

Kekuatan Geser dan Integritas Struktur Sambungan *Fillet Weld* pada *Support Lug* Bejana Tekan Silinder Vertikal

Destarius Mahardhika¹ dan Asnawi Lubis¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro, No.1, Kota Bandar Lampung, 35145
E-mail: Destarius.mahardhika@yahoo.com

Abstract

A pressure vessel is a closed container designed to store liquids or gases at a temperature different from the ambient temperature and is used for a variety of applications in various industries. One type of pressure vessel that is widely used is the vertical cylindrical pressure vessel with lug supports. The support lug of a cylindrical pressure vessel is usually attached to the outer wall of the cylinder with a pad using a fillet weld. For such a junction, the vessel and pad are not perfectly integrated, but there are initial cracks inherent in the vessel and pad interfaces. For repeated loads, these cracks may propagate to the weld, eventually causing the joint structure to fail. This research was conducted using finite element simulations to assess stress on vessels and pads. The limit load for welding on the vertical (axial) side is compared with the limit load for welding on the vertical and horizontal sides. The change in stress distribution and maximum stress with welding on the vertical and horizontal sides is compared with the results of welding on the vertical side only. In this simulation it is assumed that the load is only the weight of the vessel itself, no other loads are involved. This simulation uses the ANSYS 2019 R3 finite element software with solid elements (SOLID187). The material used for the support lug is SA 516 Gr 70 and it is assumed to behave as elastic perfectly plastic. The results show that for welding only on the vertical side, the resulting limit load is 54889 kN. The shear strain that occurs on the radial-axial (SXY) faces is greater than that of the other faces. The highest von Mises stress is 1.325 times the yield stress of the welding material. The addition of welds on the horizontal side causes the load limit to increase to 55191 kN. There was an increase in the limit load by 301.6 kN. However, the shear strain was greater on the radial-axial (XZ) and hoop-axial (YZ) faces. The stress that occurs in the weld pad and vessel actually increases to 1,660 times the yield stress of the weld material. The stress that occurs in the circumferential direction (SY) is greater than the stress that occurs in the longitudinal direction (SZ). Application of the weld on the horizontal side reduces the stress on the top end of the weld compared to only applying the weld to the vertical side.

Keywords: Support lug, limit load, shear stresses, welding

Abstrak

Bejana tekan merupakan wadah tertutup yang dirancang untuk menampung cairan atau gas dengan temperatur yang berbeda dari temperatur lingkungan dan digunakan untuk bermacam-macam aplikasi di berbagai sector industri. Salah satu tipe bejana tekanyang banyak dipakai adalah bejana tekan silinder vertikal dengan lug supports. Support lug pada bejana tekan silinder biasanya diattach pada dinding luar silinder dengan pad menggunakan sambungan las sudut (*fillet weld*). Untuk sambungan seperti ini, bejana dan pad tidak terintegrasi secara sempurna, tetapi ada retak awal yang inherent pada interface bejana dan pad. Untuk beban yang berulang, retak ini dapat merambat ke welding yang pada akhirnya menyebabkan struktur sambungan mengalami kegagalan. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi elemen hingga untuk mengkaji stress pada sambungan *fillet weld* vessel dan pad. Limit beban untuk welding arah vertical (aksial) dibandingkan dengan limit beban untuk welding pada arah vertical dan horizontal dan perubahan distribusi stress dan stress maksimum hasil dengan welding pada sisi vertikal dan horizontal dibandingkan dengan hasil welding arah vertikal saja. Pada simulasi ini beban yang ditinjau hanya berat bejana sendiri, tidak adab eban lain yang bekerja. Simulasi ini menggunakan software ANSYS 2019 R3 dengan element solid (SOLID187). Material yang digunakan pada support lug adalah SA 516 Gr 70 dan diasumsikan bersifat elastic perfectly plastic. Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk welding hanya pada sisi vertikal, limit load yang dihasilkan adalah 54889 kN. Regangan yang terjadi pada muka radial-aksial (SXY) lebih besar dari pada muka lainnya. Stress tertinggi yang dicapai adalah sebesar 1,325 kali tegangan luluh material las. Penambahan las pada sisi horizontal menyebabkan limit beban meningkat menjadi 55191 kN. Ada peningkatan limit beban sebesar 301.6 kN. Namun regangan menjadi lebih besar pada muka radial-aksial(XZ) dan hoop-aksial (YZ). Sementara stress yang terjadi pada lasan pad dan vessel justru meningkat menjadi 1,660 kali tegangan luluh material las. Tegangan yang terjadi pada arah circumferensial (SY) lebih besar daripada tegangan yang terjadi pada arah longitudinal (SZ).

Pemberian lasan pada sisi horizontal mengurangi tegangan pada lasan ujung atas dibandingkan dengan hanya pemberian las hanya pada sisivertikal.

Kata kunci: Support lug, limit laod, shear stresses, welding

PENDAHULUAN

Bejana tekan merupakan wadah tertutup yang dirancang untuk menampung cairan atau gas pada temperatur yang berbeda dari temperatur lingkungan. Bejana tekan digunakan untuk bermacam-macam aplikasi di berbagai sektor industri seperti industri kimia (*petrochemical plant*), energi (*power plant*), minyak dan gas (*oil & gas*), nuklir, makanan, bahkan sampai pada peralatan rumah tangga seperti boiler pemanas air atau *pressure cooker*.

Jenis-jenis bejana tekan yang biasa digunakan adalah bejana tekan silinder, *spherical*, *conical* dan *toroidal*. Bejana tekan silinder sendiri dibagi menjadi 2 tipe yaitu tipe horisontal dan tipe vertikal. Salah satu tipe bejana tekan vertikal adalah *vertical vessel on lug supports*. Sambungan tipe *Lug* sering digunakan untuk menghubungkan komponen dalam berbagai sistem mekanis. Karena *lug* biasanya menempel pada garpu dengan baut atau pin tunggal tanpa penjepitan, mudah dipasang dan tidak menghasilkan momen lentur lokal tambahan. Namun, retakan atau diskontinuitas lainnya dapat dimulai karena korosi, ketidaksempurnaan material dan kerusakan manufaktur. Penggunaan *lugs* biasanya terbatas pada bejana tekan kecil dan menengah dengan diameter 1 ft sampai dengan 10 ft dan rasio tinggi terhadap diameter (h/D) adalah 2 sampai dengan 5.

Support lug pada silinder biasanya diattach pada dinding luar silinder dengan pad menggunakan sambungan las sudut (*fillet weld*). Untuk sambungan seperti ini, bejana dan pad tidaklah terintegrasi secara sempurna, tetapi ada retak awal yang inherent pada interface bejana dan pad dan untuk beban yang berulang, retak ini dapat merambat ke *welding* yang pada akhirnya menyebabkan struktur sambungan mengalami kegagalan. Penelitian tentang kekuatan *lug attachment* telah dilakukan beberapa peneliti.

Boljanovic dan Maksimovic (2013) telah melakukan penelitian untuk menguji kekuatan *attachment lugs* yang menerima beban berulang (*cyclic*) dengan melakukan evaluasi perambatan retak lelah. Dua konfigurasi telah mereka tinjau, *lug* dengan satu retak melalui ketebalan dan satu retak seperempat elliptical pada sudut. Untuk kedua konfigurasi itu kelelahan fatig diestimasi dengan menggunakan dua parameter mekanika retak. Analisis tegangan dilakukan secara analitik dan pendekatan numerik. Selanjutnya, besarnya beban berulang sampai dengan terjadi kegagalan pada *lug*

dengan satu ketebalan retak diuji secara eksperimental.

Mikheevskiy, dkk (2012) juga melakukan analisis perambatan retak lelah pada *attachment lug* dengan teknik fungsi bobot dan model fatig *UniGrow*. Hasil analisis menunjukkan bahwa berbagai efek yang mempengaruhi perambatan retak kelelahan dan akibat penerapan beban berulang dengan variasi amplitudo dapat dimodelkan dengan mempertimbangkan pengaruh tegangan sisa pada daerah ujung retak yang diinduksi oleh deformasi plastik yang berulang. Pentingnya penambahan beban pada *lug* telah dihitung dengan menghitung penurunan beban yang dihasilkan pada penampang retak. Telah ditunjukkan pula bahwa teknik fungsi berat dapat digunakan untuk mendapatkan solusi faktor intensitas tegangan untuk celah sudut, tepi, dan celah sementara.

Xing, dkk (2016) melakukan penelitian tentang transisi mode kegagalan lelah pada *load carrying fillet welded connections*. Penelitian mereka membahas tentang mode kegagalan pada sambungan las sudut tipe *load carrying*.

Werner, dkk (2016) juga melakukan penelitian tentang fracture pada *fillet weld* secara eksperimen dan numerik. Penelitian mereka membahas tentang patah yang terjadi pada sambungan *fillet weld* dengan spesimen silang, dengan kriteria kegagalan Rice dan Tracey dan model kegagalan Gurson.

Selanjutnya Grimsmo, dkk (2017), melakukan penelitian tentang sebuah setup tes baru yang memungkinkan pengukuran kekuatan dan deformasi lasan lentur yang terkena dampak kondisi beban benturan. Spesimen uji memiliki lasan sudut berorientasi longitudinal atau transversal, dan terdiri dari baja struktural. Selanjutnya, spesimen uji dirancang sedemikian sehingga deformasi plastik dan kegagalan terutama terjadi pada lasan sudut.

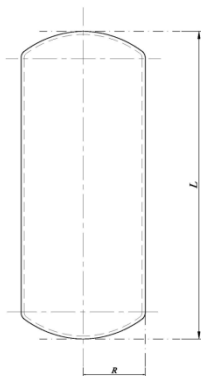
Dari berbagai penelitian yang telah dilakukan seperti diuraikan di atas belum ada simulasi yang membahas tentang kekuatan struktur sambungan las sudut pada *attachment support lug* pada bejana tekan silinder vertikal. Berdasarkan hal tersebut maka pada simulasi ini dikaji tentang kekuatan struktur sambungan las sudut pada *attachment support lug* bejana tekan silinder vertikal terhadap beban geser yang terjadi.

METODELOGI

Simulasi ini dilakukan mulai bulan Februari 2020 sampai dengan bulan Agustus 2020. Penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika Struktur Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Alat dan media simulasi yang digunakan adalah Personal Computer yang ada di Laboratorium Mekanika Struktur Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung dan software ANSYS 2019 R3. Pada penelitian ini digunakan metode elemen hingga dengan software ANSYS 2019 R3. Secara garis besar metode elemen hingga dengan ANSYS terdiri dari tiga tahapan yaitu: *Pre-processing*, *Solution* dan *Post-Processing*.

1. Pemodelan Geometry

Langkah pertama sebelum pembuatan model geometri adalah menentukan parameter geometri bejana tekan yang akan dimodelkan seperti jari-jari shell, panjang shell silinder, tebal dinding silinder, bentuk head, dan *lug attachment*. Hal ini bertujuan untuk mempermudah perubahan dimensi dari model tersebut jika diperlukan, dalam hal ini adalah pemodelan *support lug* pada silinder vertikal seperti Gambar 1.

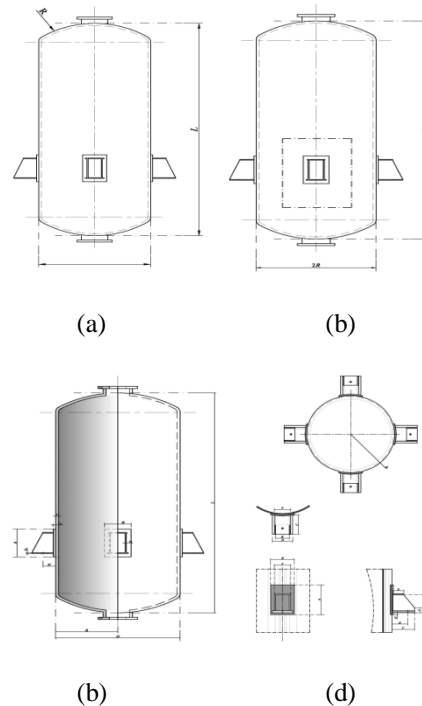


Gambar 1. Bejana Tekan Silinder

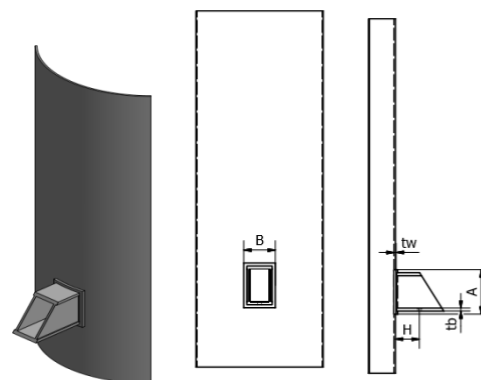
Tabel 1. Parameter geometri modeling

Parameter (simbol)	Satuan	Nilai
Panjang silinder (L)	mm	2400
Radius shell (R)	mm	600
Tebal shell (t)	mm	10
Panjang (aksial) pad attachment (A)	mm	300
Lebar (hoop) pad attachment (B)	mm	210
Tebal pad attachment (t_w)	mm	164
Tebal bracket (t_b)	mm	
Jarak lubang baut dengan dinding shell	mm	

Bejana tekan pada Gambar 1 disupport oleh empat buah lug seperti pada Gambar 2. Lug terdiri dari pad attachment berbentuk persegi panjang dengan panjang aksial 300 mm dan lebar hoop 210 mm. Pada pad attachment dilas *bracket* untuk dibaut pada *vertical support*. *Support vertical* dimodelkan sebagai kondisi batas pada lobang baut pada keempat bracket. Pada Gambar 3 adalah pemodelan 1/4 Geometry shell dengan pad dan lug support.



Gambar 2. Silinder vertikal dengan empat buah lug support



Gambar 3. Pemodelan 1/4 Geometry shell dengan pad dan lug support

2 Sifat Mekanik Material (*Material Properties*)

Sifat material yang diperlukan dalam analisis ini adalah modulus elastisitas (E), Perbandingan Poisson (ν), dan tegangan luluh (σ_y). Material untuk shell, pad, dan lug adalah SA-516 Gr.70, sedangkan

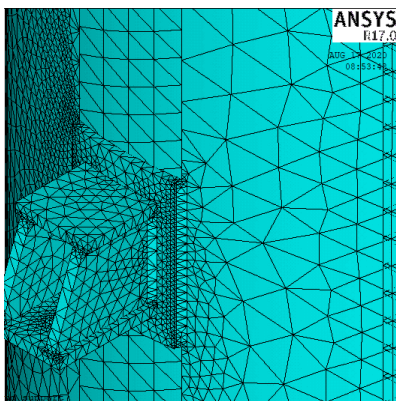
untuk welding adalah AWS E7018, sebagaimana direkomendasikan oleh ASME (2007). Sifat material yang digunakan diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Sifat material (*material properties*)

Sifat material	Shell	Lug support	Welding
Modulus Young	200,000	200,000	200,00
Yield stress	MPa	Mpa	0 Mpa
Poisson's ratio	335	335 MPa	482
	MPa	0,3	MPa
	0,3		0,3

3 Tipe Elemen dan Meshing (*Element Type and Meshing*)

Type elemen yang digunakan untuk bejana tekan adalah SOLID 187. Elemen ini berbentuk tetrahedron dengan sepuluh node. Elemen ini adalah elemen orde tinggi (*high order element*) dengan mid-side node. Tipe elemen ini cocok dipakai untuk meshing geometri yang tidak teratur seperti welding pada penelitian ini. Typical model elemen hingga ditunjukkan pada Gambar 3.5 sedangkan Gambar 3.6 menunjukkan model geometri tanpa welding. Pada model ini pad dan vessel disatukan, untuk menunjukkan perlunya welding. Telah ditunjukkan dengan simulasi, bahwa jika pad dan vessel tidak disatukan (ansys command: glue), maka tidak diperoleh solusi, sedangkan jika pad dan vessel diglue, diperoleh solusi seperti pada Gambar 3.7. Selanjutnya pad dan vessel tidak diglue, tetapi diberikan welding seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 4. Typical Finite Elemen Model (ANSYS modeling)

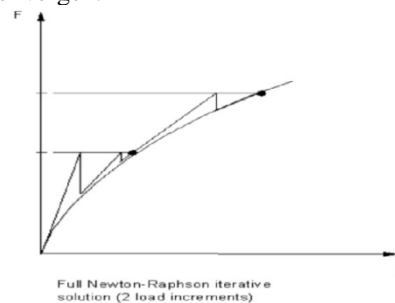
4 Kondisi Batas dan Pembebanan

Untuk sebuah bejana tekan silinder yang disupport pada empat buah lug, maka kondisi batas yang dipakai adalah perpindahan nol pada arah vertikal untuk seluruh node pada lubang baut

(ANSYS command: D,ALL,UY,0). Geometri dimodelkan hanya seperempat dengan memanfaatkan kondisi simetri pada arah hoop seperti pada Gambar 3.10, namun seluruh bagian struktur dapat ditunjukkan dengan cara ekspansi (ansys command: /expand). Seluruh node pada bagian atas dan bawah diberi constraint pada arah radial, sedangkan kondisi simetri pada arah hoop diaplikasikan pada node sepanjang sumbu vessel.

5 Solusi (ANSYS Solution)

Solusi yang dilakukan pada penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh welding terhadap limit load. Pada analisis pertama welding diberikan pada arah vertikal dan dicatat hasilnya termasuk distribusi stress pada vessel di daerah pad kemudian analisis kedua welding diberikan pada arah vertikal dan horizontal dan dicatat limit loadnya dan perubahan distribusi tegangan geser yang terjadi. Ini dilakukan dengan analisis limit load menggunakan solusi nonlinear. Beban diberikan secara ramped dan ANSYS akan menentukan solusi nonlinear dengan algoritma Newton-Raphson seperti ditunjukkan pada Gambar 3.12. Limit beban adalah beban terakhir yang konvergen.



Gambar 5. Algoritma Newton-Raphson untuk Analisis Nonlinear

6 Review Hasil

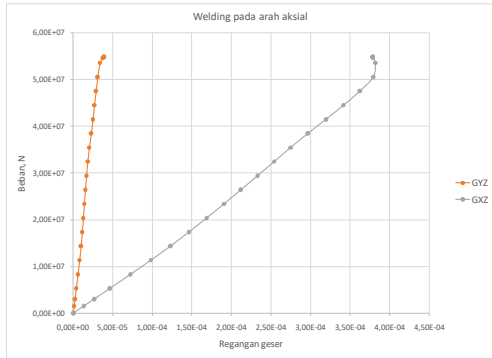
Hasil analisis elemen hingga dengan ANSYS dapat diperoleh pada tahap Post-processor. Hasil yang akan diambil adalah grafik beban terhadap perpindahan untuk limit beban. Distribusi stress pada welding juga akan ditampilkan untuk kondisi limit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1 Limit Beban

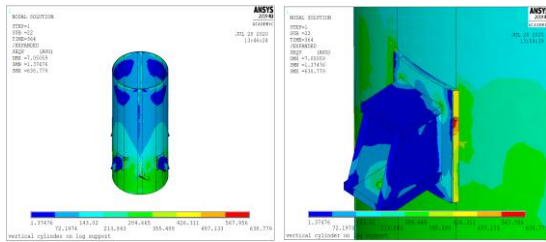
Limit beban adalah beban terakhir yang konvergen dari solution non linear seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1 beban yang diberikan adalah 500 MPa dalam bentuk tekanan pada permukaan bawah dinding bejana dengan keliling

3769,9 mm dan tebal 10 mm (luas cincin = 37699 mm²). Gambar 4.1 menunjukkan limit load sebesar 364 MPa pada substep ke 22. Beban ini setara dengan 364 N/mm² x 37699 x 4 = 54889744 N atau 54889,744 kN. Tipikal hubungan beban dan regangan pada salah satu node di daerah welding vessel dan pad.



Gambar 6. Kurva beban – regangan geser pada welding pad

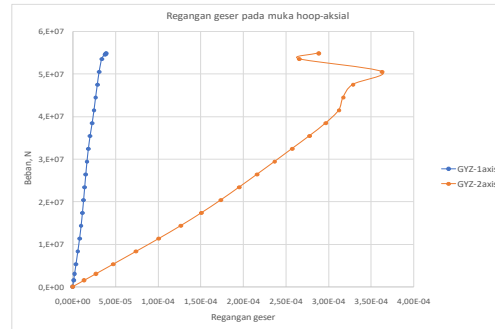
Gambar 7 menunjukkan kontour stress (von Mises) ketika limit load dicapai. Dapat dilihat bahwa stress tertinggi terjadi pada welding pad dengan vessel yang nilainya adalah 1,325 kali tegangan luluh material welding.



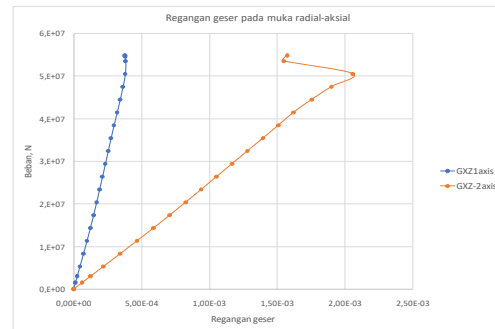
Gambar 7. Kontur stress (von Mises) pada saat limit beban dicapai

Tegangan geser baik pada muka radial-aksial (τ_{xz}), hoop-aksial (τ_{yz}) dan radial-hoop (τ_{xy}) dibawah nilai tegangan luluh material welding seperti dapat dilihat pada Gambar 4.4, 4.5 dan 4.6. Nilai tegangan geser pada muka radial-aksial adalah 0,515 kali tegangan luluh material welding. Sedangkan untuk muka hoop-aksial, nilai tegangan geser adalah 0,417 kali tegangan luluh material welding. Untuk nilai tegangan geser pada muka radial-hoop adalah 0,731 kali tegangan luluh material welding.

2 Welding Pada Arah Vertikal dan Horizontal



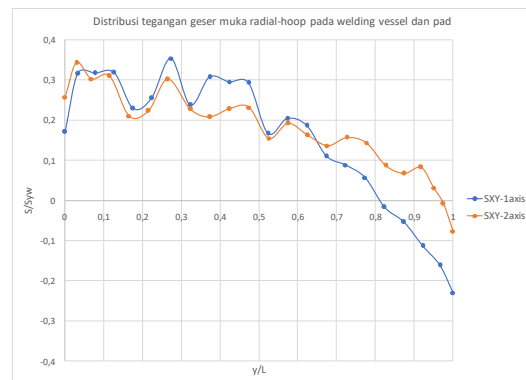
(a)



(b)

Gambar 8. Kurva hubungan beban terhadap regangan geser, (a) pada muka hoop-aksial, (b) pada muka radial-aksial

Pada Gambar 8 menunjukkan bahwa nilai tegangan geser pada muka radial-aksial lebih besar ketika diberikan las horizontal yaitu sebesar 0,634 kali tegangan luluh material las, sebelum diberikan las horizontal nilai tegangan gesernya adalah 0,515 kali tegangan luluh material welding.



Gambar 9. Perbandingan distribusi tegangan geser pada muka radial-hoop antara lasan vertikal dan vertikal horizontal di vessel dan pad

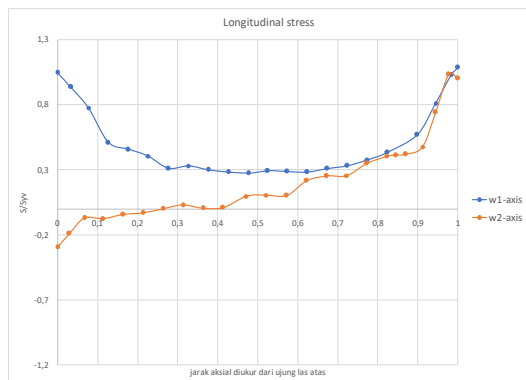
Gambar 9 menunjukkan distribusi tegangan geser pada welding vessel dan pad diplot pada muka radial-hoop (SXY). Dapat dilihat bahwa tegangan

geser berkurang dengan menambah las pada arah horizontal.

3 Tegangan Longitudinal dan Circumferensial

Attachment Lug pada sebuah bejana tekan menimbulkan local stress pada dinding bejana. Stress ini harus ditambahkan kepada stress longitudinal dan hoop akibat beban tetap (*sustained load*). Tegangan longitudinal dan circumferential dihitung menurut ASME Boiler and PV Code Section VIII Divisi 1, part 5.

Gambar 10 menunjukkan distribusi tegangan longitudinal yang diplot sepanjang garis las pada pad dan vessel. Dapat dilihat bahwa penambahan las pada sisi horizontal dari lug mengurangi nilai stress secara signifikan, terutama pada ujung atas lasan. Secara umum nilai hasil dari Ansys lebih kecil dari pada nilai yang dihitung dengan persamaan (1). Pada Gambar 4.21 dapat dibaca nilai tegangan longitudinal sebesar 1.04 kali tegangan luluh material bejana dan berkurang dengan penambahan las pada sisi horizontal. Perbedaan ini timbul karena nilai D pada diagram pada bagian 2.1.4 (halaman 14) maksimal adalah 0.25, sedangkan geometri yang dipakai pada penelitian ini mempunyai nilai $D = 0.44$.

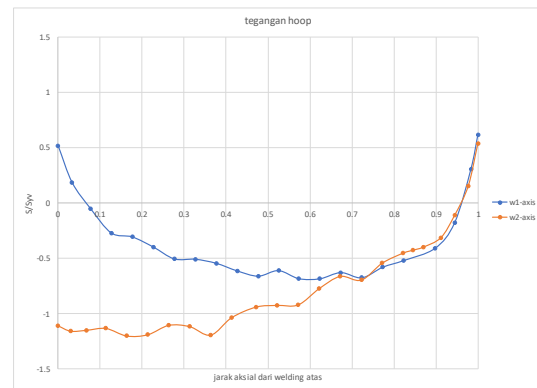


Gambar 10 Distribusi tegangan longitudinal

Gambar 11 menunjukkan distribusi tegangan hoop (circumferential) yang diplot sepanjang garis las pada pad dan vessel. Dapat dilihat bahwa penambahan las pada sisi horizontal pad dan lug meningkatkan nilai stress secara signifikan, terutama pada ujung atas lasan. Pada Gambar 4.22 dapat dibaca nilai tegangan hoop sebesar 0,516 kali tegangan luluh material bejana dalam bentuk tarik dan bertambah secara signifikan dengan penambahan las pada sisi horizontal hingga mencapai nilai 1,108 kali tegangan luluh material bejana, tapi dalam bentuk tekan.

Secara umum nilai hasil dari Ansys lebih kecil dari pada nilai yang dihitung dengan persamaan (2). Perbedaan ini timbul karena nilai D pada diagram pada bagian 2.1.4 (halaman 14) maksimal adalah

0.25, sedangkan geometri yang dipakai pada penelitian ini mempunyai nilai $D = 0.44$.



Gambar 11. Distribusi tegangan hoop

KESIMPULAN

Penambahan welding pada sisi horizontal meningkatkan limit load menjadi 55191 kN dari sebesar 54889 kN saat diberikan welding pada sisi vertikal saja karena welding pada arah hoop mengurangi maksimum stress. Tegangan circumferential lebih besar daripada tegangan longitudinal, baik untuk welding pada satu sisi vertikal, maupun welding pada kedua sisi vertikal dan horizontal. Penambahan welding pada arah horizontal menurunkan nilai maksimum stress yang diperoleh dengan welding pada sisi vertikal saja. Penurunan ini terjadi karena welding arah hoop mengurangi stress dalam bentuk tarik pada dinding bejana.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pembimbing beserta rekan-rekan mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung sehingga terlaksananya penelitian ini dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ANSYS 2019 R.3, Ansys Inc., N.J.
- [2] ASME Boiler and PV Code Section VIII Divisi 2, 2007, ASME
- [3] Boljanovic, S., and Maksimovic, S., 2013, *Fatigue Crack Growth Modeling of tachment Lugs*. International Journal of Fatigue. Article in press.
- [4] Gray, T.G.F., Mackenzie, D., Heaton, A., and Lubis, A., 2000, *Structural Integrity of a Welded Attachment Junction : Analysis and*

- Collapse Test*. Journal of Strain Analysis Vol. 35 No. 6.
- [5] Grimsmo, E.L., Clausen, A.H., Aalberg, A., and Langseth, M., 2017, *Fillet Welds Subjected to Impact Loading An Experimental Study*. International Journal of Impact Engineering, Vol. 000, pp. 1 – 13.
- [6] Megyesy, E.F., 1995, *Pressure Vessel Handbook*. Tenth Edition, Tulsa, Oklahoma.
- [7] Moss, R.D., 2004, *Pressure Vessel Design Manual 3th edition*. Gulf Professional Publishing, USA.
- [8] Mikheevskiy, S., Glinka, G., and Algera, D., 2012, *Analysis of Fatigue Crack Growth in An Attachment Lug Based on The Weight Function Technique and The UniGrow Fatigue Crack Growth Model*. International Journal of Fatigue, Vol. 42, pp. 88 – 94.
- [9] Rusdi, N., dan Suyuti, M.A., 2017, *Perancangan Mesin-Mesin Industri*. Cetakan Ke I, Deepublish, Yogyakarta.
- [10] Werner, B., Heyer, H., and Sande, M., 2016, *Experimental and Numerical Investigation of Fracture in Fillet Welds by Cross Joint Specimens*. Procedia Structural Integrity, Vol. 2, pp. 2054 – 2067.
- [11] Xing, S., Dong, P., and Threstha, A., 2016, *Analysis of Fatigue Failure Mode Transition in Load-carrying Fillet Welded Connections*. Marine Structure, Vol. 46, pp. 102 – 126.