

SIMULASI ULANG DISTRIBUSI TEMPERATUR, TEGANGAN SISA, DAN DISTORSI PELAT STAINLESS STEEL 304

Rizaldy Hakim Ash-Shiddieqy¹, Alexius L Johanis², Hanif Nugroho Aji³

¹Teknik Mesin Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

¹rizaldy@its.ac.id

²Teknik Mesin, Politeknik Negeri Kupang, NTT

²alex_160805@yahoo.com

³Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara , Institut Teknologi Bandung

³hna@protonmail.ch

DOI: <http://dx.doi.org/10.31869/rtj.v3i1.1634>

Abstrak: Pada paper ini dilakukan pemodelan ulang dari pengelasan GTA untuk mendapatkan distribusi temperatur, tegangan sisa, dan distorsi menggunakan software Abaqus untuk melakukan analisis elemen hingga. Data eksperimen didapat dari paper Venkatkumar. Analisis elemen hingga dilakukan menggunakan Abaqus menggunakan prosedur Coupled temperature displacement. Model sumber panas yang digunakan adalah distribusi Godak dan menghasilkan temperatur puncak yang perbedaannya kecil dibandingkan hasil pengukuran. Nilai sejarah temperatur diplot dan dibandingkan dengan hasil pengukuran termokopel, laju pendinginan hasil simulasi lebih lambat dibandingkan hasil pengukuran. Distribusi temperatur dan tegangan sisa yang dihasilkan cukup baik, sedangkan untuk prediksi distorsi dari simulasi terlalu kecil dikarenakan laju pendinginan yang terlalu lambat.

Kata kunci: Analisis Elemen Hingga, Pengelasan, GTA, Temperatur, Tegangan Sisa, Distorsi

PENDAHULUAN

Pengelasan adalah salah satu proses yang banyak dilakukan untuk menyambungkan dua material logam di industri. Beberapa contoh produk yang dibuat dengan pengelasan adalah pada industri kapal, konstruksi, dan fasilitas pengolahan di industri proses.

Pada proses pengelasan, akan dihasilkan efek samping berupa distorsi dan tegangan sisa pada material. Tegangan sisa ini dapat terjadi akibat distribusi temperatur yang tidak merata yang mengakibatkan regangan termal saat pergerakan sumber panas saat pengelasan.

Tegangan sisa yang bersifat tarik dapat mengurangi kemampuan material karena dapat meningkatkan tegangan, menyebabkan kegagalan leleh, dan rentan terjadi kegagalan getas. Prediksi dari nilai tegangan sisa akibat pengelasan dapat dijadikan bahan pertimbangan untuk melakukan perancangan yang lebih baik pada struktur yang akan disambung dengan las. Akan tetapi nilai tegangan sisa ini sulit untuk diukur secara langsung.

Pada paper yang ditulis oleh D. Venkatkumar dan D. Ravindran [1], dilakukan eksperimen pengelasan terhadap pelat AISI 304 SS pada dua kasus kecepatan yang konstan. Dipasang beberapa termokopel untuk

mengukur temperatur pada beberapa titik sepanjang pengelasan terjadi. Serta distorsi yang terjadi diukur. Kemudian ia membuat dua buah pendekatan sumber panas, yaitu Gaussian dan Volumetrik berdasarkan parameter pengelasan saat percobaan. Kemudian ia membuat model geometri, pertimbangan panas yang hilang karena konveksi dan radiasi, kondisi batas, dan kemudian simulasi elemen hingga dijalankan. Hasil temperatur pada simulasi kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran termokopel kemudian model di *tuning* hingga sejarah temperatur mendekati nilai eksperimen. Distribusi temperatur yang didapat kemudian digunakan untuk mendapatkan nilai tegangan sisa dan distorsi. Hasil simulasi distorsi dibandingkan dengan hasil pengukuran.

Pada karya tulis ini, penulis melakukan proses simulasi elemen hingga berdasarkan eksperimen D. Venkatkumar dan D. Ravindran menggunakan software Abaqus. Simulasi bertujuan untuk mendapatkan distribusi temperatur, tegangan sisa, dan distorsi dan membandingkannya dengan data hasil eksperimen Venkatkumar.

METODE PENELITIAN

Pada karya tulis ini, difokuskan pada proses simulasi elemen hingga dari proses pengelasan berdasarkan data dan informasi dari eksperimen yang didapatkan dari paper Venkatkumar.

Tahap pertama adalah mempelajari konsep dan memilih data-data yang diperlukan untuk simulasi dari paper Venkatkumar. Data-data yang diperlukan adalah gambar teknik spesimen, parameter pengelasan (tegangan, arus, efisiensi *arc*, kecepatan pengelasan), komposisi dan sifat material dan perubahannya pada berbagai temperatur, model sumber panas (gaussian dan volumetrik), jenis elemen, ukuran minimum elemen, jumlah elemen, kondisi batas termal, kondisi batas mekanikal, dan data hasil pengukuran termokopel.

Tahap kedua adalah melakukan simulasi pada Abaqus. Proses diawali dengan pembuatan model geometri dari spesimen, dikarenakan bentuk pelat yang relatif sederhana maka model geometri langsung dibuat di Abaqus berdasarkan ukuran yang terdapat di gambar teknik. Setelah itu karena akan dilakukan analisis termal maka pada model dimasukkan parameter temperatur nol absolut dan konstanta Stefan-Boltzmann. Kemudian material didefinisikan berdasarkan data sifat material yang didapat dari paper, material diasumsikan isotropik dan nilainya bergantung terhadap temperatur.

Setelah mendefinisikan material, dilakukan pendefinisian section dan untuk model 3D dipilih kategori solid dan homogen dan di-assign ke seluruh pelat. Setelah itu instance type dipilih *Dependent*.

Untuk menentukan jenis analisis, maka ditentukan berdasarkan step yang dibuat. Step dibuat dengan jenis prosedur Coupled temp-displacement dengan respon transien, pada bagian ini ditentukan periode pengelasan yang ditentukan berdasarkan panjang las serta *increment* waktu pada proses simulasi. Untuk kondisi awal, dimasukkan *predefined field* berupa temperatur awal benda kerja yang bernilai sama dengan temperatur lingkungan. Kemudian pada *Field Output Request* ditentukan besaran apa saja yang diinginkan sebagai keluaran dari hasil simulasi, pada tugas ini yang dibutuhkan adalah fluks panas (HFL), distribusi temperatur (NT11), tegangan sisa (S22), dan distorsi (U3).

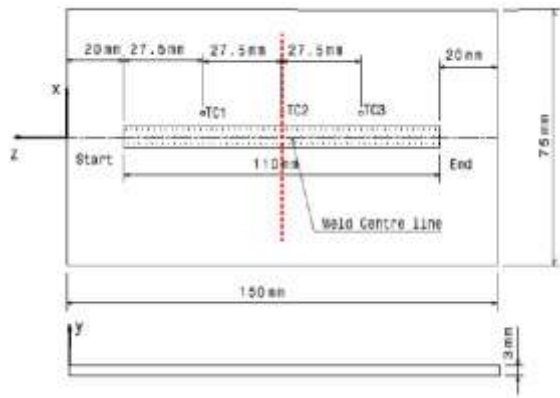
Kemudian pada bagian *Interaction* didefinisikan interaksi antara model dengan lingkungan, untuk memodelkan perpindahan panas yang menentukan pendinginan saat proses pengelasan yang merupakan hasil perpindahan panas konveksi dan radiasi antara benda dan lingkungan. Pada bagian ini temperatur lingkungan dan emisivitas benda diasumsikan.

Setelah itu dilakukan input kondisi batas mekanik yaitu perpindahan pada bagian tertentu model sesuai dengan yang terdapat di paper. Kemudian pendefinisian beban berjenis Body Heat Flux, dengan distribusi "user-defined" dimana distribusi flux diatur oleh Subroutine Abaqus yang bernama DFLUX. Subroutine tersebut ditulis dengan menggunakan bahasa FORTRAN, pada subroutine ini diinput parameter-parameter pengelasan yang diperlukan dalam simulasi. Kemudian dilakukan pemilihan jenis elemen, pada analisis ini dipilih jenis Coupled Temp.-Displacement dengan jenis C3D8T (*8-node thermally coupled brick, trilinear displacement and temperature*). Langkah di abaqus adalah dengan melakukan Seed edges berdasarkan ukuran elemen yang diinginkan dan kemudian melakukan *assign element type*.

Kemudian pada menu job, masukkan file FORTRAN yang akan digunakan sebagai subroutine dan kemudian dilakukan proses *run*. Setelah di *run* maka dilakukan pengambilan data temperatur terhadap waktu pada lokasi termokopel menggunakan probe dan datanya dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen. Jika telah sesuai maka tegangan sisa dan distorsi yang terjadi dapat dianalisis.

DATA DAN INFORMASI

Dalam karya tulis ini, seluruh data dan informasi didapatkan langsung dari paper D. Venkatkumar dan D.Ravindan[1]. Geometri dari pelat yang akan disimulasikan adalah geometri dari pelat yang digunakan dalam percobaan yang dilakukan Venkatkumar yaitu pelat persegi panjang berukuran 150 mm x 75 mm x 3 mm. Pada gambar berikut terdapat pula ukuran las serta lokasi termokopel, jaraknya terhadap garis tengah las adalah: TC1 9,5 mm, TC2 7,5 mm, dan TC3 7,5 mm.



Gambar 1 Gambar teknik spesimen pengujian yang akan disimulasi [1]

Material dari pelat adalah AISI 304 SS yang merupakan baja tahan karat. Data material didapatkan dari paper Venkatkumar. Pada paper tersebut didapatkan komposisi material dan nilai dari sifat-sifat material pada berbagai temperatur.

Tabel 1 Komposisi AISI 304 SS dalam % [1]

C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si
0.06	18.27	1.95	8.93	0.028	0.011	0.4

Tabel 2 Sifat AISI 304 SS sebagai fungsi temperatur [1]

Temperature (°C)	Specific heat (J/kg°C)	Conductivity (W/m°C)	Density (kg/m³)	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
0	482	14.6	7900	207	372 × 10 ⁶	193.5	0.294
100	496	15.1	7890	228	372 × 10 ⁶	193.6	0.294
200	512	16.1	7870	186	350 × 10 ⁶	193.6	0.293
300	525	17.0	7850	170	34.0 × 10 ⁶	193.6	0.293
400	540	18.0	7790	155	32.1 × 10 ⁶	193.6	0.293
500	577	20.6	7690	138	30.8 × 10 ⁶	193.6	0.293
600	604	23.9	7590	91	29.2 × 10 ⁶	193.6	0.293
700	679	32.2	7470	23	26.7 × 10 ⁶	193.6	0.293
800	692	35.7	7340	23	24.1 × 10 ⁶	193.6	0.292
900	700	42.0	7200	38	21.8 × 10 ⁶	193.6	0.290

Parameter pengelasan pada eksperimen adalah:
 Kecepatan = 2,44 mm/s (Kasus A) dan 3,06 mm/s (Kasus B)
 Arus = 100 Ampere
 Tegangan = 24 Volt

Model sumber panas: Gaussian, berikut adalah persamaan yang menyatakan fluks panas pada permukaan pada bidang x-z. $q(x,z)$ adalah fluks pada satu titik, Q adalah total input panas, dan r_b adalah jari-jari *welding arc*.

$$q(x,z) = \frac{3Q}{\pi r_b^2} \exp\left[-\frac{3}{r_b^2} [x^2 + z^2]\right] \quad (1)$$

Volumetrik, input panas terbagi menjadi input dari *welding arc* $Q_s(40\%Q)$ dan *molten metal droplet* $Q_v(60\%Q)$. Input dari *welding arc* dinyatakan dengan rumus berikut,

dengan r_0 menyatakan jari-jari dari pusat fluks pada waktu t .

$$Q(t) = \frac{3Q_s}{\pi r_0^2} \exp\left[-\left(\frac{r(t)}{r_0}\right)^2\right] \quad (2)$$

Sedangkan dari lelehan diaplikasikan sebagai sumber panas volumetrik Fluks volumetrik: Q_v/V_p dimana V_p adalah volume elemen yang sedang dalam pengelasan.

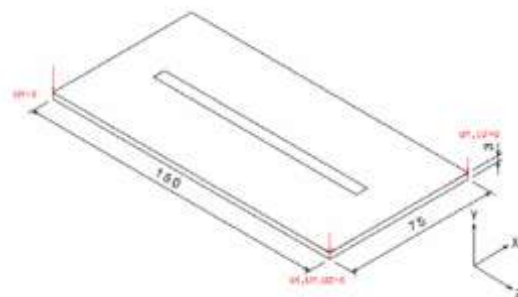
Nilai Q didapat dengan rumus $Q=\eta VI$. Dengan η adalah efisiensi *arc*, V adalah input tegangan dan I adalah input arus.

Ukuran elemen minimum 0,24 mm x 1 mm x 0,5 mm. Jumlah nodal 52850, jumlah elemen 44100 elemen, dengan ukuran lebih kecil di sekitar bagian yang dilas.

Kondisi batas termal berupa konveksi dan radiasi dengan nilai koefisien h yang mempertimbangkan keduanya dan dinyatakan dengan persamaan di bawah. Kondisi batas ini diaplikasikan pada seluruh permukaan pelat.

$$h = \begin{cases} 0.0668T(W/m^2 \cdot ^\circ C) & \text{When } T \ll 500^\circ C \\ (0.231T-82.1)(W/m^2 \cdot ^\circ C) & \text{When } T \gg 500^\circ C \end{cases}$$

Kondisi batas mekanikal yaitu berupa pembatasan gerakan translasi pada berbagai arah yang dinyatakan dengan gambar berikut, terlihat bahwa pada sudut kiri bawah ditahan pada tiga arah, pada sudut kanan bawah ditahan pada sumbu y dan z sehingga dapat bergerak ke arah x dan pada sudut kiri atas ditahan pada sumbu y :



Gambar 2 Kondisi batas mekanikal[1]

SIMULASI ELEMEN HINGGA

Simulasi dilakukan menggunakan Abaqus CAE. Analisis termal dan mekanikal dilakukan secara langsung dalam satu tahap, dengan menggunakan *Coupled temperature-*

displacement. Cara ini berbeda dengan metode yang dilakukan Venkatkumar dengan menggunakan ANSYS yang terdiri dari dua tahap yaitu analisis termal yang menghasilkan keluaran yang kemudian digunakan dalam analisis mekanikal untuk memprediksi tegangan sisa dan distorsi.

Model geometri dibuat secara langsung di Abaqus berdasarkan Gambar 1 menggunakan sketsa yang diekstrusi. Nilai temperatur nol absolut dan konstanta stefan boltzmann dimasukkan bernilai -275 dan $5,67 \cdot 10^{-8}$. Sifat material dimasukkan berdasarkan Tabel 2 dengan asumsi isotropik atau nilainya seragam pada semua orientasi. Pada software Abaqus tidak terdapat satuan, sehingga dalam input material diperlukan masukan dengan satuan yang konsisten. Dalam hal ini dipilih satuan meter, kg, °C. Kesesuaian satuan sifat disesuaikan dengan model geometri yang ukurannya menggunakan satuan meter. Material di-assign ke seluruh pelat dan *instance type* nya dipilih *dependent*.

Jenis elemen yang digunakan dipilih dari jenis *Coupled Temperature Displacement*, sesuai dengan prosedur yang akan dilakukan. Karena geometri spesimen berbentuk pelat maka pendekatan dengan bentuk balok solid dengan delapan nodal sudah cukup baik sehingga dipilih jenis elemen yaitu C3D8T (*8-node thermally coupled brick, trilinear displacement and temperature*). Kemudian untuk membuat mesh dilakukan dengan memberikan *seed* pada *edge* dengan ukuran elemen rata-rata 1,5 mm dan kemudian melakukan *assign element type*. Jumlah elemen yang digunakan pada simulasi elemen hingga ini adalah 10000 elemen.

Kondisi batas termal antara benda dan lingkungan didefinisikan pada *Interaction*. Efek pendinginan pada benda kerja terjadi akibat dua mekanisme perpindahan panas, yaitu konveksi bebas dan radiasi. Temperatur awal benda dan lingkungan diasumsikan 20°C , nilai ini dimasukkan pada *predefined field* pada step yang dibuat. Nilai emisivitas benda diasumsikan bernilai 1, nilai koefisien konveksi berdasarkan persamaan (3). Kondisi batas termal ini diberikan pada seluruh permukaan pelat.

Kondisi batas mekanik diberikan pada tiga sudut pelat untuk membatasi perpindahan pada bagian tersebut berdasarkan gambar 2.

Untuk mendefinisikan analisis yang akan dilakukan maka dibuat dua *Step* dengan prosedur berjenis *coupled temperature-displacement* dengan respon transien. Dua step ini, yang pertama adalah pengelasan dan step kedua adalah pendinginan. Input yang diberikan adalah waktu step yang disesuaikan dengan kecepatan pengelasan dan waktu pendinginan yang disesuaikan dengan kebutuhan untuk membandingkannya dengan data yang diambil dari termokopel. Perbedaan antara step pengelasan dan step pendinginan adalah pada beban termalnya, untuk pengelasan beban berupa *body heat flux* sedangkan pada pendinginan tidak diberikan beban apapun. *Time increment* untuk setiap step ditentukan secara otomatis. Untuk menentukan output hasil simulasi, ditentukan *Field Output Request* yaitu fluks panas (HFL), distribusi temperatur (NT11), tegangan sisa (S22), dan distorsi (U3). Nlgeom mempertimbangkan efek nonlinearitas dari *displacement* yang besar pada matriks kekakuan. Berdasarkan paper Venkatkumar, *large displacement theory* menghasilkan prediksi deformasi yang jauh lebih baik dibandingkan *small displacement theory*. Berdasarkan hal tersebut maka Nlgeom diaktifkan untuk mendapatkan distorsi berdasarkan *large displacement theory*.

Beban yang diberikan adalah beban termal berjenis *Body Heat Flux*, dengan distribusi "*user-defined*" dan *magnitude* 1. Distribusi fluks diatur oleh Subroutine Abaqus yang bernama DFLUX. Subroutine tersebut ditulis dengan menggunakan bahasa FORTRAN, pada subroutine ini diinput parameter-parameter pengelasan yang diperlukan dalam simulasi yaitu posisi awal pengelasan di titik x_0, y_0, z_0 . a, b, c = effective welding arc yaitu 3mm, kecepatan pengelasan 2,44 mm/s dan 3,06 mm/s. Posisi arc kemudian ditentukan berdasarkan kecepatan dan waktu simulasi. Tegangan 24 Volt dan arus 100 Ampere didapat dari data Venkatkumar serta efisiensi *arc* diasumsikan sebesar 0,8.

Pada Venkatkumar disimpulkan bahwa distribusi fluks dengan jenis gaussian memiliki hasil yang lebih baik daripada volumetrik. Ketika fluks diberikan menggunakan distribusi gaussian pada Abaqus didapatkan hasil fluks panas yang sangat kecil dibandingkan dengan input yang diberikan pada Subroutine meskipun setelah dicek dengan melakukan plot

persamaan (1) menggunakan parameter pengelasan eksperimen dilakukan tidak terjadi kesalahan dalam penulisan persamaan di Subroutine. Oleh karena itu dicari alternatif lain selain model gaussian dan volumetrik. Berdasarkan Robertsson dan Svedman [2] salah satu distribusi yang baik dalam pemodelan las adalah model distribusi sumber panas Goldak, yang terdiri dari dua distribusi Gaussian, satu di depan pembakar dan satu dibelakangnya. Berikut adalah persamaan yang menyatakan distribusi Goldak:

$$q_f(x, y, z) = f_f \frac{6\sqrt{3}Q}{abc_1\pi\sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c_1^2}\right)}$$

Dengan $q(x,y,z)$ input panas spasial, f_f fraksi panas yang berada didepan pembakar, diasumsikan bernilai 1. a,b,c busur pengelasan efektif, dan Q adalah laju input panas yang memiliki nilai berdasarkan:

$$Q = \eta VI$$

Dengan η adalah efisiensi busur las, V tegangan las, dan I arus las.

SUBROUTINE

DFLUX(FLUX,SOL,KSTEP,KINC,TIME,NO
EL,NPT,COORDS,
JLTYP,TEMP,PRESS,SNAME)

C

INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'

C

DIMENSION FLUX(2), TIME(2),
COORDS(3)

CHARACTER*80 SNAME

x0=0.0375

y0=0.02

z0=0.0030

a= 0.003

b= 0.003

c= 0.003

vx=0

vy=0.00244

vz=0

xarc=vx*time(1)+x0

yarc=vy*time(1)+y0

zarc=vz*time(1)+z0

Xf=coords(1)-xarc

Yf=coords(2)-yarc

Zf=coords(3)-zarc

V=24

I=100

Q=0.8*V*I

heat=6*sqrt(3)*Q/(3.14*a*b*c*sqrt(3.14))

shape=EXP(-3*(Xf)**2./a**2.-

3*(Yf)**2./b**2.-3*(Zf)**2./c**2.)

if(shape.gt.1.0)then

flux(1)=0

else

flux(1)=heat*shape

endif

RETURN

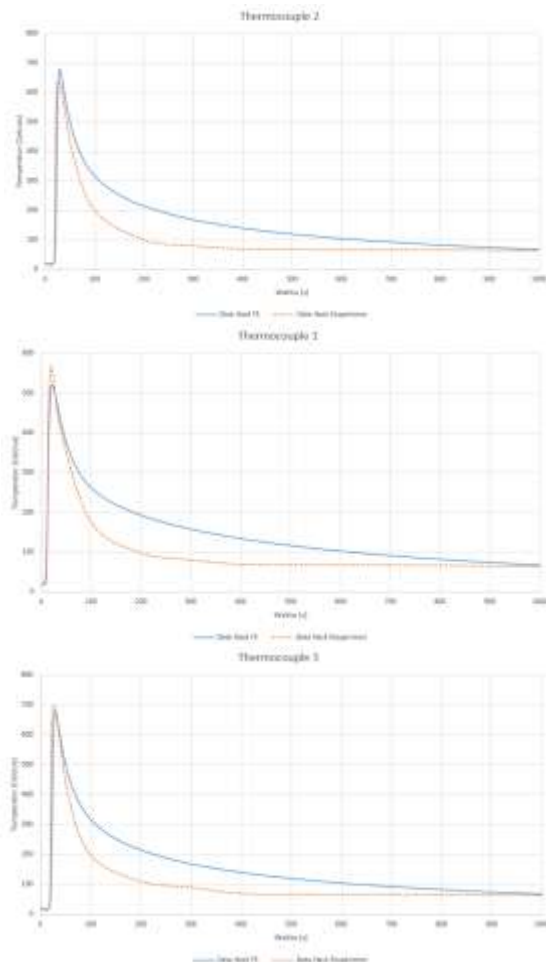
(4)

END

Kemudian pada menu job, masukkan file FORTRAN yang akan digunakan sebagai subroutine dan kemudian dilakukan proses *run*. Setelah di *run* maka dilakukan pengambilan data temperatur terhadap waktu pada lokasi termokopel menggunakan probe dan nilai peaknya dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen. Jika telah sesuai maka nilai tegangan sisa dan distorsi yang terjadi dapat diambil untuk kemudian dianalisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sejarah temperatur kasus A dibandingkan dengan hasil pengukuran. Sejarah temperatur hasil simulasi ditampilkan satu grafik dengan data hasil pengukuran termokopel untuk tiga posisi termokopel. Nilai hasil pengukuran termokopel diambil dari grafik pada paper Venkatkumar dengan cara mengambil nilainya pada beberapa titik waktu dan kemudian didapatkan temperaturnya. Posisi termokopel ditunjukkan oleh gambar 1.



Gambar 3 Grafik sejarah temperatur kasus A

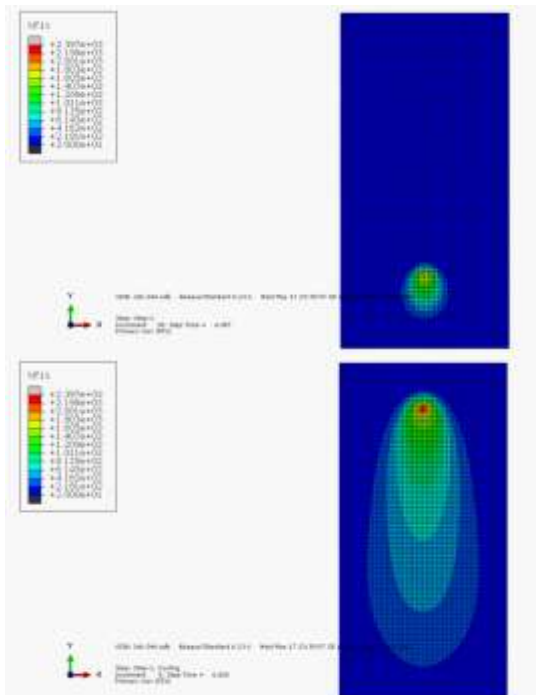
Berdasarkan grafik sejarah temperatur di atas, terlihat bahwa temperatur terus naik sampai pembakar berada pada posisi terdekat dengan termokopel sehingga terjadi temperatur puncak. Hasil simulasi cukup baik karena dapat menunjukkan pada node yang berada di posisi termokopel, TC3 lebih lama naik dibandingkan dengan TC2 dan TC1 sesuai dengan urutan termokopel yang paling dahulu didekati oleh pembakar. Kemudian setelah mencapai temperatur puncak, temperatur mulai turun seiring dengan menjauhnya sumber panas dan terjadinya pendinginan akibat konveksi bebas dan radiasi. Nilai dan error pada temperatur puncak pada sejarah temperatur menjadi acuan dalam pemilihan jenis distribusi fluks sampai dipilih yang terbaik berdasarkan simulasi yang dilakukan tim penulis yaitu distribusi Goldak. Sementara nilai dan error pada temperatur ketika pendinginan terjadi menjadi parameter yang menunjukkan apakah pendekatan kondisi batas termal pada model dimana terjadi konveksi bebas dan radiasi sudah cukup baik

atau belum. Terlihat dari grafik sejarah temperatur bahwa pendinginan yang terjadi pada simulasi lebih lambat dibandingkan dari data termokopel. Nilai asumsi emisivitas radiasi adalah bernilai 1, sehingga pelepasan panas dari radiasi sudah maksimal. Berdasarkan hal tersebut, faktor yang memiliki peluang besar dapat mempengaruhi kurangnya laju pendinginan adalah nilai h pada model yang belum dapat mencerminkan fenomena konveksi bebas yang terjadi pada eksperimen.

Tabel 3 Perbandingan temperatur puncak antara hasil pengujian [1] dan simulasi

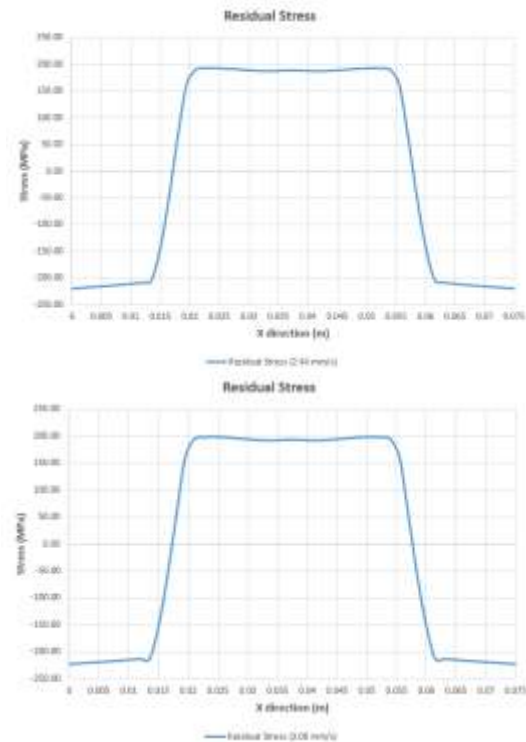
Kasus	Posisi Termokopel	Pengukuran Termokopel (oC)	Simulasi	
			Temp (C)	Error (%)
A	TC 1	553	519	6.1
	TC 2	630	678	7.6
	TC 3	690	725	5.1
B	TC 1	494	508	2.8
	TC 2	552	568	2.9
	TC 3	569	609	7.0

Berdasarkan tabel 3, terlihat bahwa nilai temperatur puncak antara hasil simulasi dengan pengukuran termokopel memiliki perbedaan pada seluruh posisi pada kasus A dan B yang cukup kecil dengan error dibawah 10%. Hal ini menggambarkan bahwa pemodelan dengan menggunakan distribusi Godak yang dilakukan pada simulasi ini merupakan model yang cukup baik untuk mewakili proses pengelasan GTA.

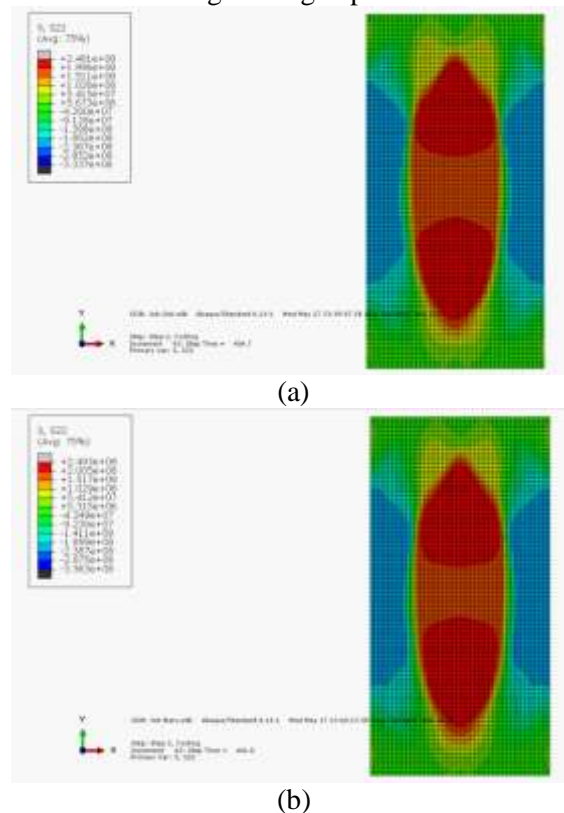


Gambar 4 Distribusi temperatur kasus A pada detik ke 5 dan 45

Besar dan profil dari tegangan sisa longitudinal diprediksi pada model dengan menggunakan large displacement theory dengan mengaktifkan NIgeom pada step yang berfungsi mempertimbangkan efek nonlinearitas pada displacement yang cukup besar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan sisa tarik maksimum adalah 193 MPa pada kasus A dan 199 MPa pada Kasus B. Sedangkan untuk tegangan sisa tarik rata-rata pada kasus A adalah 179 MPa dan pada kasus B 182 MPa. Terlihat bahwa tegangan sisa yang bersifat tarik berada di sekitar garis las sedangkan pada sisi pelat yang jauh dari garis las tegangan bersifat kompresi.



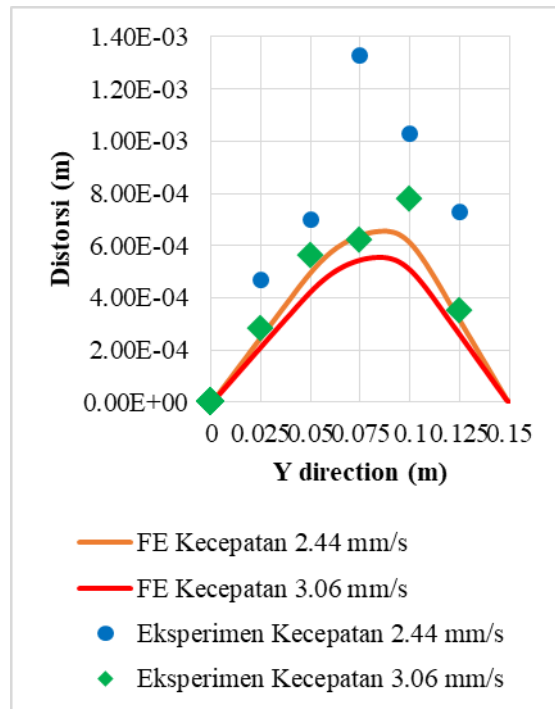
Gambar 5 Tegangan sisa yang diprediksi pada bagian tengah pelat



Gambar 6 Distribusi tegangan sisa longitudinal pada (a) kasus A dan (b) kasus B

Analisis distorsi dilakukan dengan menggunakan large displacement theory, dengan mengaktifkan NIgeom pada step

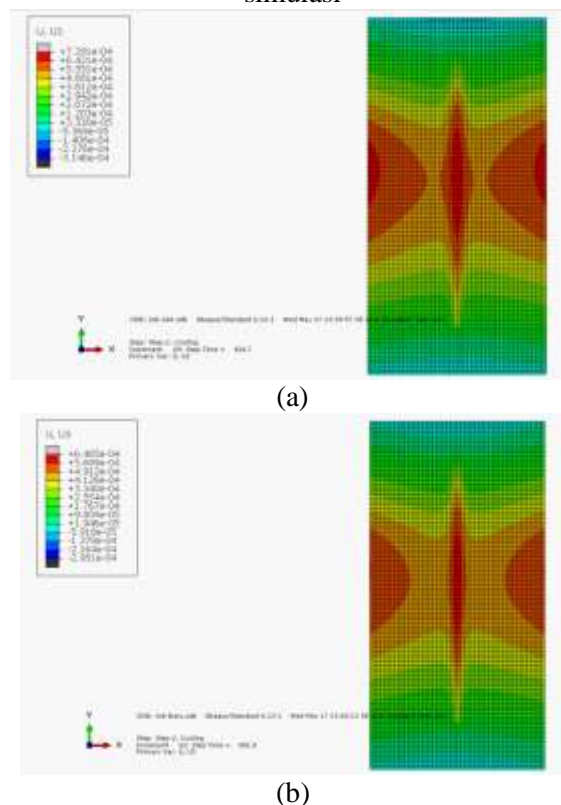
yang dibuat pada Abaqus. Dari paper Venkatkumar [1] didapatkan data pengukuran distorsi pada bagian pinggir pelat yang sejajar dengan arah pengelasan. Deformasi yang diukur adalah pada sumbu z (arah ketebalan pelat). Hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 4 dan gambar 7. Dari tabel 4 terlihat bahwa error hasil simulasi pada kasus A berada pada rentang 27.7 sampai 56 %. Sementara pada kasus B errornya berada pada rentang 12.1 sampai 34.1 %. Distorsi pada hasil simulasi lebih kecil dibandingkan dengan hasil pengukuran. Distorsi yang terlalu kecil ini disebabkan oleh laju pendinginan pada simulasi yang lebih lambat dibandingkan dengan laju pendinginan yang didapat pada paper Venkatkumar dimana ia mendapatkan hasil simulasi dengan distorsi yang lebih dekat dengan hasil eksperimen. Berdasarkan sumber [3] diketahui bahwa pendinginan yang cepat akan menghasilkan distorsi yang lebih besar, simulasi ini memberikan pendinginan yang relatif lambat, sehingga distorsi yang dihasilkan dari simulasi memiliki nilai yang lebih kecil. Untuk mendapatkan nilai distorsi yang lebih baik diperlukan kondisi batas termal yang lebih mencerminkan kondisi nyatanya.



Gambar 7 Distorsi hasil eksperimen [1] dan simulasi

Tabel 4 Perbandingan distorsi hasil pengukuran pada eksperimen [1] dan simulasi

Kasus	Jarak Y (mm)	Distorsi (mm)		Error (%)
		Eksperimen	Simulasi	
A	25	0.47	0.254	46.0
	50	0.7	0.506	27.7
	75	1.33	0.639	52.0
	100	1.03	0.618	40.0
	125	0.73	0.321	56.0
B	25	0.28	0.216	22.9
	50	0.56	0.431	23.0
	75	0.62	0.545	12.1
	100	0.78	0.514	34.1
	125	0.35	0.264	24.6



Gambar 8 Distribusi distorsi hasil simulasi

PENUTUP

Prosedur pemodelan untuk memprediksi tegangan sisa dan distorsi pada

pengelasan GTA menggunakan Abaqus telah dihasilkan. Model sumber panas yang cukup baik untuk pemodelan tersebut adalah dengan menggunakan distribusi Goldak. Sejarah termal didapat dan dibandingkan dengan data pengukuran, hasil simulasi memiliki laju pendinginan yang lambat, hal ini mengindikasikan kondisi batas termal belum cukup bagus sehingga perlu dicari alternatif yang lebih baik. Prediksi tegangan dan distorsi yang baik dapat dilakukan dengan *large displacement theory* dengan mengaktifkan Nlgeom pada Abaqus. Hasil simulasi tegangan sisa sudah cukup baik sementara hasil simulasi distorsi lebih kecil dari eksperimen, hal itu disebabkan laju pendinginan terlalu lambat. Jika kondisi batas termal dapat diperbaiki maka prediksi distorsi dapat menjadi lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- D. Venkatkumar, D. Rabindran. 2016. *3D Finite Element Simulation of Temperature Distribution, Residual Stress and Distortion on 304 Stainless Steel Plates using GTA Welding*, Journal of Mechanical Science and Technology 30 (1) (2016) pp: 67-76. Tamilnadu: National Engineering College.
- Andreas Robertsson, Jerk Svedman. 2013. *Welding Simulation of a Gear Wheel Using FEM*. Master's thesis 2013:50. Goterborg: Chalmers University of Technology.
- Pat L. Mangonon. 1999. *The Principles of Material Selection for Engineering Design*. New Jersey: Prentice-Hall