar dan lebih rapat di daerah pengelasan.

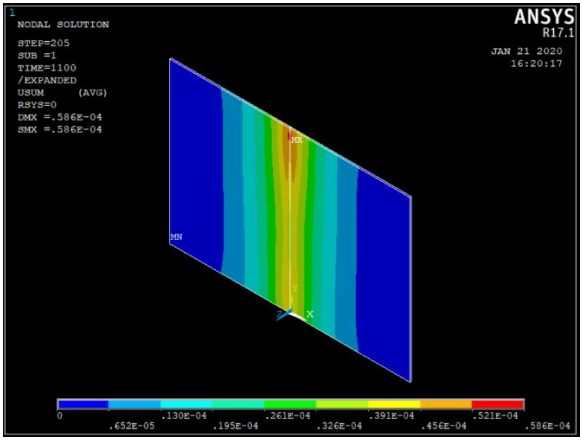


(a)

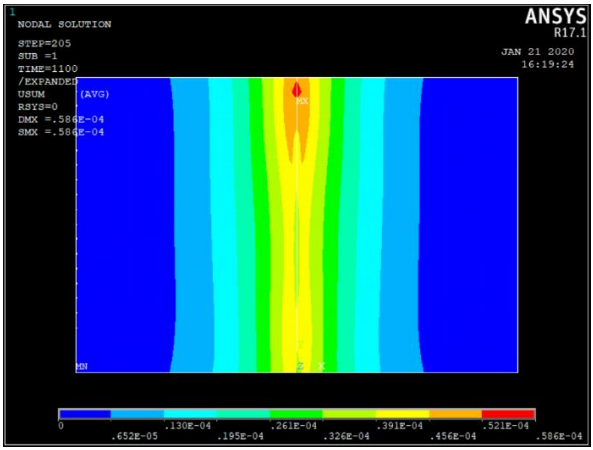


(b)

Gambar 4.7 Distorsi pada jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 2 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas



(a)



(b)

Gambar 4.8 Distorsi pada jenis sambungan *square* dengan ketebalan 2 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas

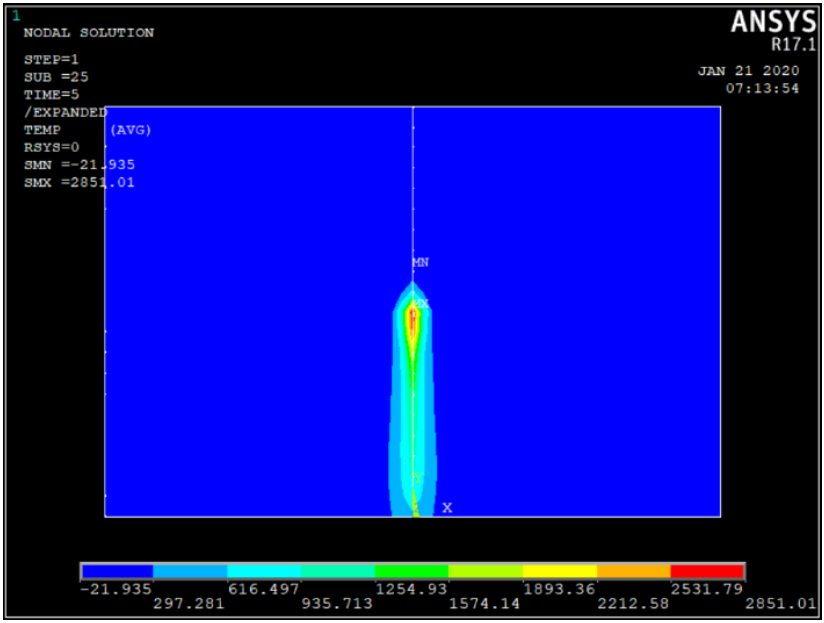
4.2.2 Pengelasan Pelat Ketebalan 4 mm

Berikut akan dijelaskan distribusi panas, distribusi tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan pelat dengan ketebalan 4mm.

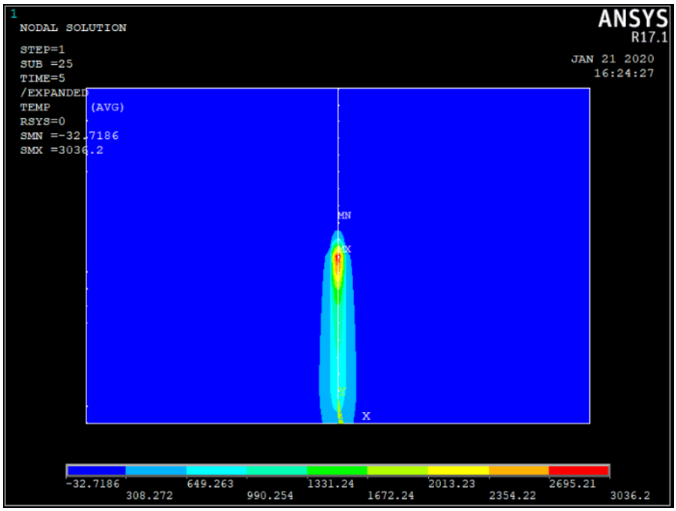
1. Distribusi Panas pada Saat Pengelasan

Temperatur pada proses ini terdistribusi tepat seperti acuan teori sebaran panas pada pelat pejal yaitu temperature tertinggi pada daerah yang dikenai busur lasan. Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 adalah plot temperature pengelasan pada step ke-1 (detik ke-5) dengan temperature puncak 2851,01 derajat celcius pada sambungan *closed square*, dan 3036.2 derajat celcius pada sambungan *square*.

Sama seperti pada ketebalan 2 mm, terdapat perbedaan temperatur puncak dan perbedaan pada distribusi panas pada kedua jenis sambungan. Perbedaannya yaitu bentuk persebaran panas pada sambungan *square* lebih lancip di bagian depan karena energi panas lasan lebih fokus ke daerah lasan membentuk filler daerah celah pada sambungan *square*. Sedangkan pada sambungan *closed square* panas terdistribusi lebih merata.

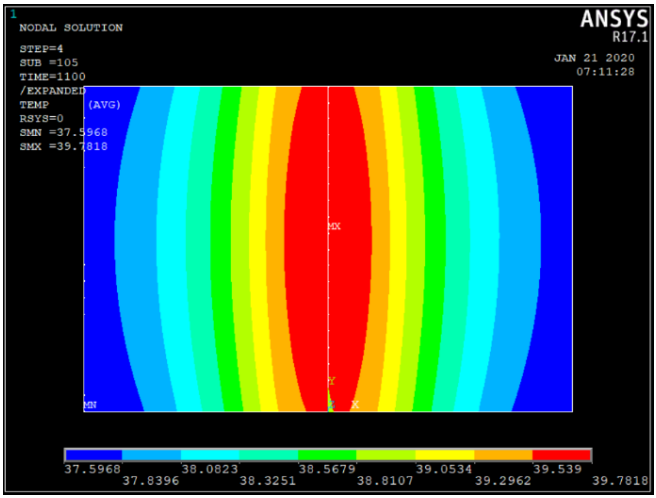


Gambar 4.9 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 4 mm

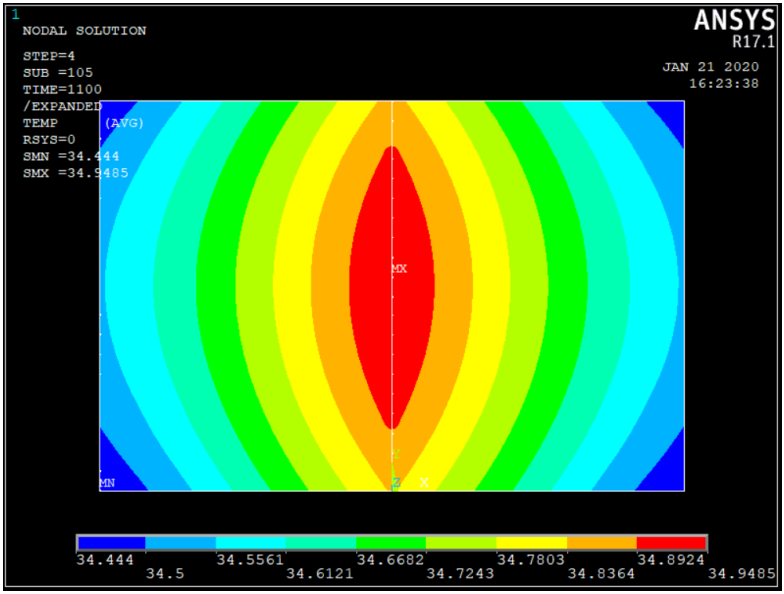


Gambar 4.10 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 4 mm

2. Distribusi Panas setelah Pengelasan



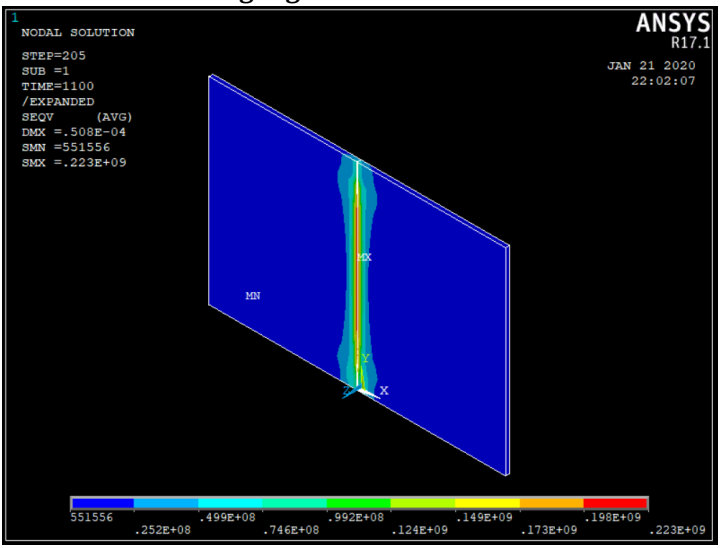
Gambar 4.11 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 4 mm



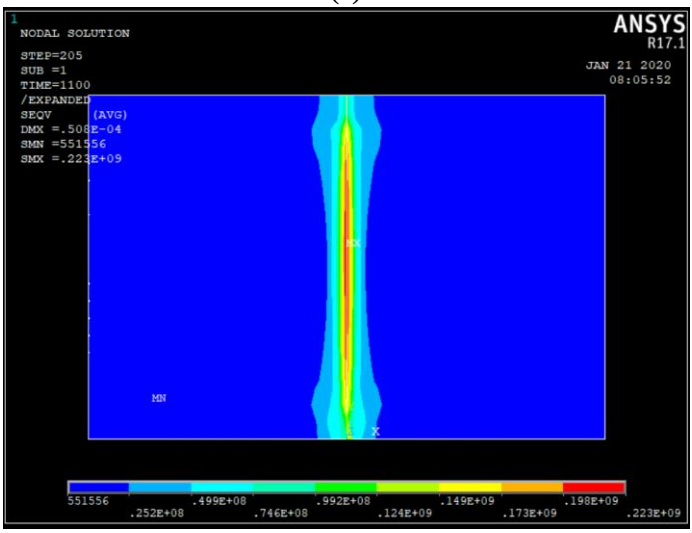
Gambar 4.12 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 4 mm

Setelah pengelasan distribusi temperature menjadi lebih merata, dimana temperature puncak terletak pada daerah yang dikenai busur las. Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 merupakan plot temperature pada waktu 1100 detik simulasi dimana spesimen las telah mengalami pendingian. Pada sambungan *closed square* temperature puncaknya 39,7818 derajat celcius dan pada sambungan *square* 34,9485 derajat celcius.

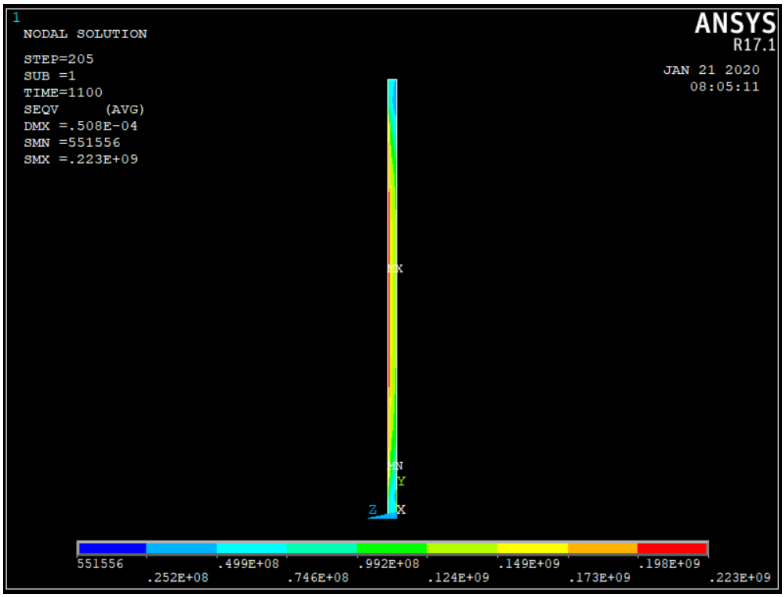
3. Distribusi Tegangan Sisa



(a)



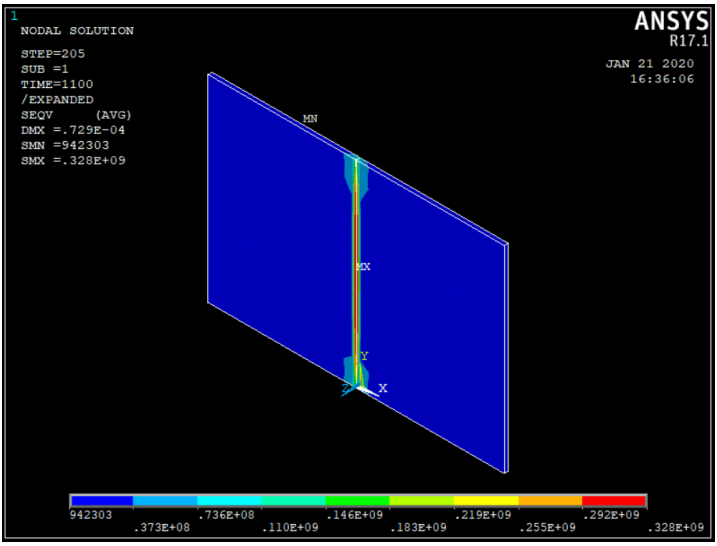
(b)



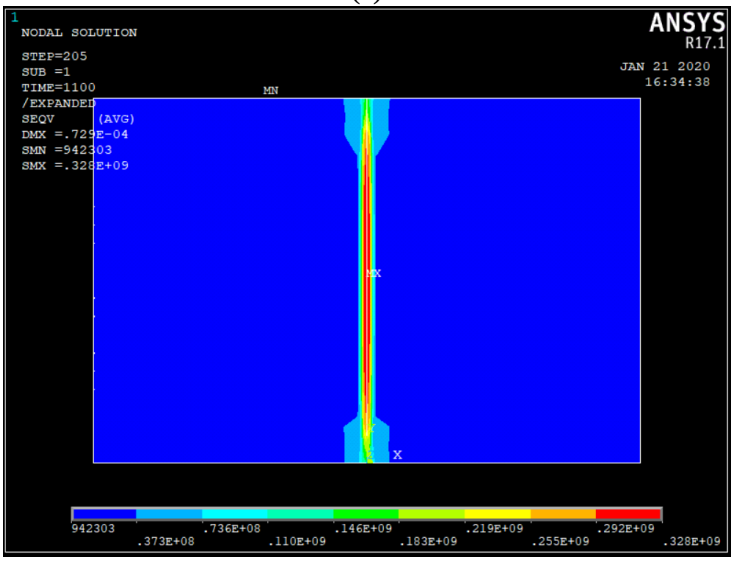
(c)

Gambar 4.13 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 4 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping

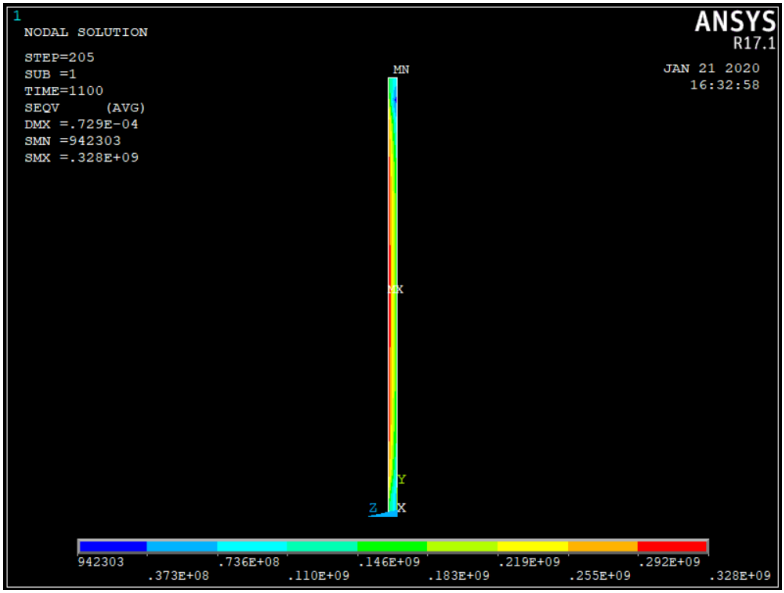
Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 merupakan hasil plot tegangan sisa yang didapat dari pemodelan struktural. Pada sambungan *closed square* tegangan sisa maksimalnya 223 MPa, dan pada sambungan *square* tegangan sisanya 328 MPa.


1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
SEQV (AVG)
DMX =.729E-04
SMN =942303
SMX =.328E+09
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
16:36:06
MN
MX
Y
X
942303
.373E+08
.736E+08
.110E+09
.146E+09
.183E+09
.219E+09
.255E+09
.292E+09
.328E+09

(a)


1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
SEQV (AVG)
DMX =.729E-04
SMN =942303
SMX =.328E+09
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
16:34:38
MN
MX
X
942303
.373E+08
.736E+08
.110E+09
.146E+09
.183E+09
.219E+09
.255E+09
.292E+09
.328E+09

(b)

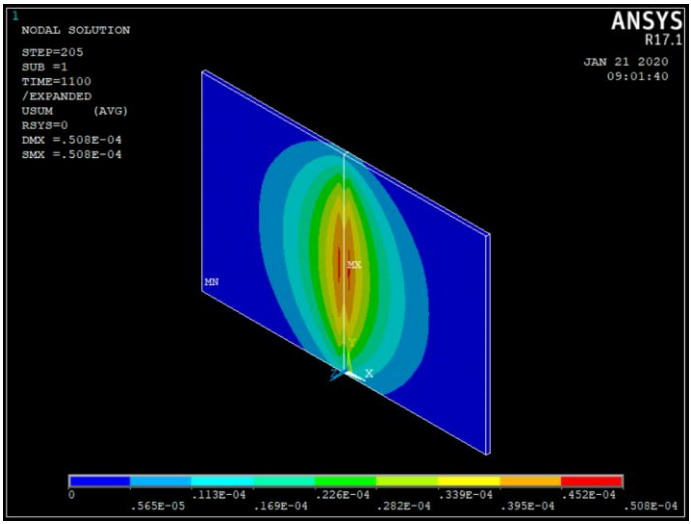


(c)

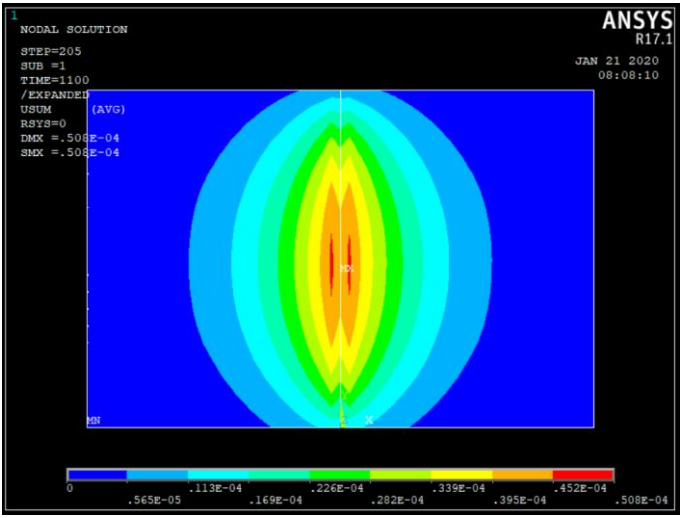
Gambar 4.14 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 4 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping

4. Distorsi

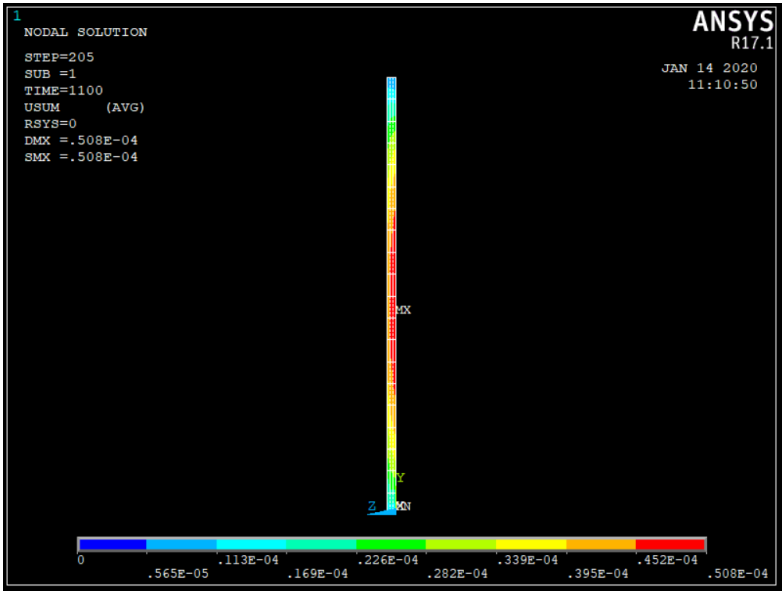
Distorsi pada pemodelan struktural gambarkan dengan plot pada Gambar 4.15 dan 4.16. Distorsi maksimal yang terjadi pada sambungan *closed square* 0,0508 mm dan pada sambungan *square* 0,0729 mm. Distorsi maksimal yang terjadi pada sambungan *square* lebih besar dan lebih rapat di daerah pengelasan.


1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.508E-04
SMX =.508E-04
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
09:01:40
MN
MX
0
.565E-05
.113E-04
.169E-04
.226E-04
.282E-04
.339E-04
.395E-04
.452E-04
.508E-04

(a)

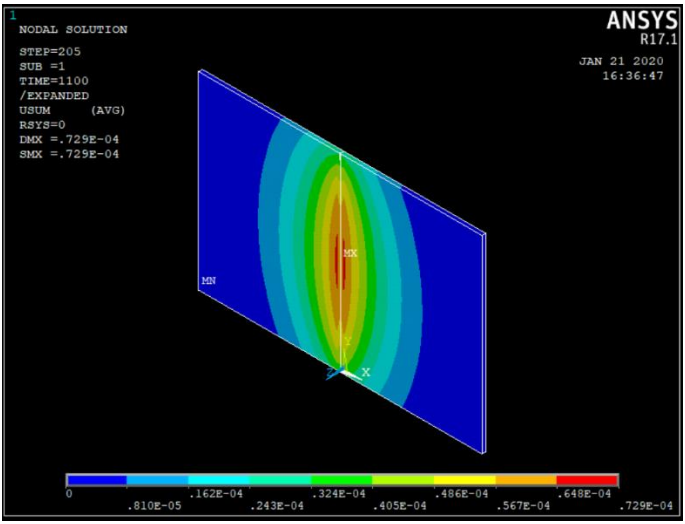

1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.508E-04
SMX =.508E-04
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
08:08:10
MN
MX
0
.565E-05
.113E-04
.169E-04
.226E-04
.282E-04
.339E-04
.395E-04
.452E-04
.508E-04

(b)

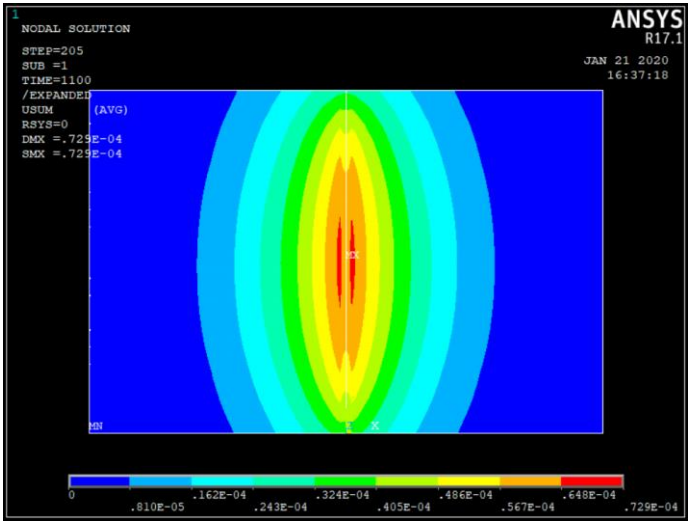


(c)

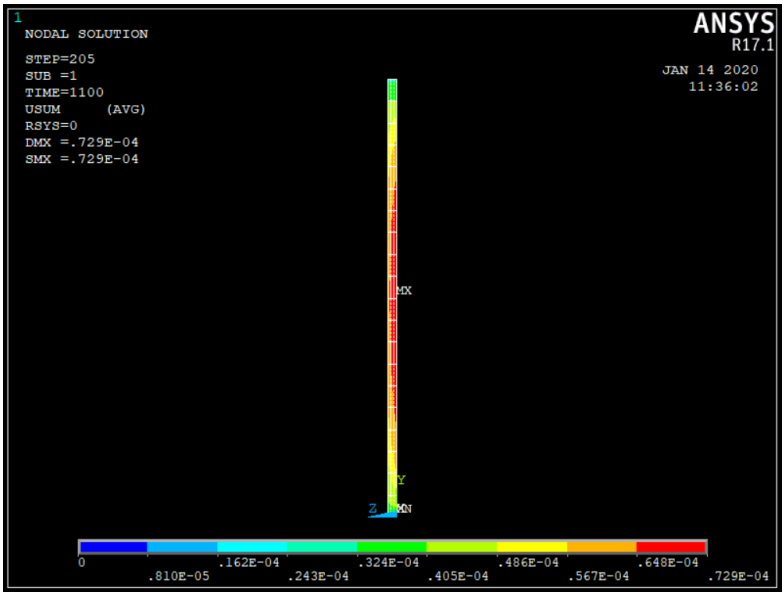
Gambar 4.15 Distorsi pada jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 4 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping


1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.729E-04
SMX =.729E-04
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
16:36:47
MX
MN
0
.810E-05
.162E-04
.243E-04
.324E-04
.405E-04
.486E-04
.567E-04
.648E-04
.729E-04

(a)


1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.729E-04
SMX =.729E-04
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
16:37:18
MX
MN
0
.810E-05
.162E-04
.243E-04
.324E-04
.405E-04
.486E-04
.567E-04
.648E-04
.729E-04

(b)



(c)

Gambar 4.16 Distorsi pada jenis *sambungan square* dengan ketebalan 4 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping

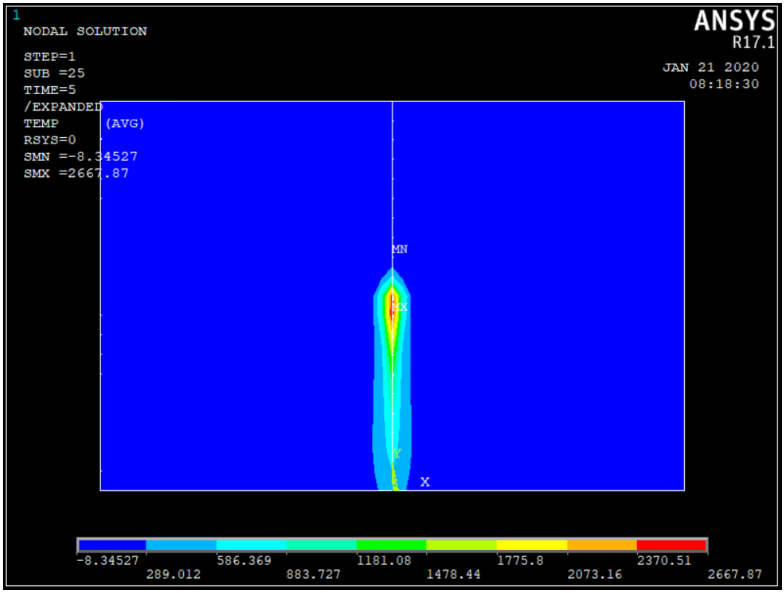
4.2.3 Pengelasan Pelat Ketebalan 6 mm

Berikut akan dijelaskan distribusi panas, distribusi tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan pelat dengan ketebalan 6mm.

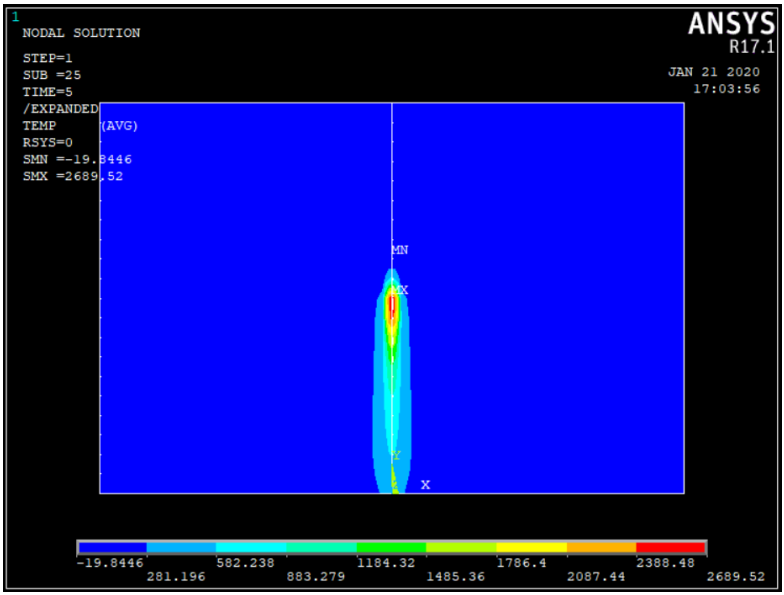
1. Distribusi Panas pada Saat Pengelasan

Temperatur pada proses ini terdistribusi tepat seperti acuan teori sebaran panas pada pelat pejal yaitu temperature tertinggi pada daerah yang dikenai busur lasan. Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 adalah plot temperature pengelasan pada *step* ke-1 (detik ke-5) dengan temperatur puncak 2667,51 derajat celcius pada sambungan *closed square*, dan 2689,52 derajat celcius pada

sambungan square. Kondisi pada proses ini sama seperti 2 ketebalan lainnya.



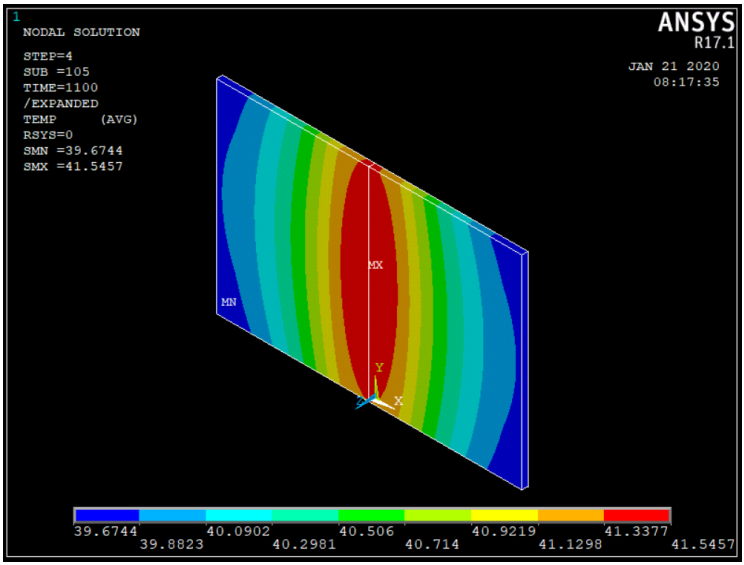
Gambar 4.17 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan *closed square* dengan ketabalan 6 mm



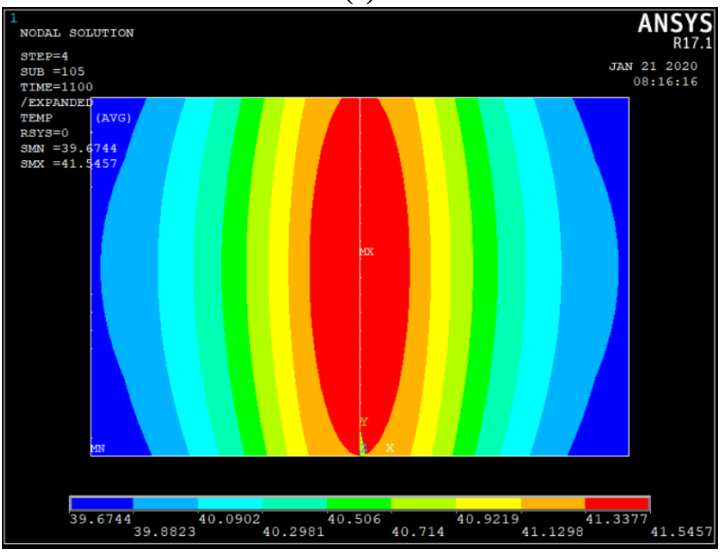
Gambar 4.18 Distribusi panas ketika pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 6 mm

2. Distribusi Panas setelah Pengelasan

Setelah pengelasan distribusi temperatur menjadi lebih merata, dimana temperature puncak terletak pada daerah yang dikenai busur las. Gambar 4.19 dan 4.20 merupakan plot temperature pada waktu 1100 detik simulasi dimana spesimen las telah mengalami pendingian. Pada sambungan *closed square* temperature puncaknya 32,4953 derajat celcius dan pada sambungan *square* 29,2494 derajat celcius.

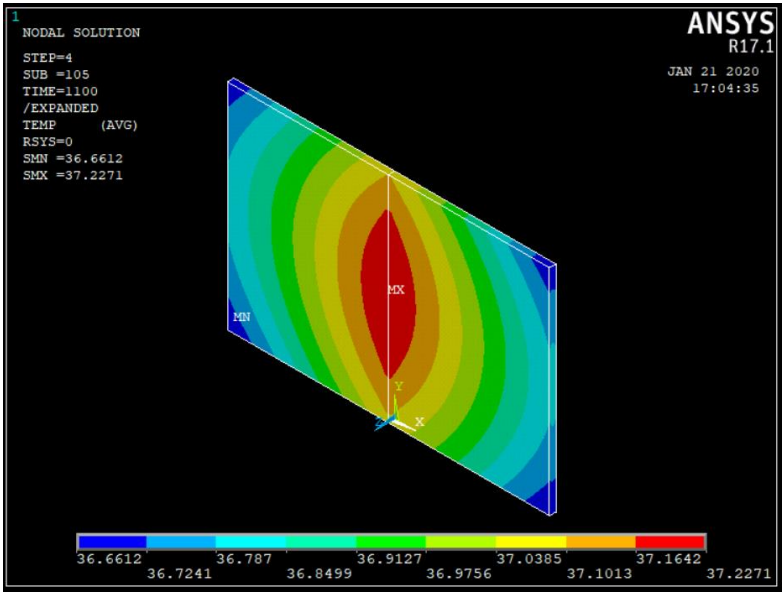

1
NODAL SOLUTION
STEP=4
SUB =105
TIME=1100
/EXPANDED
TEMP (AVG)
RSYS=0
SMN =39.6744
SMX =41.5457
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
08:17:35
MX
MN
Y
X
39.6744
39.8823
40.0902
40.2981
40.506
40.714
40.9219
41.1298
41.3377
41.5457

(a)

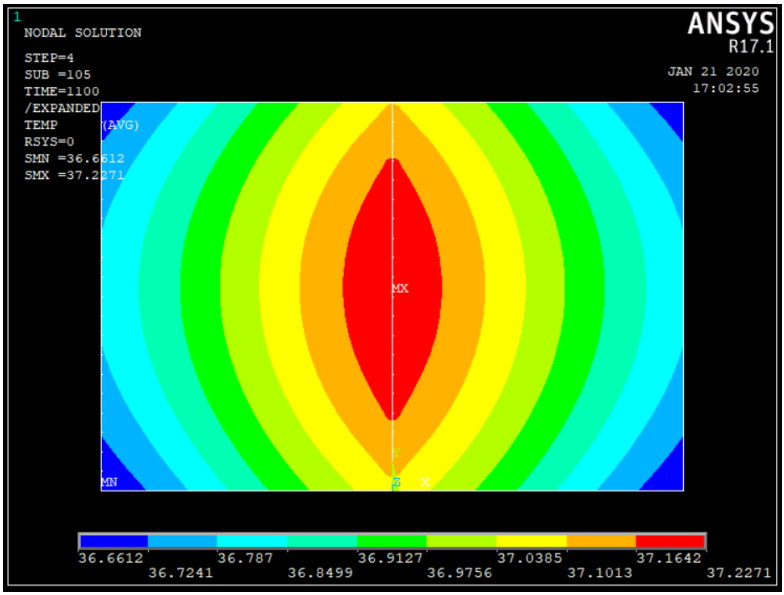

1
NODAL SOLUTION
STEP=4
SUB =105
TIME=1100
/EXPANDED
TEMP (AVG)
RSYS=0
SMN =39.6744
SMX =41.5457
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
08:16:16
MX
MN
Y
X
39.6744
39.8823
40.0902
40.2981
40.506
40.714
40.9219
41.1298
41.3377
41.5457

(b)

Gambar 4.19 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas



(a)

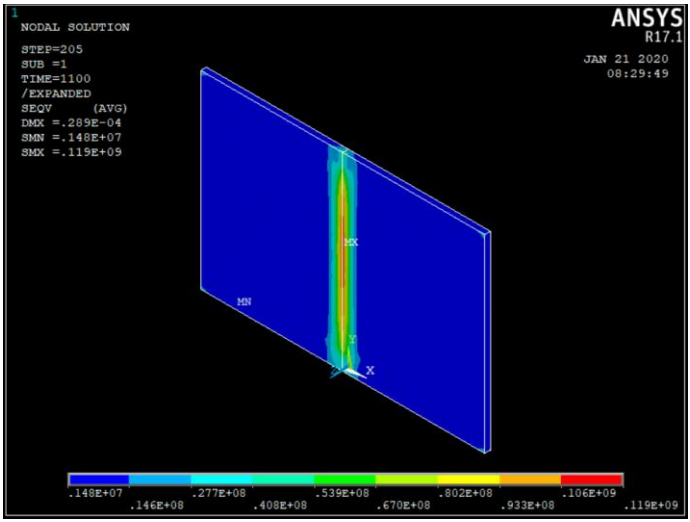


(b)

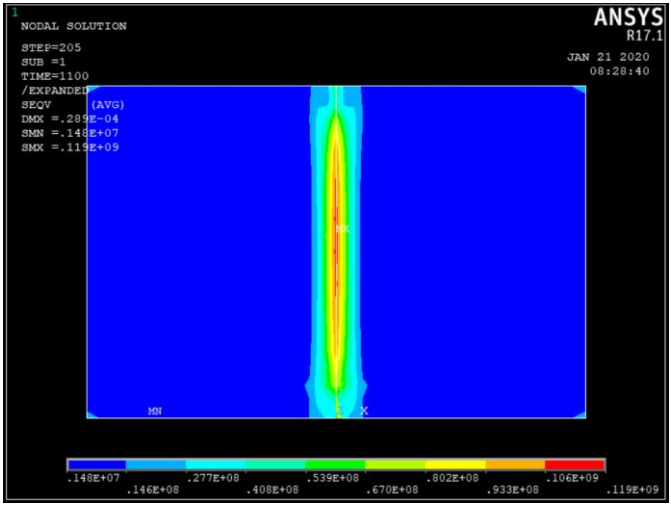
Gambar 4.20 Distribusi panas setelah pengelasan jenis sambungan *square* dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas

3. Distribusi Tegangan Sisa

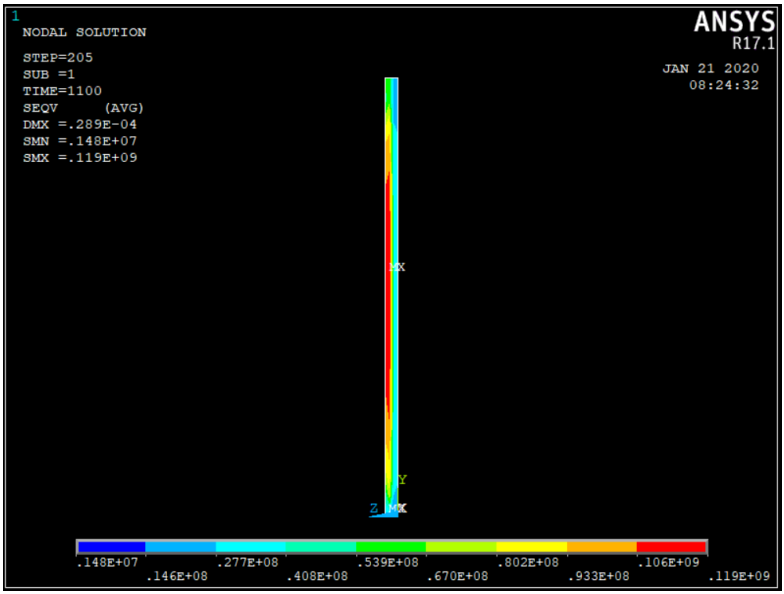
Gambar 4.21 dan Gambar 4.22 merupakan hasil plot tegangan sisa yang didapat dari pemodelan struktural. Pada sambungan *closed square* tegangan sisa maksimalnya 119 MPa, dan pada sambungan *square* tegangan sisanya 274 MPa.


1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
SEQV (AVG)
DMX =.289E-04
SMN =.148E+07
SMX =.119E+09
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
08:29:49
MX
MN
Y
X
.148E+07
.146E+08
.277E+08
.408E+08
.539E+08
.670E+08
.802E+08
.933E+08
.106E+09
.119E+09

(a)

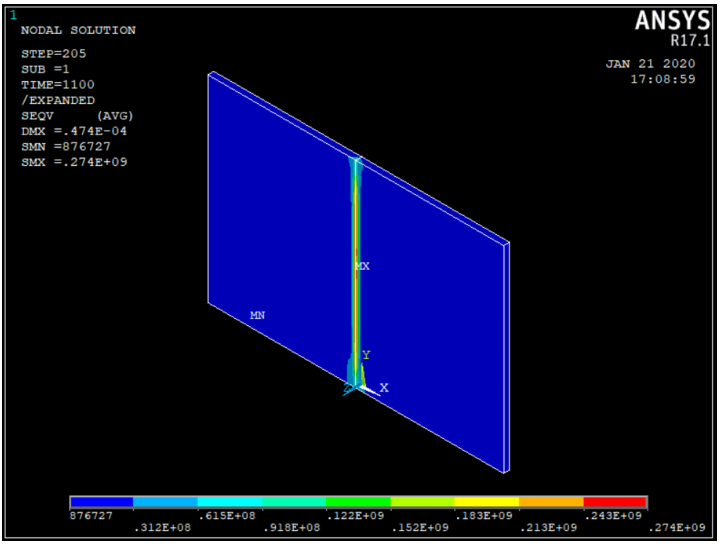

1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
SEQV (AVG)
DMX =.289E-04
SMN =.148E+07
SMX =.119E+09
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
08:28:40
MX
MN
X
.148E+07
.146E+08
.277E+08
.408E+08
.539E+08
.670E+08
.802E+08
.933E+08
.106E+09
.119E+09

(b)

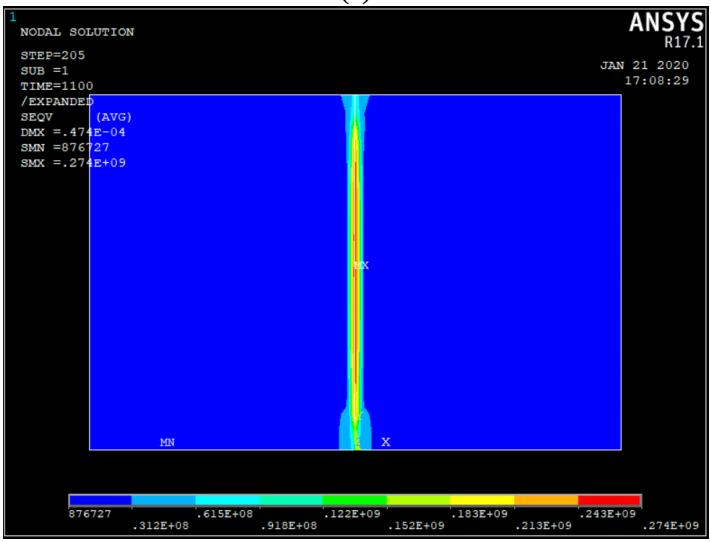


(c)

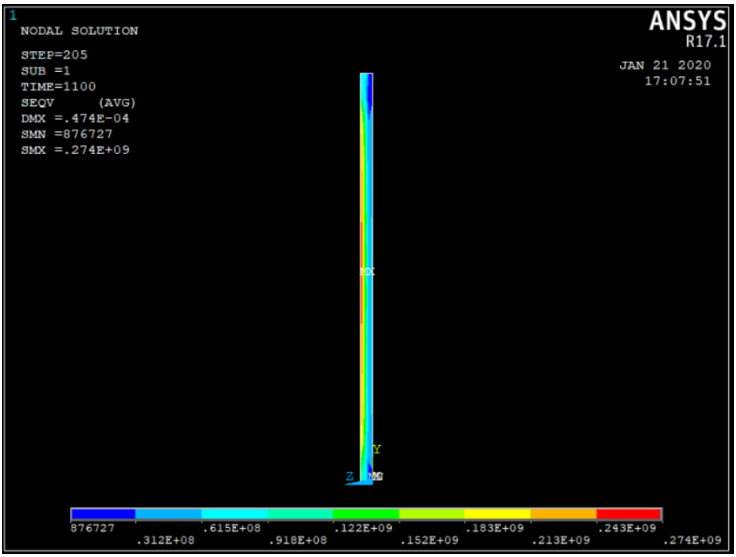
Gambar 4.21 Distribusi tegangan sisa jenis sambungan *closed square* dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping


1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
SEQV (AVG)
DMX =.474E-04
SMN =876727
SMX =.274E+09
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
17:08:59
MX
MN
Y
X
876727
.312E+08
.615E+08
.918E+08
.122E+09
.152E+09
.183E+09
.213E+09
.243E+09
.274E+09

(a)


1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
SEQV (AVG)
DMX =.474E-04
SMN =876727
SMX =.274E+09
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
17:08:29
MX
MN
X
876727
.312E+08
.615E+08
.918E+08
.122E+09
.152E+09
.183E+09
.213E+09
.243E+09
.274E+09

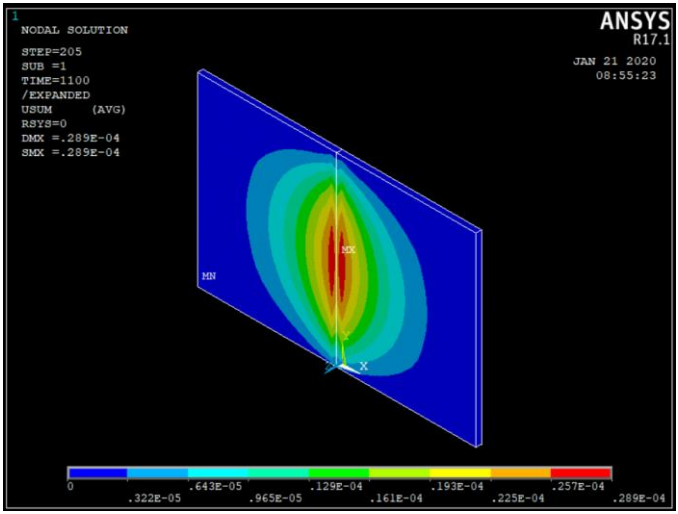
(b)



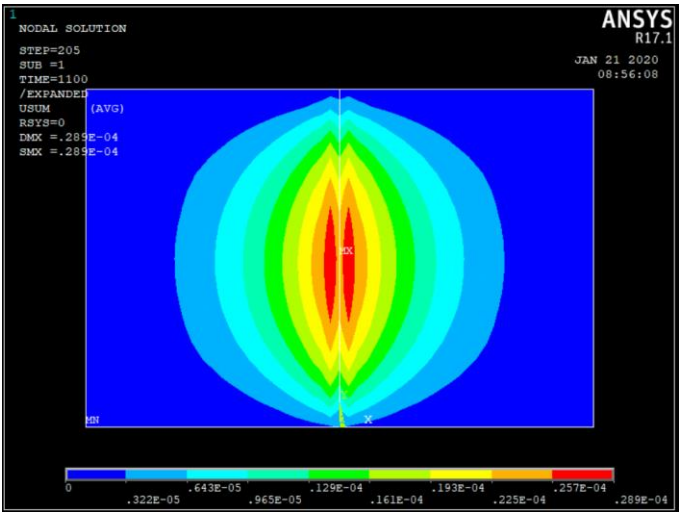
(c)

Gambar 4.22 Distribusi tegangan sisa jenis sambungan *square* dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping

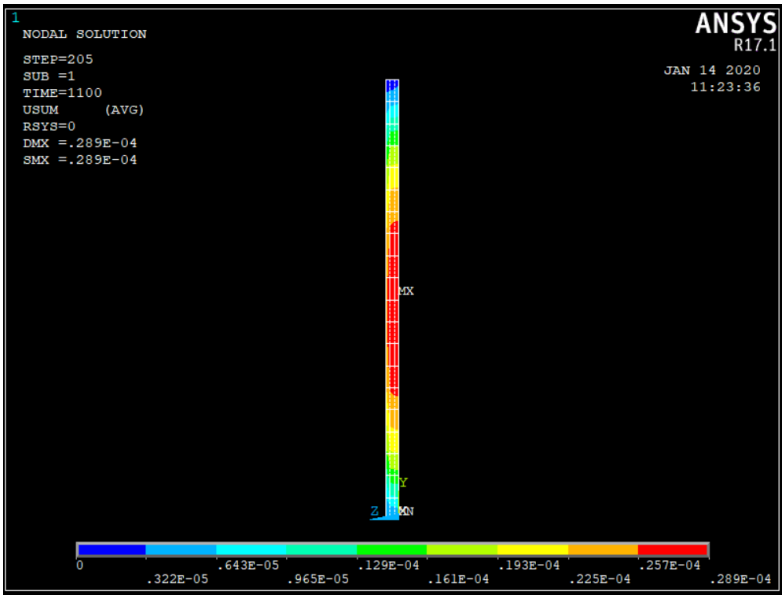
4. Distorsi



(a)

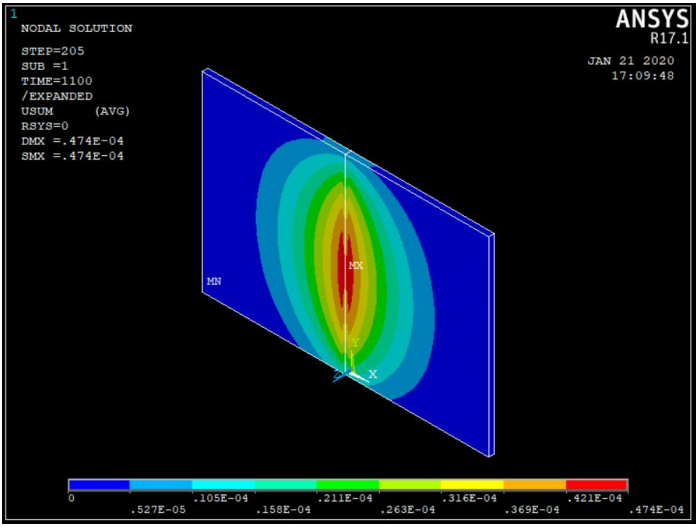


(b)

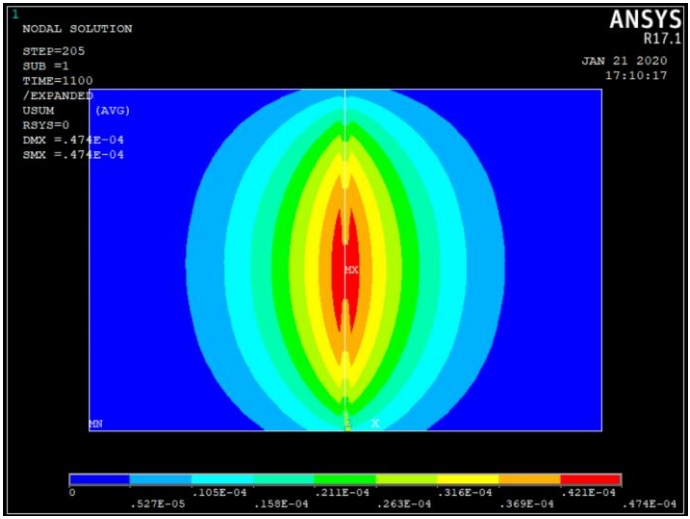


(c)

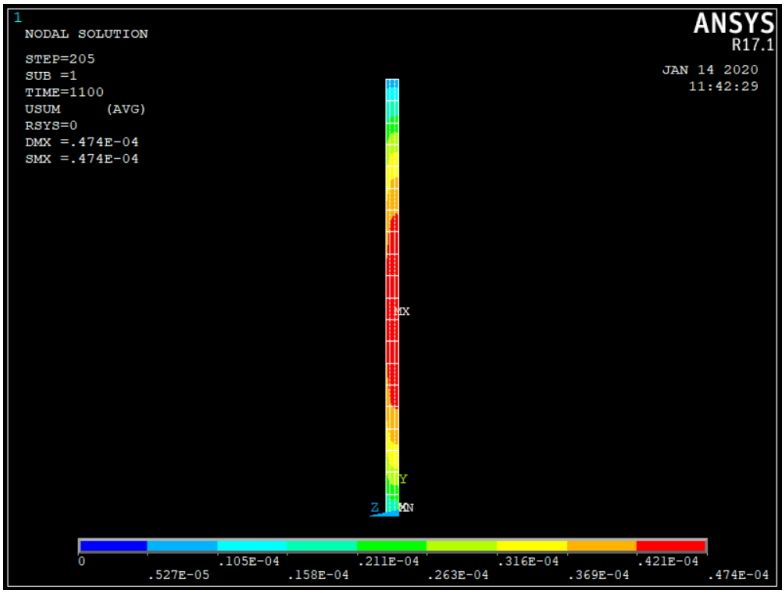
Gambar 4.23 Distorsi pada jenis sambungan closed square dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping


1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.474E-04
SMX =.474E-04
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
17:09:48
MN
MX
0
.527E-05
.105E-04
.158E-04
.211E-04
.263E-04
.316E-04
.369E-04
.421E-04
.474E-04

(a)


1
NODAL SOLUTION
STEP=205
SUB =1
TIME=1100
/EXPANDED
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.474E-04
SMX =.474E-04
ANSYS
R17.1
JAN 21 2020
17:10:17
MN
MX
0
.527E-05
.105E-04
.158E-04
.211E-04
.263E-04
.316E-04
.369E-04
.421E-04
.474E-04

(b)



(c)

Gambar 4.24 Distorsi pada jenis sambungan *square* dengan ketebalan 6 mm (a) tampak 3 dimensi (b) tampak atas (c) tampak samping

Distorsi pada pemodelan struktural gambarkan dengan plot pada Gambar 4.23 dan 4.24. Distorsi maksimal yang terjadi pada sambungan *closed square* 0,0289 mm dan pada sambungan *square* 0,0474 mm. Distorsi maksimal yang terjadi pada sambungan square lebih besar dan lebih rapat di daerah pengelasan.

4.3 Pembahasan Hasil Simulasi

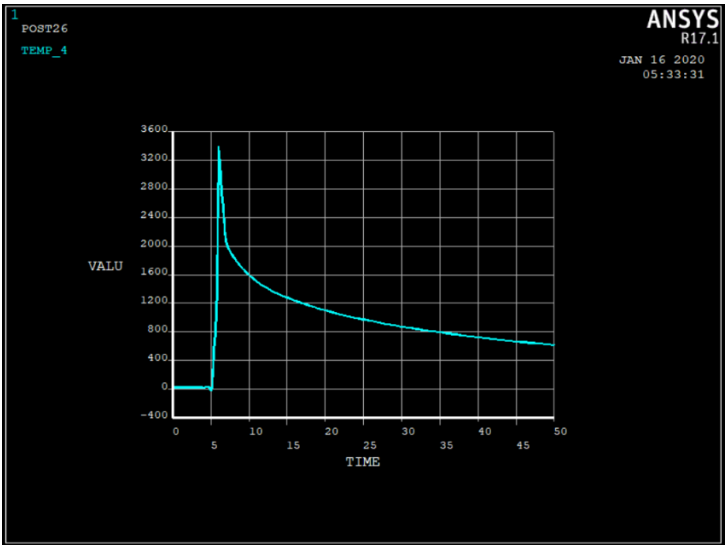
Pengujian pada simulasi meliputi pemodelan termal dan structural. Berikut pembahasan dari hasil simulasi tersebut.

4.3.1 Hasil Pemodelan Termal

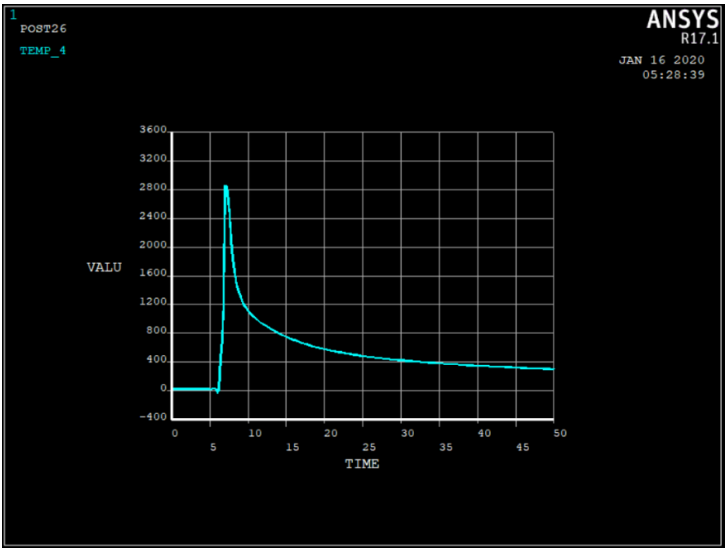
Tabel 4.1 Temperatur puncak terhadap ketebalan dan variasi

Tipe Sambungan	Temperatur Maksimum (C)		
	2 mm	4 mm	6 mm
Closed Square	3388,21	2851,01	2667,87
Square	3577,93	3036,2	2689,52

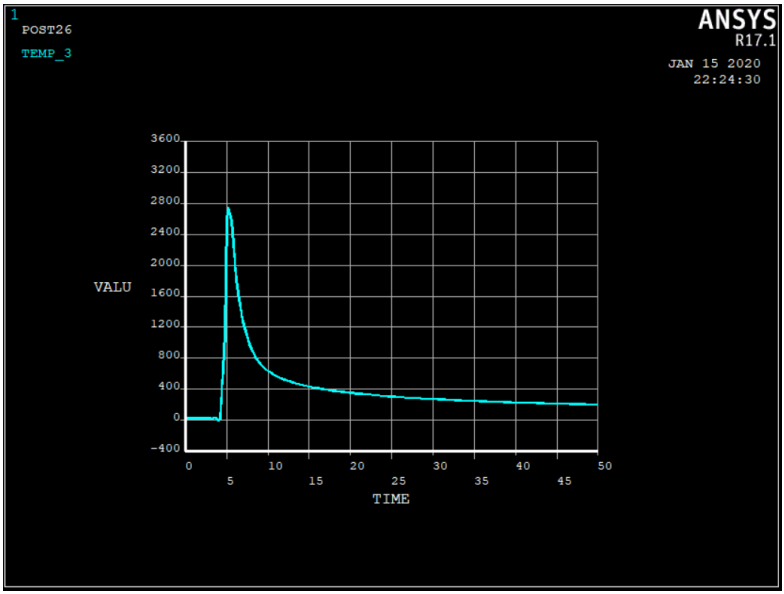
Dari perbandingan jenis sambungan didapatkan perbedaan persebaran panas pada pelat dengan ketebalan sama. Pada sambungan *closed square* sisa panas terpusat di daerah pengelasan sedangkan pada *close square* panas tersebar lebih merata dan suhunya lebih rendah dibandingkan dengan sambungan *closed square*. Hal ini disebabkan oleh perbedaan jenis sambungan, dimana pada proses pengelasan sambungan square energi dari pengelasan lebih banyak diserap untuk menutup celah lasan. Sedangkan pada sambungan *closed square* energi dari pengelasan lebih banyak diserap oleh daerah sekitar lasan dan menyisakan lebih banyak energi panas.


1
POST26
TEMP_4
ANSYS
R17.1
JAN 16 2020
05:33:31
VALU
3600.
3200.
2800.
2400.
2000.
1600.
1200.
800.
400.
0.
-400
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
TIME

(a)


1
POST26
TEMP_4
ANSYS
R17.1
JAN 16 2020
05:28:39
VALU
3600.
3200.
2800.
2400.
2000.
1600.
1200.
800.
400.
0.
-400
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
TIME

(b)



(c)

Gambar 4.25 Siklus panas pengelasan pelat (a) 2 mm (b) 4 mm (c) 6 mm

Selain itu dari persebaran panas setelah pengelasan dapat disimpulkan bahwa semakin tebal material yang dilas maka laju disipasi panasnya semakin lambat. Hal tersebut ditunjukan oleh perbandingan distribusi panas pada ketebalan pelat yang berbeda. Sehingga didapat perbandingan temperatur, yaitu pelat yang lebih tebal suhunya akan semakin tinggi. Berbanding terbalik dengan suhu ketika proses pengelasan, dimana termperatur maksimum pada pelat akan semakin tinggi jika pelat semakin tipis yang dapat dilihat pada Gambar 4.25. Sehingga dapat disimpulkan Pelat tipis memiliki temperatur puncak lebih tinggi namun laju disipasi panasnya lebih cepat. Hal tersebut disebabkan oleh penyerapan energi oleh pelat lebih sedikit dibanding pelat yang lebih tebal.

4.3.2 Hasil Pemodelan Struktural

Pada simulasi ini didapatkan tegangan sisa terpusat di daerah lasan dan sekitarnya yang dapat dilihat dari hasil kedua variasi sambungan bahwa tegangan sisa maksimum pada sambungan square lebih besar dibandingkan pada sambungan closed square. Hal tersebut berbanding lurus dengan distribusi panas kedua plat dengan sambungan berbeda, dimana sambungan closed square memiliki sisa energi lebih banyak yang menyebabkan tegangan bertambah dibandingkan sambungan square. Sehingga sambungan closed square lebih mudah terdeformasi. Pada pelat dengan jenis sambungan sama tegangan sisa lebih besar pelat yang lebih tipis, hal ini disebabkan oleh penyerapan energi panas lebih rendah daripada pelat yang tebal yang memiliki volume lebih besar.

Tabel 4.2 Tegangan sisa terhadap ketebalan dan variasi

Tipe Sambungan	Tegangan Sisa Maksimum (MPa)		
	2 mm	4 mm	6 mm
Closed Square	287	223	119
Square	289	328	274

Tabel 4.3 Distorsi terhadap ketebalan dan variasi

Tipe Sambungan	Distorsi Maksimum (mm)		
	2 mm	4 mm	6 mm
Closed Square	0,0289	0,0508	0,0279
Square	0,0586	0,0729	0,0474

Dari hasil simulasi pada Tabel 4.3, keseluruhan data distorsi yang terjadi pada pelat sambungan square mengalami nilai distorsi lebih besar dibandingkan dengan pelat *square*. Sedangkan pada

kedua sambungan distorsi terbesar terjadi pada pelat dengan ketebalan 4 mm. Kasus ini kemungkinan terjadi karena parameter yang digunakan menyebabkan efektifitas perpidahan panas tidak efektif pada pelat 4 mm. Sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk kasus ini.

Dari kedua Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 dapat disimpulkan bawah nilai distorsi berbanding lurus dengan nilai tegangan sisa. Semakin besar nilai tegangan sisa maka semakin besar distorsinya. Pada sambungan *square* didapatkan nilai distorsi lebih besar dibandingkan dengan sambungan *closed square*. Hal tersebut terjadi karena perbedaan celah pada kedua tipe sambungan. Pada pengelasan pelat tegangan sisa cenderung terjadi pada sambungan yang memiliki celah. sehingga *closed square* lebih baik dipakai untuk pengelasan *butt-joint* pada material ASTM A36.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Nilai tegangan sisa lebih besar pada pelat tipis dan tipe sambungan *square*.
2. Nilai distorsi berbanding lurus dengan nilai tegangan sisa.
3. Jenis sambungan *butt-joint* yang optimal adalah sambungan *close square* karena memiliki distorsi yang lebih kecil dibandingkan dengan sambungan *square*.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan simulasi menggunakan elemen *death and birth* untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih akurat.
2. Melakukan simulasi pada tipe sambungan las yang berbeda

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, O., & Schlattmann, J. (2012). *Vibration Analysis of the Friction clutch Disc Using Finite Element Method*. *1*.

Chen, B.-Q. (2011). *Prediction of Heating Induced Temperature Fields and Distortions in Steel Plates*.

Electric, L. (1994). The procedure handbook of arc welding. *The James F. Lincoln Arc Welding Foundation*.

ESAB. (2000). *Basic Welding Filler Metal Technology Estimating and Comparing*.

Gery, D., Long, H., & Maropoulos, P. (2005). Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding. *Journal of Materials Processing Technology*, *167*(2–3), 393–401.

Inc, A. (2007). *Elements Reference ANSYS Release 11.0*. *January*. http://www.ansys.com

Inc, A. (2017). *Release Notes – Release Notes*. *August*, 1–6.

Jeyakumar, M., & Thankaiyan, C. (2013). Influence of residual stresses on failure pressure of cylindrical pressure vessels. *Chinese Journal of Aeronautics*, *26*. https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.07.025

Karkhin, V. A. (2013). *Thermal processes in welding*.

Kearns, W. H. (1978). Shielded Metal Arc Welding. *Welding Handbook*, 43–76. https://doi.org/10.1007/978-1-349-04293-7_2

Mahapatra, M. M., Datta, G. L., Pradhan, B., & Mandal, N. R. (2006). Three-dimensional finite element analysis to predict the effects of SAW process parameters on temperature

distribution and angular distortions in single-pass butt joints with top and bottom reinforcements. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, *83*(10), 721–729. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.07.011

Masubuchi, K. (2013). *Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences* (Vol. 33). Elsevier.

Matweb. (2015). MatWeb, Your Source for Materials Information. *MatWeb*, 1–2. http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=ff6d4e6d529e4b3d97c77d6538b29693

Metal, W. F. (2000). *Basic Welding Filler Metal Technology Estimating and Comparing*.

Narayanan, R., & Dixit, U. (2015). *Advances in Material Forming and Joining*. Springer.

Nasir, N. S. M., Razab, M. K. A. A., Mamat, S., & Iqbal, M. (2006). Review on welding residual stress. *Stress*, *2*(5), 8–10.

Soul, F., & Hamdy, N. (2012). Numerical Simulation of Residual Stress and Strain Behavior After Temperature Modification. In R. Kovacevic (Ed.), *Welding Processes*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/47745

Syukri, M. S. (2015). *Thermal Simulation of Different Welding Speed and Metal Thickness for Butt-Joint Welding with ANSYS*.

Youtsos, A. (2006). *Residual Stress and Its Effects on Fatigue and Fracture*. Springer.

BIODATA PENULIS

Penulis bernama lengkap Bisma Aji Manggala lahir pada 02 Maret 1997 dari ayah bernama Setiabudi dan ibu Nurul Asmaniatus Zuhriyah. Penulis merupakan putra pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Negeri Kemayoran 1, SMP Negeri 1 Bangkalan, dan SMA Negeri 3 Pamekasan. Kemudian Penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember di Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya. Penulis mengambil bidang Inovasi Material sebagai topik penelitian Tugas Akhir.

Semasa kuliah penulis aktif di Lembaga Dakwah Jurusan Ash-Khabul Kahfi 2017/2018 sebagai Kepala Departemen AKPreneur dan aktif juga di Jamaah Masjid Manarul Ilmi - ITS 2017/2018 sebagai Kepala Bidang Departemen Jaringan. Penulis mempunyai pengalaman Kerja Praktik di perusahaan pengecoran PT. API (Asian Profile Industeel) pada bagian *Melting*.

Email: bismaam17@gmail.com

TUGAS AKHIR – TL184834

SIMULASI TEGANGAN SISA PENGELASAN BUTT-JOIN SMAW MATERIAL A36 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA MENGGUNAKAN ANSYS APDL

BISMA AJI MANGGALA
NRP. 02511540000090

Dosen Pembimbing:
Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D
Dr. Lukman Noerochiem, ST., MSc.Eng

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020