

# STUDI KOMPARASI DISTRIBUSI TEMPERATUR DALAM KOORDINAT SILINDRIS PADA PENDINGINAN TRANSIEN

Liem, Hengky Ady W.<sup>1)</sup> Dr. Ir. Ekadewi Anggraini Handoyo, M.Sc.<sup>2)</sup>

Program Studi Teknik Mesin Universitas Kristen Petra

Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236. Indonesia<sup>1)</sup>

Phone: 0062-31-8439040, Fax: 0062-31-8417658<sup>1)</sup>

E-mail : m24412028@john.petra.ac.id<sup>1)</sup> ekadewi@petra.ac.id<sup>2)</sup>

## ABSTRAK

*Distribusi temperatur dalam kasus perpindahan panas penting untuk diketahui, seperti pada kasus quenching pada material logam. Proses quenching dilakukan dalam batas temperatur tertentu, untuk mendapatkan hasil maksimal dari sifat material yang diinginkan. Hal ini dapat dilakukan dengan cara menganalisa distribusi temperatur pada material tersebut. Distribusi temperatur dapat dianalisa dengan metode persamaan analitis atau dengan metode simulasi numerik.*

*Dalam penelitian ini digunakan metode eksperimen sebagai acuan dari metode persamaan analitis, dan metode simulasi numerik. Kendala pada pengukuran material jenis logam yang sulit dalam peletakan thermocouple, maka digunakan material pengganti berupa air. Air dapat diperlakukan sebagai padatan jika efek natural konveksi dapat dihilangkan, maka ditambahkan agar-agar dengan kadar 1,5% dari massa total air. Larutan agar-agar dengan kadar 1,5% dari massa air, memiliki termal properti yang dapat dikatakan sama dengan air.*

*Hasil persamaan analitis mulai mengalami pendekatan hasil dengan hasil eksperimen pada waktu diatas 2160s, karena nilai Fourier number telah mencapai batas diatas 0,2. Hasil simulasi numerik dapat menggantikan metode eksperimen untuk kasus konduksi transien.*

*Kata kunci: perpindahan panas, konduksi transien, konveksi alami.*

## 1. Pendahuluan

Berbagai penelitian dalam perpindahan panas memiliki keterkaitan dengan temperatur pada benda yang dikerjakan, seperti pada kasus efek dari temperatur quenching pada struktur dan sifat dari centrifugal casting HSS roll (Hanguan Fu, at al., 2009). Kedua contoh penelitian diatas menunjukkan perlunya distribusi temperatur dalam bahan, hal ini dilakukan dengan tujuan mengetahui perubahan temperatur pada benda seturut fungsi waktu. Kontrol temperatur yang baik dapat mengurangi kegagalan pengerjaan dalam proses heat treatment, dan dapat memberikan hasil temperatur yang sesuai berdasarkan tujuan awal.

Contoh kasus<sup>[2]</sup> yang memerlukan kepresisian pada temperatur benda yang mengalami proses quenching pada bahan centrifugal casting HSS roll. Dalam kasus ini logam dengan bahan centrifugal casting HSS roll akan mengalami peningkatan pada properti tensile strength dan impact toughness dari temperatur 980°C hingga 1040°C. Dengan meningkatnya properti tensile strength akan menghasilkan material dengan ketahanan terhadap patahan akibat tegangan, sedangkan peningkatan properti impact toughness agar kemampuan penyerapan energi lebih besar, hingga mencapai titik perubahan.

bentuk permanen. Setelah temperatur bahan diatas 1040°C tidak akan mengalami perubahan pada

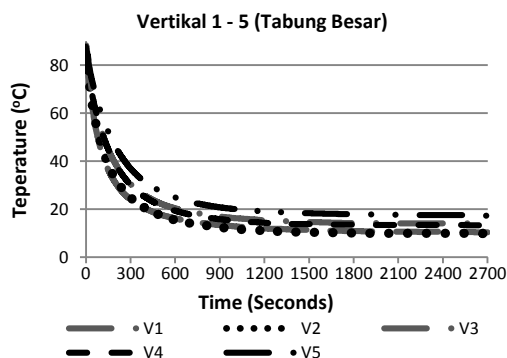
properti tersebut secara signifikan. Dalam sampel percobaan digunakan bahan yang sama dengan dimensi diameter 15 mm dan panjang 150 mm untuk sampel untuk tensile specimen, sedangkan untuk dimensi sampel impact specimen adalah 10 mm x 10 mm x 55 mm (tanpa notch). Jarak temperatur quenching 980°C hingga 1070°C dan di diamkan selama 1,5 jam dan quenching dilakukan di dalam larutan sodium silicate dengan cooling rate 27°C/sec. Dalam kasus tersebut dibutuhkan penelitian yang dapat menghasilkan prediksi waktu pengerjaan quenching dari awal temperatur hingga temperatur yang sesuai kebutuhan, agar memberikan nilai properti sesuai keinginan dan menghindari biaya berlebih yang tidak dibutuhkan.

Mengingat pentingnya distribusi temperatur dalam suatu bahan, maka pada TA ini akan diteliti distribusi temperatur dalam sebuah material yang mengalami proses perpindahan panas. Untuk mendapatkan distribusi temperatur ada 3 metode yaitu eksperimen, Persamaan analitis, dan simulasi numerik. Nilai hasil eksperimen sebagai acuan untuk Persamaan analitis dan simulasi numerik.

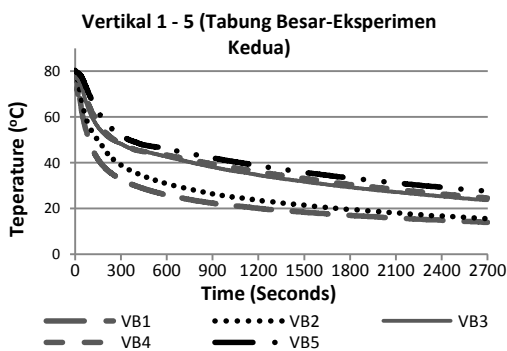
## 2. Metode Penelitian

Dalam penelitian dilakukan tiga metode untuk analisa distribusi temperatur pada material (larutan agar-agar 1,5%). Larutan dengan kadar agar-agar 1,5% dipilih karena larutan dapat menghilangkan efek

natural konveksi saat proses pendinginan dan nilai termal properti dapat dikatakan sama dengan termal properti pada air<sup>[3]</sup>. Hasil pengukuran pada larutan agar-agar dengan kadar 1,5% yang dibandingkan dengan hasil pengukuran pada air merupakan bukti larutan agar-agar dengan kadar 1,5% dapat menghilangkan efek natural konveksi. Temperatur air mengalami *steady state* saat waktu diatas 900s, sedangkan pada agar-agar masih mengalami penurunan tempeatur yang cukup signifikan (dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2). Penelitian dilakukan dengan tiga metode metode tersebut adalah, metode eksperimen, metode persamaan analitis, dan metode simulasi numerik.



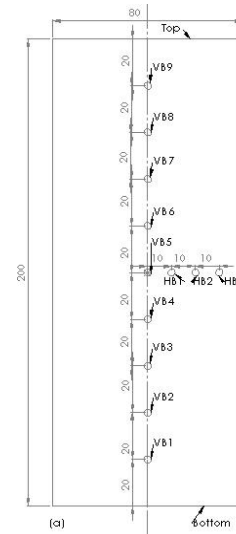
Gambar 2.1 Grafik fungsi temperatur air terhadap waktu pada titik V1-V5.



Gambar 2.2 Grafik fungsi temperatur terhadap waktu dalam tabung beasar pada titik VB1 – VB5

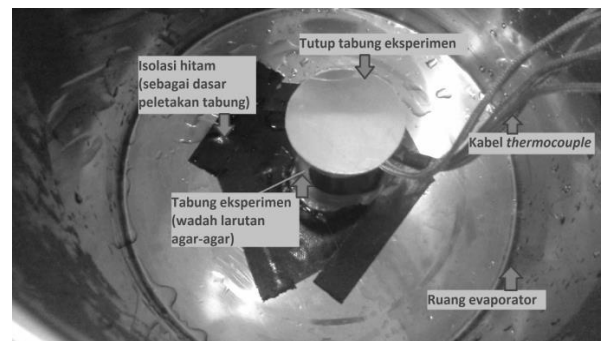
## 2.1. Metode Pertama (Eksperimen)

Metode eksperimen merupakan metode yang mengukur data temperatur agar-agar dengan *thermocouple*, pengambilan data pada agar-agar dilakukan pada 9 titik arah aksial dan 3 titik arah radial seperti pada Gambar 2.3. Pengambilan temperatur juga dilakukan pada bagian permukaan dinding luar tabung (wadah agar-agar) dan pada ambien (air). Pendinginan dilakukan dari temperatur 90°C hingga temperatur 20°C, dengan rata-rata temperatur ambien 14,7°C.



Gambar 2.3 Skema titik-titik pengambilan data temperatur.

Pengambilan data temperatur dilakukan dengan interval waktu 60s untuk setiap data. Larutan agar-agar dituangkan pada tabung *aluminum* dengan dimensi; diameter 80mm, tinggi 200mm, dan ketebalan 1mm. Tabung *aluminum* dipasang pada dasar ruang evaporator menggunakan lem tembak, dan isolasi hitam sebagai alas lem tembak (seperti pada Gambar 2.4). Bagian tutup atas tabung diberikan lapisan busa dengan ketebalan 3mm, lapisan busa digunakan sebagai isolator. Bagian atas tabung diberikan perlakuan insulasi.



Gambar 2.4 Rangkaian tabung eksperimen dalam ruang evaporator.

## 2.2. Metode Kedua (Persamaan Analitis)

Metode persamaan analitis menggunakan persamaan konduksi transien untuk menghitung nilai temperatur terhadap fungsi waktu dan posisi (arah aksial dan arah radial). Nilai temperatur dinding dan nilai temperatur pada ambien (air) dapat dihitung untuk menentukan temperatur lapisan permukaan benda ( $T_{film}$ ), nilai ini digunakan untuk menentukan termal properti pada air (sebagai ambien). Nilai termal properti yang dihitung dapat digunakan untuk menghitung nilai *Grashoff number*, *Rayleigh number*,

*Nusselt number*, koefisien konveksi, dan *Biot number*. Persamaan *Nusselt number* yang digunakan untuk vertikal silinder dapat menggunakan persamaan *Nusselt number* dari vertikal datar<sup>[1]</sup> (persamaan 2.1), dengan ketentuan diameter silinder berada dibawah nilai kriteria silindris (seperti pada Persamaan 2.2).

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.1)$$

Berikut persamaan untuk kriteria silindris:

$$D \geq \frac{35 \cdot L}{Gr_L^{1/4}} \quad (2.2)$$

Diameter silinder yang tidak memenuhi kriteria silindris dapat menggunakan Persamaan 2.3 untuk menentukan *Nusselt number* pada vertikal datar, dengan ketentuan nilai  $Ra \leq 10^9$ . Persamaan ini dikutip dari jurnal *Popiel C.O.*<sup>[4]</sup>. Persamaan 2.4 digunakan untuk menghitung perbandingan nilai *Nusselt number* vertikal silinder dengan nilai *Nusselt number* vertikal datar.

$$Nu_{H-FP} = 0,68 + \frac{0,67 \cdot Ra_H^{0,25}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (2.3)$$

$$Nu_H/Nu_{H-FP} = 1 + B \cdot [32^{0,5} \cdot (Gr_H)^{-0,25} \cdot \frac{H}{D}]^C \quad (2.4)$$

Dimana:

$$B = 0,0571322 + 0,20305 \cdot Pr^{-0,43}$$

$$C = 0,9165 - 0,0043 \cdot Pr^{0,5} + 0,01333 \ln Pr + 0,0004809 / Pr$$

Persamaan 2.3 digunakan pada daerah *laminar boundary layer*, dengan batas atas *Grashoff number*  $Gr_{H-cr} \leq 4 \cdot 10^9$  dan batas bawah  $Ra_H \geq 10^4$ .

Dengan nilai *Nusselt number* yang ada, maka dapat menghitung nilai koefisien konveksi dan *Biot number*. Perhitungan nilai *dimensionless temperature* menggunakan metode multi dimensi, yang menggabungkan penyelesaian *infinite cylinder* dengan penyelesaian *plane wall*. Penyelesaian pada *infinite cylinder* memiliki batas minimal nilai *Fourier number* sebesar 0,2, dengan menggunakan Persamaan 2.5.

$$\theta^* = C_1 \exp(-\zeta_1^2 \cdot Fo) \cos(\zeta_1(r^*)) \quad (2.5)$$

Sedangkan pada penyelesaian *plane wall* jika nilai *Fourier number* berada dibawah 0,2, dapat menggunakan Persamaan 2.6. Nilai *eigenvalues* dapat dilihat pada *text book Incropera appendix B.3*<sup>[1]</sup>.

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\zeta_n^2 \cdot Fo) \cdot \cos(\zeta_n(L^*)) \quad (2.6)$$

Dimana:

$$C_n = \frac{4 \cdot \sin(\zeta_n)}{2 \cdot \zeta_n + \sin(2 \cdot \zeta_n)}$$

Nilai *dimensionless temperature* dari *infinite cylinder* dan *plane wall* dikalikan, sebagai penyelesaian multi dimensi. Nilai *dimensionless temperature* pada setiap titik koordinat dapat dihitung menjadi nilai temperatur yang sesuai dengan fungsi waktu dan posisi.

### 2.3. Metode Ketiga (Simulasi Numerik)

Metode simulasi numerik menggunakan *software Gambit-ANSYS* sebagai *mesh generator*, dan *software Fluent-ANSYS* sebagai perangkat simulasi. Geometri tabung, menggunakan tipe *meshing* berupa *quad map* dengan *interval size* 5mm, yang menghasilkan kualitas *meshing* 0,414813. Kualitas *meshing* tersebut berada pada batas ( $n \leq 0,5$ ) untuk dapat dikatakan kualitas *mesh* baik.

Selanjutnya penentuan *zone* pada geometri. *Zone* terbagi menjadi dua; *specify boundary types* dan *specify continuum types*. Pada *specify boundary types* tabung pilih permukaan atas, bawah dan selimut tabung (secara terpisah) sebagai *wall*. Selanjutnya Pada *specify continuum types* pilih volume tabung sebagai *solid*. Simpan hasil *meshing* dalam format (.msh), dengan menggunakan pilihan *export-mesh*.

Melalui *software Fluent* dimulai langkah simulasi. Melalui *software fluent* pilih *read* → *case* hasil *meshing*. Pilih jenis *solver* pada *density-base* maupun *pressure-base* dan *time* pada *unsteady*. Pemilihan *solver* dapat dipilih keduanya dikarenakan dalam kasus ini merupakan satu fase. Sedangkan pemilihan *time transient*, dikarenakan dalam kasus ini benda mengalami perubahan temperatur terjadi terhadap perubahan waktu.

*Input* nilai termal properti pada material. Material yang digunakan dalam simulasi dipakai dua jenis material; air (*liquid*) dan agar-agar 1,5% (*solid*). Material yang dipilih memiliki nilai termal properti secara otomatis (*default*), namun kita ganti dengan data termal properti yang telah dihitung pada metode Persamaan analitis. Beberapa nilai termal properti juga dapat diatur berdasarkan batas atas dan batas bawah, seperti yang terjadi pada eksperimen. Salah satu termal properti yang berubah terhadap waktu adalah *thermal capacity* pada agar-agar 1,5%. Properti yang dimiliki agar-agar 1,5% diasumsikan sama dengan properti air jenuh, karena masih memiliki sifat yang sama dengan air<sup>[2]</sup>.

Selanjutnya penentuan perlakuan pada *boundary conditions*. Pada sisi atas tabung diberi perlakuan terisolasi, dimana akan diberikan nilai *heat flux* 0 W/m<sup>2</sup>. Sedangkan pada sisi bawah akan diberikan temperatur 2°C. Dan pada sisi selimut tabung diberikan perpindahan panas secara konveksi, dengan input rata-rata nilai koefisien konveksi dan rata-rata nilai temperatur ambien dari perhitungan dalam metode Persamaan analitis. Penambahan titik-titik pada geometri diperlukan, untuk mengambil hasil simulasi pada titik-titik temperatur yang spesifik. Titik-titik temperatur pada arah vertikal berada pada sumbu (z),

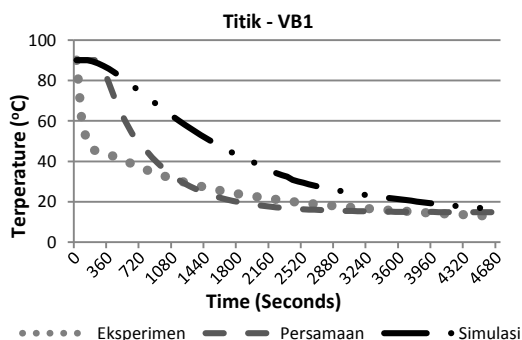
dan arah radial berada pada sumbu (x). Untuk menampilkan kontur temperatur pada perpotongan tabung, maka ditambahkan plane pada sumbu (x,z).

Selanjutnya input nilai temperatur inisial 90°C pada *all-zone*. Simulasi dijalankan dengan *max iterations per time step* sebanyak 20, karena dengan nilai ini sudah cukup untuk mendapatkan nilai yang telah konvergen. Hasil yang telah konvergen dapat dilihat pada kolom *log* dengan keterangan '*solution is converge*'. Waktu pada simulasi ditentukan melalui nilai perkalian dari *time step size* dengan *number of time steps*. Hasil simulasi didapat dengan *write to file* pada opsi *xy plot*. Nilai temperatur dengan fungsi waktu dipindahkan dari *file note* (data dari *Fluent*) pada *excel*.

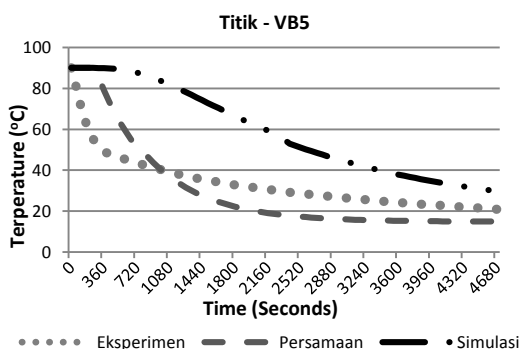
Dari hasil metode Persamaan analitis, eksperimen dan simulasi numerik, disatukan dalam satu diagram sehingga dapat dibandingkan. Setiap diagram berisi satu titik distribusi temperatur. Maka kesimpulan ditarik dari diagram.

### 3. Hasil dan Pembahasan

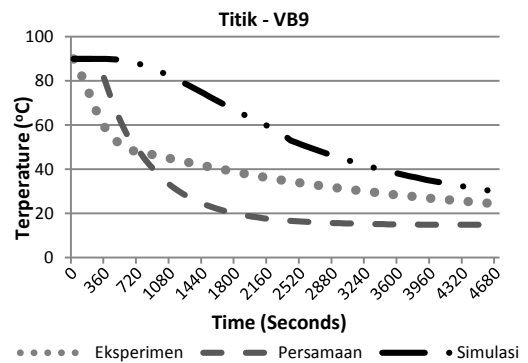
Hasil dari Ketiga metode disatukan dalam grafik, seperti pada Gambar 3.1, Gambar 3.1, Gambar 3.3 dan Gambar 3.4.



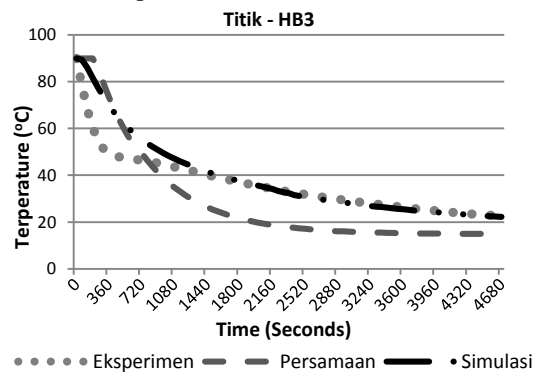
Gambar 3.1 Grafik perbandingan hasil ketiga metode, pada titik – VB1.



Gambar 3.2 Grafik perbandingan hasil ketiga metode, pada titik – VB5.



Gambar 3.3 Grafik perbandingan hasil ketiga metode, pada titik – VB9.



Gambar 3.4 Grafik perbandingan hasil ketiga metode, pada titik – HB3.

Pada Gambar 3.4 hasil simulasi agar-agar mendekati hasil eksperimen pada waktu diatas 1290s. Hal ini disebabkan pada titik-HB3 mengalami perubahan fase cair (larutan) menjadi padatan (gel) yang paling cepat. Sedangkan pada waktu dibawah 1290s terdapat perbedaan dari hasil eksperimen dan hasil simulasi dikarenakan larutan pada eksperimen belum mengalami proses *gelling* (yang menghasilkan gel sebagai padatan sempurna).

Sedangkan pada arah vertikal titik-VB1 pada Gambar 3.1 merupakan titik yang paling cepat mengalami penurunan temperatur jika dibandingkan dengan titik-VB5 pada Gambar 3.2 dan titik-VB9 pada Gambar 3.3. Pada titik-VB1 ini juga lebih cepat mengalami penurunan temperatur jika dibandingkan dengan titik-HB3. Titik-VB1 juga merupakan titik yang menunjukkan hasil paling memiliki selisih antara hasil simulasi dan eksperimen yang sedikit (jika dibandingkan dengan titik-VB5 dan titik-VB9).

### 4. Kesimpulan

Hasil perbandingan data temperatur pada pendinginan air terhadap data temperatur pendinginan larutan agar-agar 1,5% merupakan bukti bahwa kadar agar-agar 1,5% dapat menghilangkan efek natural konveksi.

Hasil perbandingan antara metode eksperimen, metode Persamaan analitis dan metode simulasi numerik menunjukkan pada titik-H3 merupakan titik

yang memiliki selisih hasil eksperimen dengan hasil simulasi yang paling sedikit. Fase gel yang terbentuk membuat perpindahan panas yang terjadi menjadi berupa konduksi murni (menghilangkan efek natural konveksi). Demikian juga perpindahan panas yang terjadi dalam simulasi numerik merupakan konduksi murni.

Hasil perbandingan dari seluruh titik, memiliki kesamaan hasil Persamaan analitis dengan hasil eksperimen mulai mengalami pendekatan pada waktu diatas 2160s. Hal ini disebabkan nilai *Fourier number* pada silinder mencapai batas 0,2. Nilai *Fourier number* 0,2 merupakan batas minimal untuk menggunakan Persamaan pendekatan dalam mencari nilai *dimensionless temperature* pada silinder.

Eksperimen pada tabung kecil dilakukan dengan tujuan untuk merubah variable dari arah aksial dan radial distribusi temperatur. Pada eksperimen ini titik-VB1 dan titik-VB2 memiliki hasil yang hampir sama, hal ini dikarenakan kedua titik tersebut berada pada posisi tidak jauh dari dinding mesin pending (dasar panci). Sedangkan titik-VB3 hingga titik-VB5 memiliki sedikit perbedaan dari titik-VB2 dibandingkan dengan distribusi temperatur pada tabung besar.

#### Daftar Pustaka:

1. Incropera Frank P., Dewitt David P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7<sup>th</sup> Edition. John Willey & Sons, Inc.
2. Hangan Fu, Xiaole Cheng, Zhongze Du, at al. (2009). *Effect of Quenching Temperature on Structure and Properties of Centrifugal Casting High Speed Steel Roll*. China Foundry. TG249.4/TG142.1.
3. Erdogdu F., Uyar R., Palazoglu T.K. (2008). *Experimental Comparison of Natural Convection and Conduction Heat Transfer*. Departement of Food Engineering (Gida Muh. Bol.), University of Mersin. DOI: 10.1111/j.1745-4530.2008.00309.x.
4. Popiel C.O., Wojtkowiak J., at al. (2007). *Laminar Free Convective Heat Transfer from Isothermal Vertical Slender Cylinder*. Institute of Environmental Engineering, Ponzan University of Technology. doi:10.1016/j.expthermflusci.2007.07.003. July, 2007.