

## M1-001 SIMULASI NUMERIK MODIFIKASI *SLOT FURNACE*

### UNTUK PROSES *POST WELD HEAT TREATMENT* PADA *HEADER HARP-HRSG*

<sup>1</sup>Aditya Dena Kurniawan dan <sup>2</sup>Tri Agung Rohmat

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika No.2 Yogyakarta 55281. Fax. (0274) 902180, 521673  
email: <sup>1</sup>[dena.kurniawan@yahoo.com](mailto:dena.kurniawan@yahoo.com), <sup>2</sup>[triagung\\_ugm@yahoo.co.jp](mailto:triagung_ugm@yahoo.co.jp)

#### Abstrak

*Tegangan sisa yang terbentuk pada material yang telah mengalami pengelasan membuat material memiliki sifat yang lebih keras namun keuletannya lebih rendah. Sehingga, untuk menguranginya dilakukan proses perlakuan panas pasca las yang disebut Post Weld Heat Treatment (PWHT).*

*Saat ini proses PWHT pada sambungan las finned tube dan header HRSG yang dilakukan di PT ALSTOM Power Energy Systems Indonesia menggunakan slot furnace dalam proses heat treatmentnya. Alat yang ada sekarang bekerja dengan menggunakan sumber energi listrik berkapasitas 380 kW yang kemudian dikonversi menjadi energi termal melalui electric heating element. Mengingat harga listrik yang semakin mahal dan maraknya berita tentang krisis listrik saat ini, sehingga perlu dilakukan redesign slot furnace dengan menggunakan sumber energi alternatif lainnya selain listrik.*

*Penelitian ini bertujuan untuk memodifikasi sumber energi yang telah ada dengan menggunakan bahan bakar gas, yaitu LNG. Sebagai element yang ditreatment dalam perancangan ini adalah header harp HRSG dengan material baja karbon 0,3 % (SA-106 B). Dengan menggunakan simulasi numerik (CFD) diketahui distribusi temperatur pada header sehingga diperoleh desain slot furnace dengan konfigurasi burner yang terbaik. Kemudian, dari desain yang terbaik dilakukan variasi terhadap kapasitas burner yang digunakan.*

*Sebagai hasilnya, berdasarkan indikator keseragaman temperatur diperoleh slot furnace terbaik dengan kapasitas burner sebesar 350 kW dan berdasarkan indikator efisiensi diperoleh slot furnace terbaik pada kapasitas burner sebesar 330 kW dengan efisiensi 24,023 %.*

*Kata Kunci : simulasi numerik, post weld heat treatment, slot furnace.*

#### I. Pendahuluan

Pada proses pengelasan, bagian yang dilas menerima panas pengelasan setempat atau terlokalisir disekitar titik pengelasan, dan selama proses berjalan suhunya selalu berubah sehingga distribusi suhu tidak merata. Karena panas tersebut, maka pada bagian yang dilas terjadi pengembangan termal sedangkan pada bagian yang tidak mengalami pengelasan tidak berubah, sehingga menyebabkan terbentuknya tegangan sisa dan terjadinya distorsi (Berglund, 2001).

Adapun usaha untuk mengurangi tegangan sisa pada logam yang telah mengalami pengelasan adalah dengan melakukan proses perlakuan panas pasca las yang disebut *Post Weld Heat Treatment* (Carry, 1989). PWHT adalah suatu proses perlakuan panas dengan cara logam dinaikkan temperaturnya (dipanaskan) sampai batas tertentu, ditahan beberapa saat, kemudian didinginkan perlahan-lahan dengan tujuan untuk menghilangkan tegangan sisa sehingga meningkatkan keuletan pada logam dan memperkecil pengaruh terjadinya retak pada daerah lasan.

Proses PWHT pada sambungan las *finned tube* dan *header HRSG* yang dilakukan di PT ALSTOM Power Energy Systems Indonesia saat ini menggunakan *slot furnace* dengan sumber energi listrik. Dalam perkembangannya, belum pernah dilakukan studi untuk menggunakan sumber energi alternatif lainnya selain listrik, mengingat biaya listrik yang semakin mahal dan maraknya berita tentang krisis listrik dari tahun ke tahun.

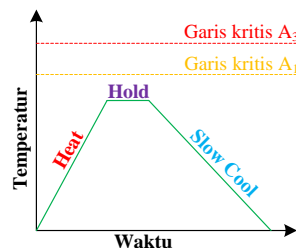
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran termal di dalam *slot furnace* yang ada sekarang sehingga bisa didapatkan suatu *initial condition* bagi redesign *slot furnace* dengan bahan bakar gas LNG. Dengan menggunakan simulasi numerik (CFD) melalui variasi pemodelan konfigurasi burner dan konsumsi bahan bakar, didapatkan desain *slot furnace* yang ideal dan kapasitas bahan bakar yang lebih optimal.

Pemodelan dan simulasi sistem dengan menggunakan *computational fluid dynamic* (CFD) adalah cara yang umum digunakan dalam kasus perpindahan panas atau *heat treatment*, seperti yang terdapat pada penelitian Berglund (2001), Alberg (2003), Yang *et al* (2005), dan Malfa *et al* (2008). Penggunaan simulasi sistem pada perancangan merupakan cara yang efektif karena cara ini lebih hemat biaya, waktu, dan dapat memprediksi permasalahan secara menyeluruh (Tuakia, 2008).

## II. Dasar Teori

### a. *Post Weld Heat Treatment*

*Post Weld Heat Treatment* yang bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa dinamakan juga *stress relief*. Diagram prosesnya adalah sebagai berikut.



**Gambar 2.1.** Grafik *Temperature Time Record* untuk PWHT

Pada awal proses, logam yang telah mengalami pengelasan dipanaskan di dalam *slot furnace* dengan kelajuan tertentu (100-120 °C/hr). Setelah mencapai temperatur pemanasan (*holding temperature*), kemudian dilakukan penahanan selama waktu tertentu. Tujuan penahanan ini untuk mendapatkan struktur yang homogen. Waktu penahanan disesuaikan dengan tebal bahan yang akan dipanasi (60 menit/inch). Setelah melalui proses pemanasan dan waktu penahanan selanjutnya untuk membawa ke temperatur ruangan dilakukan dengan pendinginan dalam dapur dengan kelajuan tertentu.

Di bawah ini merupakan standard *holding temperature* pada material P1

**Tabel 2.1.** *Holding temperature* untuk PWHT material P1(carbon steel 0,3 %)

Referensi	=	<i>Holding Temperature</i> (°C)
Alstom Standard	=	600 -720
Job Routing ALSTOM	=	595 -650
Modern Welding Technology	=	566 -649
Modern Welding Complete Coverage	=	537 -649
Teknologi Pengelasan Logam	=	590 -680

## b. Komputasi Numerik

### 1. Model Radiasi Rosseland

Model ini digunakan pada persoalan yang berhubungan dengan radiasi dan konveksi alami, seperti yang terjadi pada *slot furnace* dengan menggunakan *electric heating element*. Akan tetapi perhitungan difusi di dekat dinding dengan menggunakan model Rosseland kurang akurat, sehingga dalam model Rosseland digunakan *temperature slip boundary condition*. Sebenarnya ada beberapa model radiasi lain di dalam komputasi numerik, namun dipilih model radiasi Rosseland karena model ini lebih sederhana penggunaannya karena ada beberapa asumsi yang digunakan pada perhitungannya.

### 2. Persamaan atur fase gas

Dalam semua persoalan yang melibatkan aliran fluida (*fluid dynamic*) digunakan persamaan kekekalan massa dan momentum.

#### a. Persamaan kontinuitas (persamaan kekekalan massa)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \tag{2.1}$$

Persamaan diatas ideal untuk aliran fluida incompressible dan compressible.

#### b. Persamaan kekekalan momentum

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} + \nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{2.2}$$

Dengan P adalah tekanan statis,  $\vec{\tau}$  menyatakan tensor tegangan, kemudian  $\rho \vec{g}$  dan  $\vec{F}$  adalah gaya gravitasi dan gaya eksternal.

#### c. Persamaan spesies kimia

Apabila  $Y_i$  menyatakan fraksi massa dari sebuah spesies kimia, maka kekekalan fraksi massa  $Y_i$  dalam sebuah bidang kecepatan  $\vec{v}$  dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho Y_i + \nabla \cdot \rho \vec{v} Y_i = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \tag{2.3}$$

di sini  $\partial(\rho Y_i)/\partial t$  adalah suku yang menunjukkan laju perubahan fraksi massa spesies kimia persatuan volume. Besaran  $\rho \vec{v} Y_i$  adalah *flux* spesies kimia akibat konveksi.  $\vec{J}_i$  adalah *flux* akibat difusi. Besaran  $R_i$  menunjukkan laju pertumbuhan spesies kimia persatuan volume. Pertumbuhan ini akibat adanya reaksi kimia sehingga dapat bernilai positif, negatif atau nol. Kemudian  $S_i$  adalah suku produksi.

#### d. Persamaan transport untuk fraksi campuran

Dengan mengasumsikan difusifitas yang sama, persamaan spesies kimia di atas dapat dikurangi menjadi persamaan tunggal untuk fraksi campuran ( $f$ ). Asumsi difusifitas yang sama adalah memiliki problem untuk aliran laminer, akan tetapi bisa digunakan untuk aliran turbulen.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \bar{f} + \nabla \cdot \rho \bar{v} \bar{f} = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{user} \quad (2.4)$$

*Source term* ( $S_m$ ) menunjukkan transfer massa yang terjadi pada saat perubahan fase dari bahan bakar cair atau reaksi partikel (batu bara) menjadi fase gas. Kemudian  $S_{user}$  merupakan *user defined (source term)* yang lain.

e. Persamaan energi model pembakaran non-premix

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho H + \nabla \cdot \rho \bar{v} H = \nabla \cdot \left( \frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h \quad (2.5)$$

Dengan  $\frac{\partial}{\partial t} \rho H$  merupakan suku *unsteady* untuk enthalpy total,  $\nabla \cdot \rho \bar{v} H$  menyatakan suku konveksi, kemudian  $\nabla \cdot \left( \frac{k_t}{c_p} \nabla H \right)$  adalah suku konduksi dan yang termasuk dalam  $S_h$  adalah energi panas dari reaksi kimia atau *heat source* yang telah didefinisikan

### III. Metodologi Penelitian

#### a. Alat

Komputer Intel (R) Pentium (R) D, CPU 2,66 GHz, RAM 2GB dan Software Paket

#### b. Bahan

1. *Slot furnace* yang didalamnya terdapat glasswool dan batu tahan api sebagai isolator panas, *header harp* HRSG sebagai element yang ditreatment, thermocouple, dan *electric heating element*. Kemudian *slot furnace* dilengkapi dengan Autoprogrammer 380kW sebagai sumber tegangan, kemudian sekonic 12 Point Recorder untuk mengplot temperatur yang dibaca oleh thermocouple dan Dual Ramp Type Programmer sebagai pengatur arus yang masuk sekaligus mengetahui temperatur pada *header* secara digital.



Gambar 3.1. *Slot furnace* tampak luar



Gambar 3.2. *Slot furnace* tampak dalam

2. *New design slot furnace* dengan burner berbahan bakar gas LNG.
- 3.

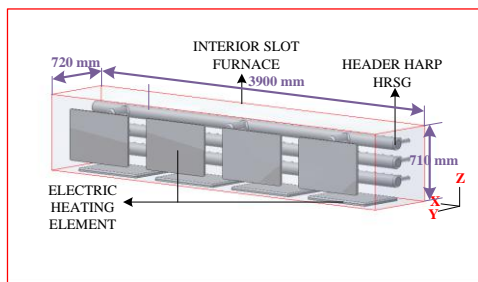
#### c. Jalan Penelitian

Dalam simulasi perancangan *slot furnace* ini domain komputasi yang pertama ditinjau adalah *slot furnace*, *electric heating element*, dan *header harp* HRSG yang telah dimodelkan menurut dimensi yang sebenarnya. Untuk memperoleh suatu *initial condition* bagi perancangan *slot*

*furnace*, asumsi awal yang digunakan adalah *setting* temperatur pada *header* berdasarkan *temperature time record* atau *Alstom standard procedure* untuk *holding temperature*. Setelah itu, domain komputasi yang digunakan selanjutnya adalah penggantian *heating element* dengan menggunakan burner *single stage* yang terdiri dari input bahan bakar dan input udara, lalu ditambahkan 4 buah cerobong pada *slot furnace* sebagai *outlet* dari gas hasil pembakaran. *Initial condition* pada *header* yang diperoleh dari simulasi sebelumnya merupakan parameter dasar untuk permodelan yang kedua. Kemudian, dengan variasi pemodelan konfigurasi burner dan konsumsi bahan bakar didapatkan desain *slot furnace* yang ideal dan kapasitas bahan bakar yang lebih optimal. Secara lebih jelasnya diuraikan sebagai berikut.

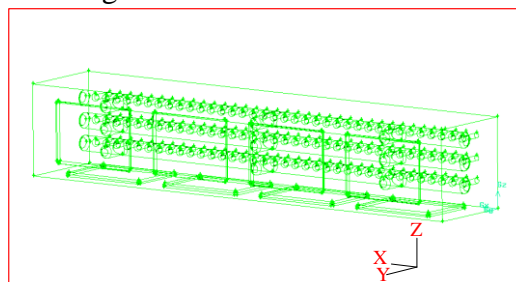
1. Simulasi *slot furnace* dengan menggunakan *electric heating element*

a. Membuat model



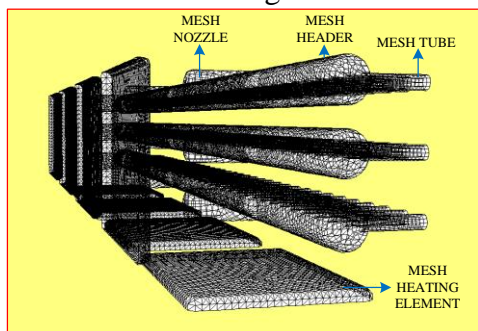
**Gambar 3.3.** Model *slot furnace*

b. Mengedit model

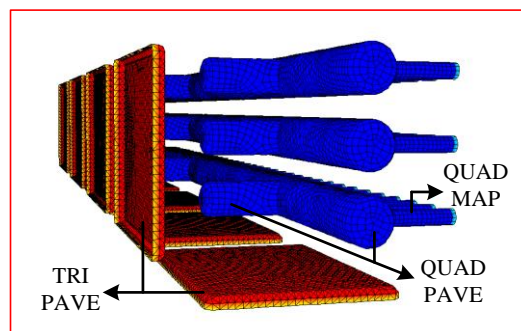


**Gambar 3.4.** *Slot furnace* yang telah diedit

c. Membuat meshing



**Gambar 3.5.** Bentuk mesh



**Gambar 3.6.** Bentuk mesh kontur temperatur

- d. Mendefinisikan kondisi batas pada model geometri
- e. Mengekspor dalam bentuk file mesh dan menyimpannya
- f. Mengimport mesh dan melakukan pengecekan
- g. Mendefinisikan model, memilih solver segregated, memilih model radiasi Rosseland
- h. Mendefinisikan material
- i. Menentukan kondisi operasi, mengaktifkan gravitasi
- j. Menginputkan data pada kondisi batasnya

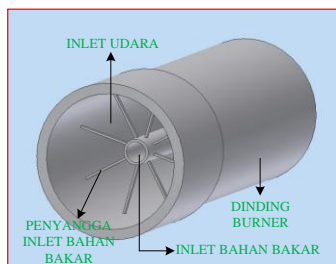
**Tabel 3.1** Input kondisi batas pada *slot furnace* dengan menggunakan *heating element*

Nama bagian	Input kondisi batas
<i>Header</i> atas, tengah, bawah	- <i>Temperature</i> = 650 °C - <i>Material name</i> = Carbon Steel
Dinding <i>furnace</i>	- <i>Heat Flux</i> = 0 - <i>Material name</i> =

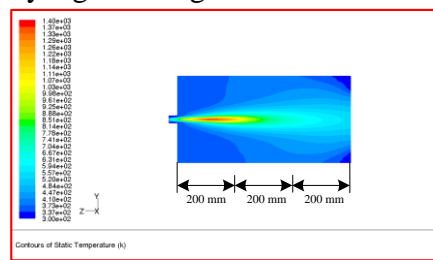


	Aluminium
<i>Heating element</i>	- Heat Flux = 116.764 W/m <sup>2</sup> - Wall Thickness = 0,03 m - Material name = Silicon Carbide

- k. Menentukan solusi (power law), membuat inialisasi (temperatur 600 °C), dan mengiterasinya
  - l. Setelah kriteria konvergensi terpenuhi, kasus dan data disimpan
  - m. Menampilkan kontur, mengplotkannya, dan mendapatkan *initial condition* untuk perancangan
  - n. Memulai kasus yang baru, *slot furnace* dengan burner berbahan bakar gas LNG
2. *Slot furnace* dengan bahan bakar gas LNG.
- a. Membuat desain dan mensimulasi burner yang akan digunakan

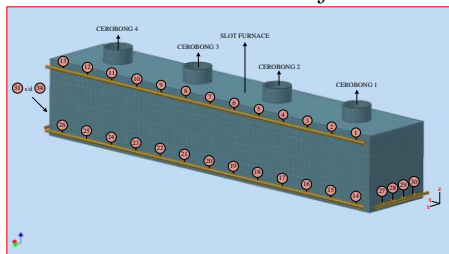


**Gambar 3.7.** Desain burner (tanpa swirl)

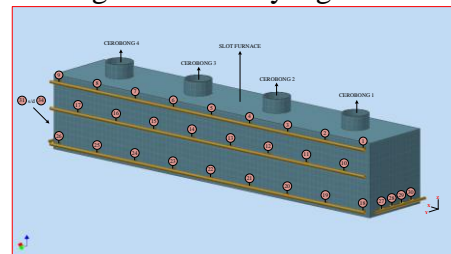


**Gambar 3.8.** Bentuk api burner

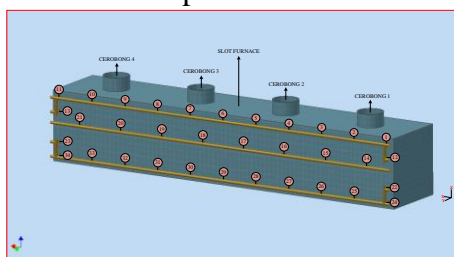
- b. Membuat desain baru *slot furnace* dengan konfigurasi burner yang berbeda (4 desain).



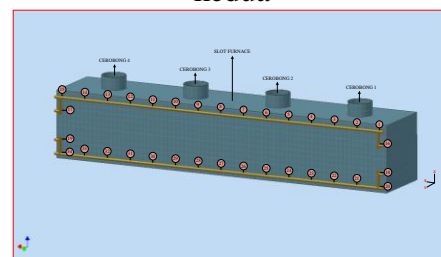
**Gambar 3.9.** Desain *slot furnace* pertama



**Gambar 3.10.** Desain *slot furnace* kedua



**Gambar 3.11.** Desain *slot furnace* ketiga



**Gambar 3.12.** Desain *slot furnace* keempat

- c. Mendefinisikan kondisi batas
- d. Mengekspor dalam bentuk file mesh
- e. Membuat persamaan reaksi

- f. Mendefinisikan model, memilih solver segregated, mengaktifkan model turbulen k-epsilon standard, mengaktifkan model pembakaran non premix, dan memasukkan persamaan reaksi
- i. Menginputkan data pada kondisi batasnya

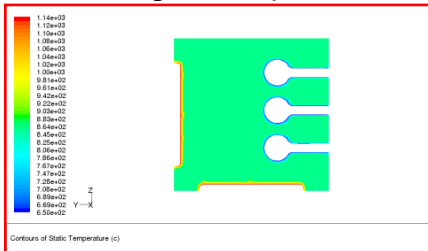
**Tabel 3.2** Input kondisi batas pada *slot furnace* dengan menggunakan burner

Nama Bagian	Input kondisi batas
Inlet bahan bakar	$m_{bb1-34} = 0,0002244 \text{ kg/s}$ $f_{mean} = 1$
Inlet udara	$m_{udara1-34} = 0,0117 \text{ kg/s}$ $f_{mean} = 0$
Header atas, tengah, bawah	- Heat Flux = $-1000 \text{ W/m}^2$ - Material name = Carbon Steel
Dinding <i>furnace</i>	- Heat flux = 0 - Material name = Aluminium
Outlet (1-4)	Outflow

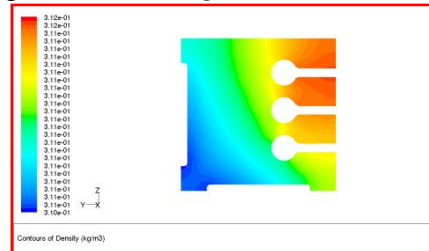
- j. Menentukan parameter kontrol solusi, melakukan inisialisasi kemudian iterasi
- k. Setelah konvergen, kasus & data disimpan.
- l. Melakukan variasi pada kapasitas burner

## IV. Hasil dan Pembahasan

### 1. Hasil simulasi pada *slot furnace* dengan menggunakan *heating element*



**Gambar 4.1.** Kontur temperatur pada  $x = 1,4 \text{ m}$



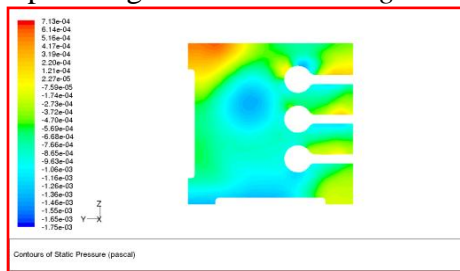
**Gambar 4.2.** Kontur massa jenis pada  $x = 1,4 \text{ m}$

Dalam simulasi yang dilakukan, tekanan dan temperatur mula-mula di dalam *furnace* dalam kondisi 1 atm dan temperatur 300 K. Sehingga dalam kasus ini berlaku persamaan untuk gas ideal.

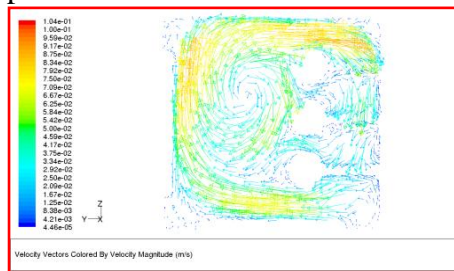
$$\rho = \frac{P_{op} + P}{R T}$$

Berdasarkan kontur temperatur pada gambar 4.1 temperatur fluida (udara) di dalam *furnace* secara visual menunjukkan keseragaman (*uniform*), dengan rata-rata temperatur sebesar 861 °C. Hal ini membuktikan bahwa proses perpindahan panas secara radiasi memang benar-benar efisien terjadi pada kondisi ruangan yang tertutup rapat/ vakum (Incropera,1981). Menurut persamaan gas ideal maka massa jenis akan berbanding terbalik dengan temperaturnya. Semakin tinggi temperatur maka massa jenis udara akan turun, demikian juga sebaliknya. Temperatur pada bagian *heating element* dan di dekatnya merupakan bagian yang cenderung memiliki temperatur yang lebih tinggi dari pada yang lainnya. Sesuai dengan persamaan di atas tentunya massa jenis udara pada bagian di dekat

*heating element* tersebut juga akan lebih rendah dari pada yang lain. Terlihat pada gambar 4.2 dimana pada bagian di dekat *heating element* tampak berwarna biru.



**Gambar 4.3.** Kontur tekanan pada  $x = 1,4 \text{ m}$



**Gambar 4.4.** Vektor kecepatan pada  $x = 1,4 \text{ m}$

Dalam kontur tekanan yang ditampilkan pada gambar 4.3 besarnya nilai kontur merupakan besarnya tekanan gaugena. Tanda positif dalam nilai kontur menunjukkan bahwa tekanannya di atas nilai tekanan operasinya, sedangkan nilai negatif menunjukkan bahwa tekanannya berada di bawah nilai tekanan operasinya. Perlu diingat bahwa penjumlahan dari tekanan operasi dengan tekanan gauge merupakan tekanan absolute pada kondisi tersebut (pada kasus ini tekanan absolut = tekanan di dalam *slot furnace*). Nilai yang ditampilkan pada kontur tekanan di atas mempunyai nilai yang sangat kecil. Sehingga bisa didefinisikan bahwa tekanan di luar *slot furnace* hampir sama dengan tekanan di dalam *slot furnace*.

*Natural convection* yang terjadi dalam kasus ini menyebabkan partikel-partikel gas di dalam *furnace* memiliki kecepatan akibat adanya perbedaan massa jenis dan gaya gravitasi. Temperatur merupakan faktor yang sangat penting di sini. Di dalam teori kinetik gas ideal, energi kinetik merupakan fungsi dari temperaturnya. Dimana ketika temperatur tinggi maka energi kinetiknya juga tinggi, demikian pula sebaliknya. Karena energi kinetik sebanding dengan kecepatan partikel maka dapat disimpulkan bahwa temperatur akan sebanding dengan kecepatan partikel gas. Sesuai dengan pernyataan tersebut maka pada bagian di dekat *heating element* memiliki kecepatan yang tinggi. Hal tersebut terlihat warna orange disekitar *heating element* (samping maupun bawah) pada vektor kecepatan gambar 4.4. Efek memusar terlihat jelas pada gambar tersebut, ini menunjukkan bahwa model radiasi Rosseland memiliki kekurangan dalam hal perhitungan di dekat dinding. Efek memusar yang terjadi menyebabkan kecepatan aliran fluida pada bagian tengah cenderung menurun dan mendekati 0 m/s.

Untuk mendapatkan *initial condition* sebagai kondisi batas pada perancangan *slot furnace* dengan menggunakan burner, digunakan *report heat transfer* pada *header*. Dengan membagi besarnya *heat transfer* pada *header* dengan luas permukaan *header* diperoleh besarnya *heat flux*, yaitu :

**Tabel 4.1.** *Heat transfer* pada *header*

<b>Header -</b>	<b>Heat flux</b>
<i>Header</i> atas	- 104.649 W/m <sup>2</sup>
<i>Header</i> tengah	- 104.776 W/m <sup>2</sup>
<i>Header</i> bawah	- 105.190 W/m <sup>2</sup>

## 2. *Slot furnace* dengan menggunakan burner berbahan bakar LNG

Pada simulasi yang dilakukan, *header* sebisa mungkin pada kondisi *holding temperature*nya. Pada tabel 2.1 telah diketahui bahwa standard *holding temperature* pada material *carbon steel* antara 550-700°C. Akan tetapi sebaiknya *holding temperature* pada *header* dengan material *carbon steel* berkisar pada temperatur 600 °C atau di atasnya, dengan alasan untuk mendapatkan



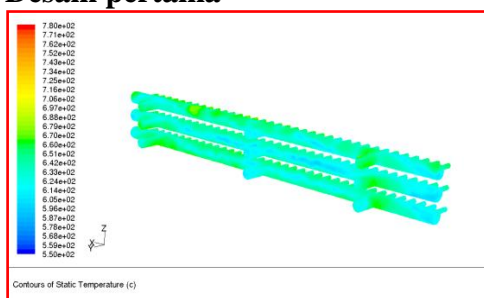
keuletan yang maksimum, semakin banyak tegangan sisa yang dilepaskan pada temperatur yang tinggi dan lebih menjamin terbentuknya struktur yang homogen dari material yang ditreatment (*header*).

Setelah perhitungan (iterasi) dilakukan dengan menggunakan kondisi batas pada tabel 4.1 ternyata terjadi suatu *error* yang tidak diperkirakan, sehingga menyebabkan temperatur *header* menjadi negatif. Oleh karena itu untuk menentukan kondisi batas pada *header* dibutuhkan suatu *trial and error*.

Setelah beberapa kali percobaan yang pernah dilakukan, ditemukan *heat flux* pada setiap *header*, yaitu sebesar  $-1000 \text{ W/m}^2$ .

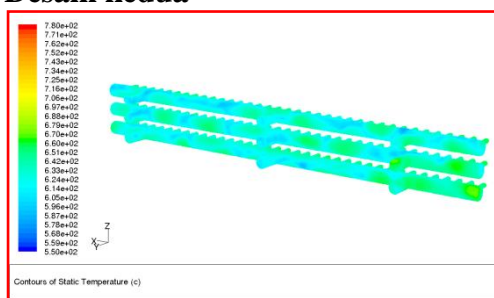
Distribusi temperatur *header* pada kondisi *holding temperature* adalah sebagai berikut.

#### - Desain pertama



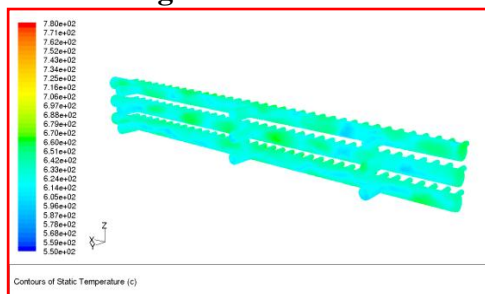
Gambar 4.5. Hasil PWHT header desain pertama

#### - Desain kedua



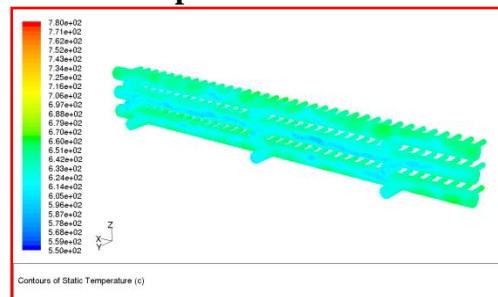
Gambar 4.6. Hasil PWHT header desain kedua

#### - Desain ketiga



Gambar 4.7. Hasil PWHT header desain ketiga

#### - Desain keempat



Gambar 4.8. Hasil PWHT header desain keempat

### Pemilihan Desain *Slot Furnace* Berdasarkan Keseragaman Temperatur

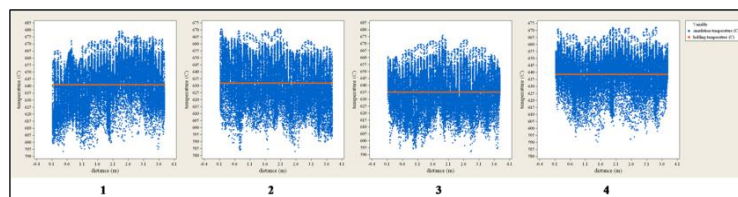
Pemilihan desain terbaik dari keempat model simulasi *furnace* didasarkan pada indikator keseragaman temperatur. Metode statistik yang dipergunakan untuk melakukan pemilihan tersebut adalah dengan menggunakan analisa statistik standar ukuran ketepatan. Terdapat beberapa ukuran ketepatan pemodelan yang dapat diaplikasikan untuk melakukan pemilihan, yang antara lain meliputi *mean absolute error* (MAE), *mean squared error* (MSE), *mean average percentage error* (MAPE), dan *standard deviation of error* (SDE). Pada permasalahan ini, seluruh desain diupayakan agar memiliki temperatur yang seragam (*uniform*) sesuai dengan karakteristiknya masing-masing. Temperatur yang seragam pada desain sama istilahnya dengan "*holding temperature*". *Holding temperature* inilah yang akan digunakan sebagai titik acuan penyimpangan temperatur yang terjadi.

Akibat setiap desain memiliki karakteristik yang berbeda, nilai *holding temperature* untuk keempat desain tersebut tentunya tidak dapat disamakan. Oleh sebab itu, *holding temperature* untuk masing-masing desain ditentukan oleh nilai rata-rata temperatur hasil simulasi.

**Tabel 4.2.** Nilai *holding temperature* untuk masing-masing desain

Desain	<i>Holding Temperature</i> (°C)
1	640,9637563
2	631,7953624
3	635,048017
4	638,6099895

Dengan demikian, rentang penyebaran titik-titik temperatur hasil simulasi terhadap *holding temperature* dapat diamati secara visual dengan melakukan pengeplotan titik-titik temperatur. Mengingat data hasil simulasi model bukanlah data deret berkala (*time series*), maka *plotting* data digambarkan dalam bentuk diagram pencar (*scatter*) antara temperatur terhadap jarak.



**Gambar 4.9.** Diagram pencar *holding temperature* dan temperatur hasil simulasi untuk keempat desain

Berdasarkan diagram-diagram pencar tersebut, terlihat jelas bahwa masing-masing desain membentuk pola sebaran temperatur hasil simulasi dan kesalahan yang berbeda-beda. Hal tersebut secara tidak langsung mengindikasikan besarnya peran konfigurasi burner pada *slot furnace* terhadap temperatur *headernya*. Hasil ukuran statistik standar yang diperoleh untuk keempat desain *furnace* berdasarkan indikator keseragaman temperatur *header* ditampilkan oleh tabel berikut.

**Tabel 4.3.** Nilai *error* untuk masing-masing

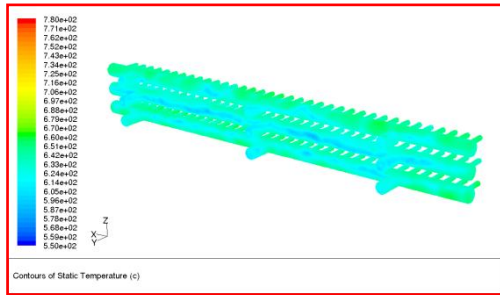
Desain	MAE	MAPE	SDE	MSE
4	8,4705236	1,3264001	10,747932	115,51485
3	9,1638988	1,4430246	11,645634	135,61704
2	10,528558	1,6664506	13,250347	175,56683
1	10,956345	1,7093549	13,600886	184,97899

Hasil tabel di atas menggambarkan bahwa desain yang memiliki tingkat keseragaman temperatur *header* dari yang paling *uniform* secara berurutan adalah desain keempat, ketiga, kedua dan desain pertama. Oleh sebab itu, desain *slot furnace* keempatlah yang terpilih untuk menuju tahapan simulasi berikutnya, yaitu pemodelan bahan bakar, karena memiliki tingkat keseragaman temperatur *header* yang lebih baik.

### Penurunan bahan bakar

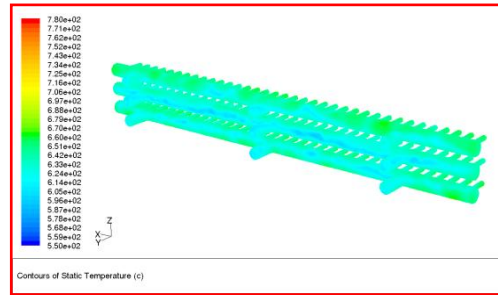
Pada tahap ini kapasitas burner pada desain ke-4 mengalami pengurangan dari kapasitas sebelumnya (380 kW). Tujuannya untuk mendapatkan kapasitas (bahan bakar) yang optimal untuk proses PWHT.

- **360 kW** (dikurangi 5,3% dari kapasitas semula)



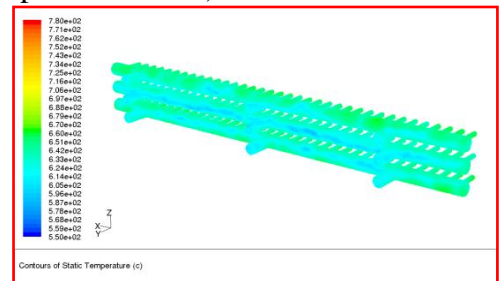
**Gambar 4.10.** PWHT header kapasitas 360 kW

- **350 kW** (dikurangi 7,9% dari kapasitas semula)



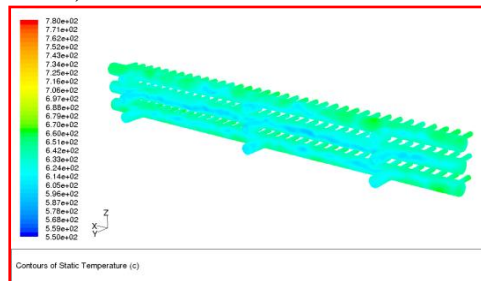
**Gambar 4.11.** PWHT header kapasitas 350 kW

- **340 kW** (dikurangi 10,52% dari kapasitas semula)



**Gambar 4.12.** PWHT header kapasitas 340 kW

- **330 kW** (dikurangi 13,2% dari kapasitas semula)



**Gambar 4.13.** PWHT header kapasitas 330 kW

### Penentuan kapasitas burner yang paling optimal berdasarkan keseragaman temperatur

Indikator yang dipergunakan untuk menentukan kapasitas burner yang paling optimal adalah keseragaman temperatur yang dapat dicapai oleh suatu desain, yang dalam hal ini adalah desain keempat. Pada tahapan ini, desain keempat menerima perlakuan dengan kapasitas yang berbeda, yakni 360 kW, 350 kW, 340 kW dan 330 kW. Ketidaksamaan perilaku terhadap kapasitas yang diberikan tentunya akan memberikan nilai rata-rata temperatur yang berbeda pula.

**Tabel 4.4.** Nilai *average temperature (holding temperature)* untuk masing-masing kapasitas

Kapasitas (kW)	Average Temperature (°C)
360	636,8566394
350	638,6792538
340	637,8969344
330	637,9278399

Nilai rata-rata tersebut akan dijadikan sebagai data standar pengukuran deviasi (penyimpangan) dari titik-titik temperatur mengingat setiap perlakuan memiliki kriteria tersendiri dan tidak terdapatnya acuan data yang dapat dipergunakan sebagai data standar.

**Tabel 4.5.** Hasil perhitungan statistik kesalahan untuk setiap kapasitas

kapasitas (kW)	SDE	MSE	SSE	MAE	MAPE
350	10,849508	117,70857	4253752,4	8,4227402	1,3187747
360	10,90686	118,95631	4298843,1	8,5440256	1,3415932
340	11,003756	121,0793	4375563,8	8,5036373	1,3330739
330	11,093058	123,05252	4446872,1	8,5143645	1,3346908

Berdasarkan perhitungan tersebut, dapat disimpulkan bahwa pada **kapasitas 350 kW** menghasilkan data temperatur yang relatif paling seragam dibandingkan dengan ketiga kapasitas yang lain karena memiliki nilai error yang paling kecil. Dengan demikian, kapasitas burner yang digunakan bisa dikatakan paling optimal.

### Penentuan kapasitas burner yang paling optimal berdasarkan efisiensi

Efisiensi merupakan suatu parameter yang penting dalam menentukan sejauh manakah keefisienan suatu peralatan terhadap jumlah bahan bakar yang digunakan. Dalam hal ini efisiensi dihitung berdasarkan jumlah energi yang digunakan dibandingkan dengan energi yang masuk ke dalam sistem (melalui burner). Dari *report* → *heat transfer* pada fluent, diperoleh besarnya energi panas yang masuk dan keluar sistem, begitu juga energi yang diserap oleh header (tabel 4.6 s/d 4.9).

**Tabel 4.6.** Kapasitas burner 360 kW

Bagian	Energi (watt)
Input	-31677,37
Output	38655,06
Header	-6977,578
Net Input Output	6977,686
<b>Efisiensi (%)</b>	<b>22,02735265</b>

**Tabel 4.7.** Kapasitas burner 350 kW

Bagian	Energi (watt)
Input	-30803,29
Output	37781,15
Header	-6977,578
Net Input Output	6977,858
<b>Efisiensi (%)</b>	<b>22,65296337</b>

**Tabel 4.8.** Kapasitas burner 340 kW

Bagian	Energi (watt)
Input	-29926,83
Output	36904,37
Header	-6977,578
Net Input Output	6977,54
<b>Efisiensi (%)</b>	<b>23,31533276</b>

**Tabel 4.9.** Kapasitas burner 330 kW

Bagian	Energi (watt)
Input	-29046,58
Output	36024,31
Header	-6977,578
Net Input Output	6977,73
<b>Efisiensi (%)</b>	<b>24,02255274</b>

Pada tabel 4.6 s/d 4.7 secara jelas terlihat bahwa pada kapasitas 330 kW memiliki nilai efisiensi yang paling besar diantara ketiga kapasitas yang lain. Sehingga dalam tahapan ini dapat disimpulkan bahwa, berdasarkan efisiensi termal diperoleh kapasitas burner yang paling optimal, yaitu **330 kW**.

## V. Kesimpulan

Dalam penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari keempat rancangan desain *slot furnace* berbahan bakar gas LNG, diperoleh desain *slot furnace* ke-4 yang memiliki konfigurasi burner lebih baik (ideal) dari pada ketiga jenis desain rancangan *slot furnace* yang lain.
2. Berdasarkan indikator keseragaman temperatur pada *header* diperoleh kapasitas burner yang optimal bagi desain *slot furnace* berbahan bakar gas LNG yaitu sebesar 350 kW.
3. Berdasarkan indikator efisiensi diperoleh kapasitas burner yang optimal bagi desain *slot furnace* berbahan bakar gas LNG yaitu sebesar 330 kW dengan efisiensi 24,023 %.

## Daftar Pustaka

1. Alberg, H., 2003, *Material Modelling for Simulation of Heat Treatment*, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Computer Aided Design, Lulea Tekniska Universitet, Trollhattan.
2. Alstom., 2009, *General Requirement of Post Weld Heat Treatment of HRSG*, Spec no HT005-01, Index 03-00-00-01.
3. Althouse, A.D., Turnquist, C.H., Bowditch, W.A., Bowditch, K.E., 1984, *Modern Welding Complete Coverage Of The Welding Field In One Easy To Use Volume*, The Goodheart-Willcox Company, Inc., South Holland, Illinois
4. Berglund, D., 2001, *Simulation of Welding and Stress Relief Heat Treating in the Development Aerospace Components*, Lulea Tekniska Universitet.
5. Borman, G.L., Kenneth W. Ragland, 1998, *Combustion Engineering*, Mc Graw-Hill, New York.
6. Cary, H.B., 1989, *Modern Welding Technology*, third edition, Englewood Cliffs, New Jersey.
7. Tuakia, Firman., 2008, *Dasar-dasar Menggunakan CFD*, Informatika, Bandung.
8. Wiryosumarto, Harsono., Okumura, Toshie., 2000, *Teknologi Pengelasan Logam*, Edisi Kedelapan, PT Pradnya Paramita, Jakarta.
9. Yang, Y., Reinier, A., and Reuter, M.A., 2005, *Use of CFD to Predict the Performance of a Heat Treatment Furnace*, *Fourth International Conference on CFD in the Oil and Gas, Metallurgical & Process Industries SINTEF /NTNU Trondheim*, Norway.
10. Malfa, E., Fantuzzi, M., and Scotti, M., 2008, *Revamping of the Austenitizing Furnace at Tenaris Dalmine*, MPT International.