

Jurnal Inovasi Ilmu Pengetahuan dan Teknologi, 1 (1): 30-06, 2020
ISSN: 2686-5157



STRESS ANALYSIS SHROUD PLATE ORIFICE CHAMBER DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Mustasyar Perkasa^{1,2*}, Barkah Fitriyana², Wahyu Sulistiyo², Riski Pratama Mulyana²

¹Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No. 1, Tangerang Selatan, Indonesia

²Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur BPPT, Gd. 220 PUSPIITEK, Tangerang Selatan, Indonesia

Abstrak: Terjadinya keretakan pada sambungan las *shroud plate* maka *hot gases* yang bersuhu 750 °C akan mengalir keluar dari area dalam *shroud plate* ke area dinding orifice chamber, sehingga perlu dilakukan penambahan *box high density refractory eksternal orifice chamber* pada sisi luar dari *orifice chamber*. Penguatan sambungan las dengan menggunakan *stiffener* dan penambahan *box high density refractory eksternal orifice chamber* ini yang harus diperhitungkan dalam segi kekuatan strukturnya menggunakan *finite elemen analisis* (FEA). Pada penelitian dilakukan *finite elemen analisis* (FEA) pemasangan *stiffener plate* pada *shroud plate* untuk menentukan jumlah *stiffener* yang dibutuhkan dan pemasangan *box high density refractory eksternal orifice chamber* terkait dengan penambahan beban *spring support*. Material *shroud plate* adalah baja karbon sesuai dengan ASTM grade SA 240 TP 304H, sedangkan material penguat adalah SA 240 TP 304. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa *shroud plate* mengalami retak yang diakibatkan oleh korosi. Dari perhitungan FEA, maka estimasi jumlah *stiffener plate* yang dibutuhkan sekitar 107 buah, atau apabila menggunakan model penguat *patching* berjumlah 7 buah. Pemasangan *box* pada dinding *orifice chamber* akan mengakibatkan permukaan luar *orifice chamber* tidak mendapatkan pendinginan alami dari udara luar sehingga suhu pada dinding *orifice* yang dipasang *box* tidak turun ke 325 °C. *Orifice chamber* terbuat dari material *carbon steel* SA 516 TP 70 yang hanya mampu menahan beban temperatur hingga 538 °C sehingga apabila terpapar beban temperatur hingga 750 °C maka material akan *failed*.

Kata Kunci: *orifice chamber, shroud plate, box high density, FEM*

Abstract: Cracks in *shroud plate* welding joints will cause *hot gases* with a temperature of 750 °C to flow out from the inside *shroud plate* area to the wall area of the *orifice chamber*, so it is necessary to add an external *high density refractory orifice chamber box* to the outer side of the *orifice chamber*. Strengthening the welding joint by using a *stiffener* and the addition of this *high density refractory box orifice chamber* must be calculated of the structural strength by *finite element analysis* (FEA). In this research, the *finite element analysis* (FEA) of *stiffener plate* installation on the *shroud plate* is used to determine the amount of *stiffener* needed and the installation of *high density refractory box external orifice chamber* related to the addition of *spring support* load. *Shroud plate* material is *carbon steel* according to ASTM grade SA 240 TP 304H, while the reinforcing material is SA 240 TP 304. The results of the inspection show that the *shroud plate* has cracked due to corrosion. From the FEA calculation, the estimated number of *stiffener plates* needed is about 107 pieces, or when using a *patching plate* model of 7 units. Installation of the *box* on the *orifice chamber* wall will cause the outer surface of the *orifice chamber* to not get natural cooling from the outside air so that the temperature on the *orifice* wall mounted *box* does not drop to 325 °C. The *Orifice chamber* is made of SA 516 TP 70 *carbon steel* material which is only able to withstand temperature loads up to 538 °C so that when exposed to temperatures up to 750 °C the material will fail.

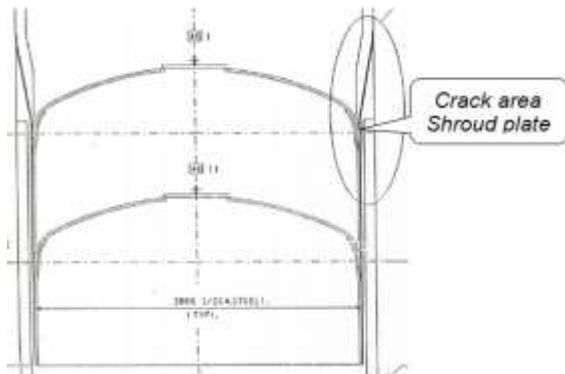
Key words: *orifice chamber, shroud plate, box high density, FEM*

Corresponding Author: Mustasyar Perkasa, email : m.perkasa@yahoo.com

I. PENDAHULUAN

Struktur *Shroud Plate* dengan material SA 240 TP 304H beroperasi pada tekanan 0,2 kg/cm² dan Temperatur 750 °C. Kondisi aktual mengalami keretakan pada sambungan las hampir melingkar sekeliling *shroud plate* sehingga perlu dilakukan pemasangan *stiffener* atau *patching* sebagai penguat sambungan las yang retak dan untuk mencegah bagian bawah *shroud plate* jatuh .

Kemudian akibat terjadinya keretakan pada sambungan las *shroud plate* maka *hot gases* yang bersuhu 750 °C akan mengalir keluar dari area dalam *shroud plate* ke area dinding *orifice chamber*, sehingga perlu dilakukan penambahan *box high density refractory eksternal orifice chamber* pada sisi luar dari *orifice chamber*. Penguatan sambungan las dengan menggunakan *stiffener* dan penambahan *box high density refractory eksternal orifice chamber* ini yang harus diperhitungkan dalam segi kekuatan strukturnya menggunakan *finite elemen analisis* (FEA).



Gambar 1. Crack area pada shroud plate [1]

II. TINJAUAN PUSTAKA

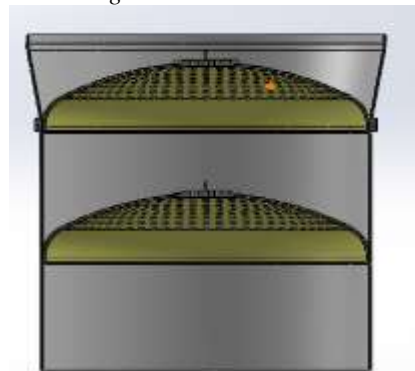
Shroud plate adalah salah satu dari komponen *orifice chamber* yang digunakan sebagai dudukan dari *grid plate*. *Grid plate* terbuat dari plate tipis stainless steel, pada bagian tengahnya dilubangi dengan ukuran yang telah dihitung besarnya, kemudian dipasang pada pipa alir untuk memberikan beda tekanan. *Orifice chamber* dapat dipakai untuk semua fluida yang bersih dan gas, tetapi tidak umum dipakai untuk fluida yang mengandung *solid*/kotoran.

Tujuan dari *Finite elemen analisis* (FEA) adalah untuk mendapatkan data berupa nilai tegangan yang terjadi pada *stiffener plate* sebagai penguat sambungan las pada *shroud plate* yang mengalami keretakan dan *spring support* akibat pemasangan *box high density refractory eksternal orifice chamber*. Struktur memenuhi kriteria aman jika hasil simulasi *Finite elemen analisis* (FEA) berupa stress maksimum yang terjadi masih berada di bawah nilai tegangan ijin materialnya. Selain itu juga memberikan beberapa rekomendasi disain berdasarkan hasil simulasi yang sudah dilakukan [2, 3].

Dalam memilih material *stiffener* dan *patch plate* mengacu pada standar ASTM (*American Society of Testing Materials*) serta ASME (*American Standard of Mechanical Engineering*).

Keretakan pada *shroud plate* menimbulkan kebocoran gas panas dengan suhu 750 °C yang mengenai dinding *orifice* yang dapat mengakibatkan kerusakan pada dinding *orifice*. Spesifikasi teknis dari *orifice chamber* adalah [1]

1. Tipe : Cylindrical
2. Diameter dalam *Orifice Chamber* (ID) : 9700 mm.
3. Diameter Luar *Orifice Chamber* (OD) : 2496 mm.
4. Temperatur operasi : 750 °C
5. Temperatur pelat sisi luar : 325 °C
6. Tekanan operasi : 0,2 kg/cm² / grid.
7. Material : SA 516 TP 70
8. *Tensile Strength* : 485 MPA
9. *Yield Strength* : 260 MPA



Gambar 2. Shroud plate dan grid plate

III. METODOLOGI

Pengumpulan data awal sebagai data pendukung penelitian mutlak diperlukan. Data-data yang diperlukan antara lain spesifikasi dari data material dan instalasi serta operasional.

Adapun tahapan pengujian yang akan dilakukan meliputi :

- a. Pengambilan data drawing.

Properti material sebagai berikut:

Material Shroud Plate : SA 240 TP 304H [4]

Tabel 1. Properti material SA 240 TP 304H

Tensile Strength	515 Mpa
Yield Strength	205 Mpa
Allowable Stress (Pada 788 °C)	12,5 Mpa
Allowable Stress (Pada 750 °C)	17,2 Mpa

Material stiffner untuk penguat : SA 240 TP 304 [4]

Tabel 2. Properti material SA 240 TP 304

Tensile Strength	515 Mpa
Yield Strength	205 Mpa
Allowable Stress (Pada 788 °C)	13,9 Mpa
Allowable Stress (Pada 750 °C)	17,2 Mpa

- b. Desain *shroud plate*

Desain *shroud plate* dilakukan menggunakan software *solidworks*

- c. Menghitung distribusi tegangan pada *shroud plate*

Perhitungan distribusi tegangan pada *shroud plate* dilakukan menggunakan software ANSYS.

Tabel 3. Data desain dan operasi yang digunakan dalam pemodelan [1]

Temperatur Desain	788 °C	
Temperatur Operasi	750 °C	
Tekanan Desain	0,788 kg/cm ²	0,078 MPa
Tekanan Operasi	0,2 kg/cm ²	0,02 MPa

Tabel 4. Beban pada simulasi *shroud plate* yang akan digunakan dalam pemodelan [1]

Berat Grid Plate 1 (W1)	3,125 ton	31253,8 N
Berat Grid Plate 2 (W2)	3,125 ton	31253,8 N
Berat Shroud Plate (di bawah)	4,371 ton	45250 N

area crack) (W3)		
Berat Refractory (W4)	10,7185 ton	107185 N
Tekanan Operasi Grid 1 (P1)	0,02 MPa	
Tekanan Operasi Grid 2 (P2)	0,02 MPa	

- d. Desain penguat *stiffener plate*

Desain penguat *stiffener plate* dilakukan menggunakan software *solidworks*

- e. Menghitung distribusi tegangan pada *stiffener plate*

Perhitungan distribusi tegangan pada *stiffener plate* dilakukan menggunakan software ANSYS.

- f. Menentukan jumlah *stiffener plate* yang diperlukan

Menghitung jumlah *stiffener* menggunakan persamaan total beban dibagi beban pada satu *stiffener*

- g. Desain *patch plate*

Desain *patch plate* dilakukan menggunakan software *solidworks*

- h. Menghitung distribusi tegangan pada *patch plate*

Perhitungan distribusi tegangan pada *patch plate* dilakukan menggunakan software ANSYS.

- i. Menghitung nilai distribusi tegangan *shroud plate* dengan penguat *stiffener plate* dan *patch plate*

Perhitungan distribusi tegangan pada *shroud plate* dengan penguat *stiffener plate* dan *patch plate* dilakukan menggunakan software ANSYS.

- j. Menghitung distribusi Tegangan *Box High Density Refractory External Orifice Chamber* dengan Temperatur Carbon Steel 325 °C

Perhitungan distribusi tegangan pada *Box High Density Refractory External Orifice Chamber* dengan Temperatur Carbon Steel 325 °C dilakukan menggunakan software ANSYS.

- k. Menghitung distribusi Tegangan *Box High Density Refractory External Orifice Chamber* dengan Temperatur Carbon Steel 750 °C

Perhitungan distribusi tegangan pada *Box High Density Refractory External Orifice Chamber* dengan Temperatur Carbon Steel 750 °C dilakukan menggunakan software ANSYS.

- l. Uji tarik material *shroud plate*

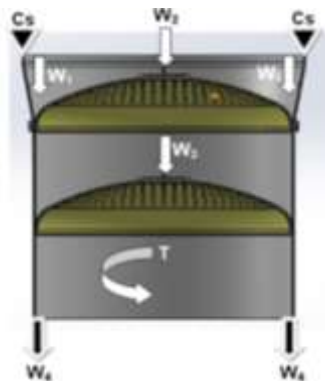
Uji tarik materiak *shroud plate* dilakukan menggunakan mesin UPM 1000.

m. Menghitung distribusi tegangan pada *Shroud Plate* Setelah Uji Tarik

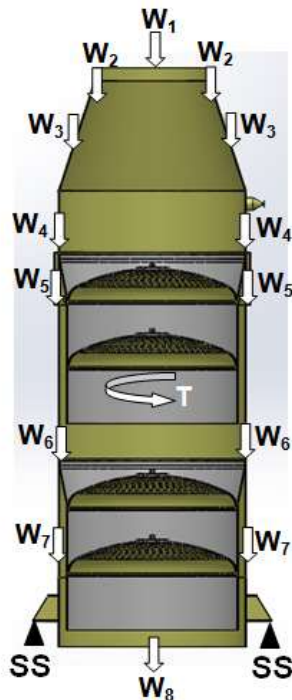
Perhitungan distribusi tegangan pada *Shroud Plate Setelah Uji Tarik* dilakukan menggunakan software ANSYS.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Load Diagram



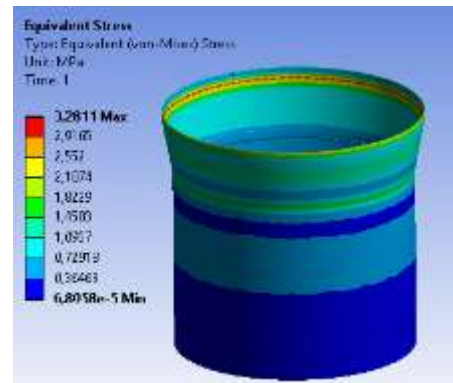
Gambar 3. Load diagram pada *shroud plate*



Gambar 4. Load diagram pada orifice chamber dengan penambahan *box refractory*

Distribusi Tegangan Pada *Shroud Plate*

Distribusi tegangan dengan asumsi *shroud plate* belum mengalami keretakan pada sambungan las atau sesuai dengan *original desain* dan *new equipment*. Beban yang diterima oleh *shroud plate* adalah beban force, beban pressure dan beban temperatur $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + T$. Pada W_2 dan W_3 terdapat beban *grid plate* dan beban *pressure* (P_1 dan P_2). Hasil stress analysis didapatkan nilai tegangan maksimum sebesar 3,28 Mpa. Lokasi tegangan maksimum berada didekat ujung *shroud plate* (area yang menempel pada dinding chamber yang ditandai dengan area berwarna merah. Nilai maksimum tegangan sebesar 3,28 Mpa masih berada di bawah nilai *allowable stress* material SA 240 TP 304H sebesar 13,9 Mpa pada temperatur desain 788°C.



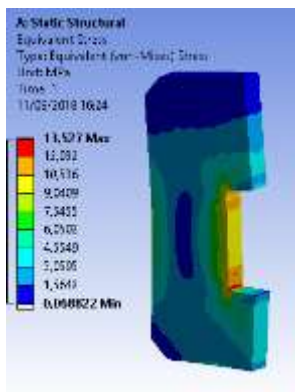
Gambar 5. Nilai distribusi tegangan pada *shroud plate* tanpa keretakan sambungan las

Distribusi Tegangan Pada *Stiffener Plate*

Stress analysis pada *stiffener plate* dimaksudkan untuk mengetahui berapa besar beban yang mampu ditopang oleh 1 buah *stiffener plate*. Hal ini akan berhubungan dengan jumlah *stiffener plate* yang dibutuhkan untuk penguatan sambungan las yang retak pada *shroud plate*. Material *stiffener plate* adalah SA 240 TP 304 dimana nilai *allowable stress* pada temperatur desain 788 °C sebesar 13,9 Mpa. Gambar 6 merupakan simulasi nilai distribusi tegangan pada 1 buah *stiffener* dengan beban force sebesar 1000 N dan beban temperatur 788 °C . *Fixed support* pada *stiffener plate* berada di *surface A* dan beban-beban yang bekerja berada di *surface B*. Hasil simulasi *stress analysis* menunjukkan Lokasi tegangan maksimum sebesar 13,527 MPA terjadi pada sudut-sudut *stiffener* yang ditandai dengan area berwarna merah. Nilai tegangan maksimum hampir

mencapai *allowable stress* material sebesar 13,9 Mpa. Artinya 1 buah stiffener plate hanya mampu menahan beban 1000 N pada suhu 788 °C, sedangkan total beban yang harus ditopang oleh stiffener plate adalah 106210 N sehingga asumsi jumlah stiffener (N) yang dibutuhkan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{jumlah stiffner} &= \frac{\text{Total beban}}{\text{beban 1 stiffner}} \\ &= \frac{106210 \text{ N}}{1000 \text{ N}} = 106,2 \\ &= 107 \text{ buah stiffner} \end{aligned}$$

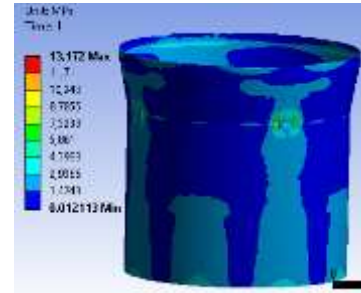


Gambar 6. Nilai distribusi tegangan pada 1 buah stiffener plate dengan beban 1000 N

Distribusi Tegangan Pada Shroud Plate Dengan Penguat 4 Patch Plate

Stress analysis pada kasus ini adalah dengan memodelkan *shroud plate* secara terpisah antara bagian atas sambungan las dengan bagian bawah sambungan las yang mengalami keretakan dan dihubungkan menggunakan 4 buah patch plate dengan dimensi patch plate adalah 300 mm x 150 mm x 32 mm. Beban yang diberikan merupakan kombinasi pembebanan $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + P_1 + P_2 + T$. Nilai *allowable stress* material dihitung pada temperatur operasi 750 °C yaitu sebesar 17,2 Mpa. Nilai tegangan maksimum dari hasil simulasi (gambar 7) didapat sebesar 13,172 Mpa, dengan lokasi tegangan maksimum berada di area tepi antara patch plate dengan shroud plate yang ditandai dengan area berwarna merah. Jika dibandingkan dengan *allowable stress* material sebesar 17,2 Mpa pada suhu operasi 750 °C maka penguatan berupa 4 buah patching ini direkomendasikan untuk diaplikasikan dengan asumsi *material*

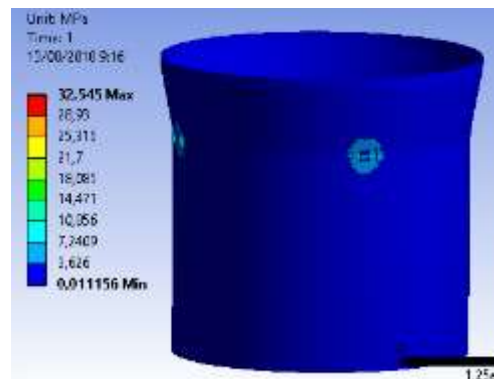
properties yang digunakan adalah *new equipment*.



Gambar 7. Nilai distribusi tegangan pada shroud plate dengan penguat 4 patch plate

Distribusi Tegangan Pada Shroud Plate Dengan Penguat 10 Stiffener Plate Dan 7 Patch Plate

Stress analysis shroud plate dengan penguatan *stiffener* dan *patch plate* secara bersamaan dilakukan mengingat kondisi aktual di lapangan telah terpasang *stiffener*. *Shroud plate* dimodelkan secara terpisah antara bagian atas sambungan las dengan bagian bawah sambungan las yang mengalami keretakan dan dihubungkan menggunakan 10 *stiffener plate* dan 7 *patch plate* (gambar 8). Patch plate didistribusikan secara merata sebanyak satu buah patch plate pada masing-masing arah mata angin utara, timur dan selatan. Sedangkan pada arah mata angin barat terdapat 4 buah patch plate. Beban yang dimasukkan merupakan kombinasi $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + P_1 + P_2 + T$. Nilai distribusi tegangan dapat dilihat pada gambar 8 dengan maksimum tegangan 32 Mpa dengan lokasi maksimum tegangan terdapat di sudut-sudut *stiffener* (area lingkaran). Tegangan yang terjadi melebihi *allowable stress* material sebesar 17,2 Mpa pada suhu operasi 750 °C.

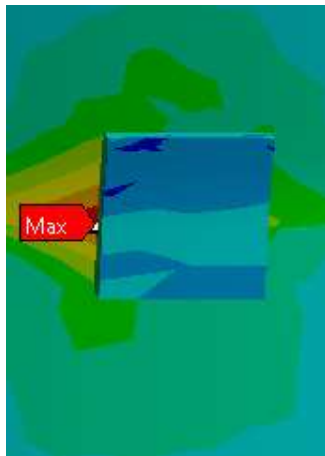


Gambar 8. Nilai distribusi tegangan shroud plate dengan kombinasi penguat stiffener dan patching

Distribusi Tegangan Pada *Shroud Plate* Dengan Penguat 7 *Patch Plate* Tanpa *Stiffener*

Stress analysis pada kasus ini adalah dengan memodelkan *shroud plate* secara terpisah antara bagian atas sambungan las dengan bagian bawah sambungan las yang mengalami keretakan dan dihubungkan menggunakan 7 buah *patch plate* serta melepas *stiffener plate* yang telah dipasang. Dimensi *patch plate* adalah bervariasi sesuai data pada sub bab 2.1.3 dengan pembagian masing-masing satu buah *patch plate* pada arah utara, timur dan selatan dan tiga buah *patch plate* pada arah barat. Beban yang diberikan merupakan kombinasi pembebanan $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + P_1 + P_2 + T$. Nilai *allowable stress* material dihitung pada temperatur operasi 750 °C yaitu sebesar 17,2 Mpa.

Nilai tegangan maksimum dari hasil simulasi didapat sebesar 12,4 Mpa, dengan lokasi tegangan maksimum berada di area tepi antara *patch plate* dengan *shroud plate* yang ditandai dengan area berwarna merah. Jika dibandingkan dengan *allowable stress* material sebesar 17,2 Mpa pada suhu operasi 750 °C maka penguatan berupa 7 buah patching ini direkomendasikan untuk diaplikasikan dengan asumsi *material properties* yang digunakan adalah *new equipment*.

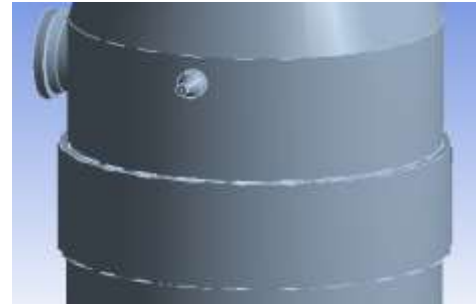


Gambar 9. Lokasi dan nilai tegangan maksimum *shroud plate* dengan penguat 7 buah *patch plate*

Distribusi Tegangan *Box High Density Refractory External Orifice Chamber* dengan Temperatur Carbon Steel 325 °C

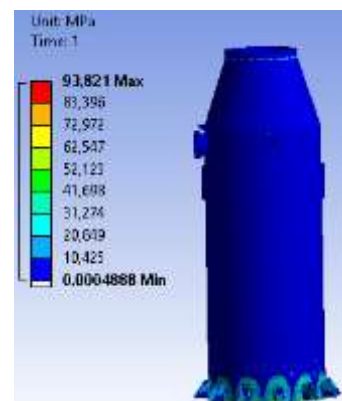
Penambahan *box* pada *orifice chamber* seperti pada gambar 10 dimana tumpuan berupa pegas terdapat pada 12 *face* bagian bawah

chamber sedangkan nilai temperatur pada permukaan luar carbon steel adalah 325°C sesuai data *thermografi*. Beban yang diberikan berupa kombinasi beban *dead load*, beban *refractory*, beban *pressure* dan beban *temperatur*. Total berat *refractory* pada *box* 914,75 Kg, sedangkan berat *box* 996,6 kg dengan total gaya keseluruhan pada *orifice chamber* 187438,4 kg. *Box* dibuat menggunakan material SA 240 TP 304 dengan nilai *allowable stress* pada suhu 325 °C adalah 132 MPa.



Gambar 10. Pemodelan *box orifice chamber*

Distribusi tegangan dapat dilihat pada gambar 11 dengan nilai tegangan maksimum sebesar 93 Mpa. Lokasi tegangan maksimum berada di area *spring support*. Nilai tegangan maksimum ini masih berada di bawah nilai *allowable stress* material sebesar 132 Mpa pada suhu 325°C, Sehingga penambahan *box orifice chamber* ini dapat diaplikasikan dengan asumsi kekuatan material seperti *new equipment*.

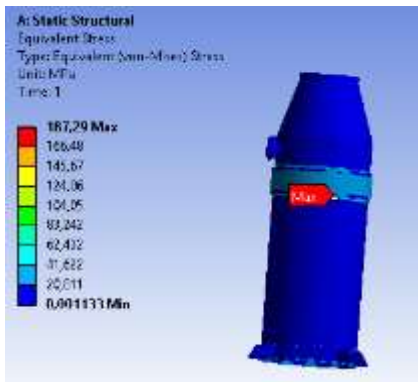


Gambar 11. Distribusi tegangan pada penambahan *box orifice chamber*

Distribusi Tegangan *Box High Density Refractory External Orifice Chamber* dengan Temperatur Carbon Steel 750 °C

Pemodelan dilakukan dengan asumsi *carbon steel failed* akibat kebocoran *hot gases*

dari dalam *orifice chamber* yang mengalir keluar melewati dinding *shroud plate* yang retak dan mengenai dinding *orifice chamber*. Pemasangan *box* pada dinding *orifice chamber* akan mengakibatkan permukaan luar *orifice chamber* tidak mendapatkan pendinginan alami dari udara luar sehingga suhu pada dinding *orifice* yang dipasang *box* tidak turun ke 325 °C. *Orifice chamber* terbuat dari material *carbon steel* SA 516 TP 70 yang hanya mampu menahan beban temperatur hingga 538 °C sehingga apabila terpapar beban temperatur hingga 750 °C maka material akan *failed*. Total beban yang dikenakan pada *orifice chamber* sebesar 187438,4 kg dengan beban temperatur sebesar 750 °C. Nilai distribusi tegangan dapat dilihat pada gambar 12 dimana tegangan maksimum sebesar 187,29 Mpa yang terjadi pada dinding *box* melebihi *allowable stress* material *box* SA 240 TP 304 sebesar 17,2 Mpa pada temperatur 750°C. Maka struktur ini tidak aman untuk diaplikasikan.



Gambar 12. Lokasi tegangan maksimum pada *box orifice chamber*

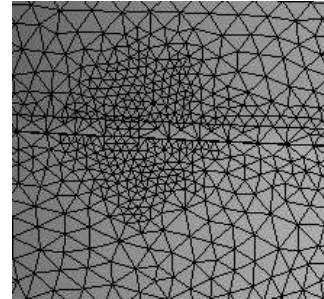
Distribusi Tegangan pada Shroud Plate Setelah Uji Tarik [5]

Tabel E.1 Properti material setelah uji tarik

	Sebelum	Sesudah
Tensile Strength (room)	515 MPa	84% (Tu awal)
Allowable Stress (room)	138 MPa	105,06 MPa
Allowable Stress (750 °C)	17,2 MPa	14,4 MPa

Untuk mengetahui nilai tegangan pada material *shroud plate* setelah uji tarik, maka dibuat *local refinement* pada meshing [6] pemodelan seperti yang terlihat pada gambar 13 dengan statistik node berjumlah 87355 nodal dan 42294 elemen. Hasil distribusi tegangan dapat

dilihat pada gambar 14 dimana nilai maksimum tegangan sebesar 15,926 Mpa terletak di **patch plate** yang berbatasan dengan *shroud plate*. Sedangkan nilai tegangan pada **shroud plate** sendiri bervariasi seperti yang terlihat pada gambar E.3 dengan nilai *sample probe* terbesar 15,759 Mpa dan nilainya semakin naik apabila mendekati perbatasan *shroud plate* dan *patch plate*.



Gambar 13. *Local refinement meshing* pada *shroud plate*

Properti material setelah uji tarik dapat dilihat pada tabel E.1. Allowable stress material sebelum uji tarik didapatkan dari tabel 1A ASME Section IID sebesar 17,2 Mpa. Sedangkan allowable stress material setelah uji tarik didapatkan dari hasil perhitungan tabel 1-100 mandatory appendix 1 dan perbandingan tabel 1A ASME Section IID dengan penggunaan untuk welded join eff 0,85, dan suhu kamar 38°C sehingga didapatkan nilai allowable stress setelah uji tarik sebesar 14,4 Mpa. Hasil tegangan pada *shroud plate* sebesar 15,759 Mpa dengan asumsi lasan menempel sempurna telah **melebihi allowable stress** material *shroud plate* 14,4 Mpa sehingga nilai tegangan ini telah melewati batas kriteria keberterimaan dan direkomendasikan untuk melakukan penggantian *shroud plate* dengan mempertimbangkan umur sisa dari hasil pengujian creep.



Gambar 14. Detail *Sample Probe* Distribusi tegangan pada *shroud plate*

V. KESIMPULAN

- Penguat berupa *stiffener* yang dibutuhkan untuk menahan kombinasi beban yang bekerja pada struktur *shroud plate* berjumlah 107 buah.
- Hasil simulasi pada pemasangan 4 buah *patch plate* ukuran 300 mm x 150 mm x 32 mm yang didistribusikan secara merata masing-masing 1 buah di arah utara, timur, selatan dan barat menghasilkan nilai tegangan yang memenuhi kriteria keberterimaan.
- Hasil simulasi pada pemasangan 7 *patch plate* dan 10 *stiffener* menghasilkan nilai tegangan maksimum yang melewati *allowable stress* material dengan lokasi tegangan maksimum pada sudut-sudut area *stiffener*.
- Hasil simulasi pada pemasangan 7 buah *patch plate* tanpa *stiffener* menghasilkan nilai tegangan yang memenuhi kriteria keberterimaan.
- Hasil simulasi menunjukkan bahwa struktur *box orifice chamber* dengan temperatur carbon steel 325°C dalam kondisi aman.
- Hasil simulasi pada *box orifice chamber* kasus *carbon steel failed* jauh melebihi *allowable stress* material sehingga tidak aman untuk diaplikasikan.
- Semua perhitungan dilakukan dengan asumsi properti material dalam kondisi *new equipment*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ornago, V.S., *Refractory Lining Procedure*. 1992.
- [2]. Tada, H., et al., *The stress analysis of cracks handbook*. Vol. 130. 2000: ASME press New York.
- [3]. Paris, P.C. and G.C. Sih, *Stress analysis of cracks*, in *Fracture toughness testing and its applications*. 1965, ASTM International.
- [4]. ASME, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code section II Part D*. 2010.
- [5]. Ramesh, K., *Experimental stress analysis*. 2011.
- [6]. Lee, H.H., *Finite Element Simulations With ANSYS Workbench 14, Theory, Application, case Study*. Tainan, Taiwan: Schroff Development Corporation. 580.