

OPTIMASI INSULASI PADA PIPA *OUTLET START UP BLOWER* MENUJU *INLET GAS COMBUSTOR*

Faisal Tsani Saputra^{1*}, Adi Wirawan Husodo², Lely Pramesti³

Program Studi D-IV Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia^{1,2}

Program Studi D-IV Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia³

Email: faisaltsani16@student.ppns.ac.id^{1*}; adi_wirawan@ppns.ac.id²; lelypramesti@ppns.ac.id³;

Abstract – The construction project of PLTSa Putri Cempo Surakarta, was built to reduce the amount of waste by converting it into electrical energy. There is a line design at PLTSa Putri Cempo using insulation to maintain temperature. The 16" diameter PG-400-SSH-1250 line that reaches a temperature of 300°C with a pressure of 800 mmWC is connected from the outlet of the start up blower to the combustor gas inlet. The temperature that must be reached by the combustor is 350 ° C, therefore insulation optimization needs to be done to get the smallest heat loss value so that the temperature is reached faster, so that the producer gas cleaning process can be processed faster. Optimal insulation selection is carried out based on the lowest heat loss value and downstream temperature ratio using manual calculations and with the help of finite element method software and the total cost incurred is affordable. Based on the calculation of nine variations, 100 mm thick rockwool material was selected. The heat loss value for the material is 14880.058 Watt and the downstream temperature ratio is 5.782%. From an economical point of view, this material is quite affordable with a total cost of Rp 17,375,250.

Keyword: Downstream Temperature, Economical, Finite Element Method, Head Loss, Insulation

Nomenclature

Q	Laju Perpindahan Panas (W)
OD	Outside Diameter (m)
ID	Inside Diameter (m)
K	Konduktivitas Thermal (W/m.K)
R	Jari-jari silinder (m)
L	Panjang Pipa (m)
Cp	Heat Capacity (J/kg.K)
β	Expansion Thermal (K-1)
μ	Viskositas Fluida (kg/m.s)
V	Kecepatan aliran fluida (m/s)
Tu	Temperatur Lingkungan (K)
Ta	Temperatur Fluida (K)
g	Percepatan Gravitasi (m/s ²)
ρ	Massa Jenis Fluida (kg/m ³)
v	Kinematik Viscosity (m ² /s)

1. PENDAHULUAN

PT Solo Citra Metro Plasma Power (PT SCMP) merupakan perusahaan yang mengelola pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Putri Cempo. PLTSa Putri Cempo merupakan proyek pengembangan pembangkit listrik berbasis sampah di Kota Surakarta. Tujuan pembangunan proyek ini adalah sebagai fasilitas untuk mengurangi jumlah sampah yang berada pada TPA Surakarta dan juga

ketebalan insulasi terhadap jalur perpipaan pada

start up blower menuju *combustor* dengan variasi material dan ketebalan insulasi yang berbeda-beda menggunakan perhitungan manual dan dengan bantuan *software*. *Software finite*

untuk memanfaatkan sampah dengan mengubah menjadi energi listrik.

Terdapat desain *line* pada PLTSa Putri Cempo menggunakan insulasi untuk mempertahankan temperature. *Line* PG-400-SSH-1250 berdiameter 16" yang mencapai temperature 300°C dengan tekanan 800 mmWC terhubung dari *outlet start up blower* menuju *inlet gas combustor* dan memiliki panjang lebih dari 33 meter.

Temperatur yang harus dicapai oleh *Combustor* adalah 350°C, oleh karena itu pengoptimalan insulasi perlu dilakukan untuk mendapatkan nilai *heat loss* yang paling kecil. Apabila temperatur sudah mencapai 350°C sistem aliran gas menuju *combustor* akan dialihkan ke proses *producer gas cleaning*. Perlu dilakukan analisa mengenai material insulasi yang optimal untuk digunakan pada *line* tersebut untuk mengurangi *heat loss*, sehingga proses *producer gas cleaning* bisa lebih cepat diproses. Menambahkan insulasi untuk konservasi energi dalam sistem pipa tidak hanya mengurangi kehilangan transmisi panas tetapi juga mengurangi produk pencemarnya. Penggunaan insulasi termal adalah salah satu metode konservasi energi dan perlindungan lingkungan yang paling efektif pada bangunan dan pipa [1].

Pada penelitian ini, dilakukan analisa perpindahan panas mengenai material dan

element method merupakan *software* yang berisi kemampuan pemodelan fisik yang luas untuk memodelkan aliran, turbulensi, perpindahan panas, dan reaksi dalam aplikasi industri [2].

Dalam penelitian ini akan didapatkan hasil analisa material dan ketebalan insulasi yang optimal digunakan pada *line* tersebut. Hasil dari tugas akhir ini diharapkan dapat digunakan sebagai rekomendasi penyelesaian pada jalur perpipaan tersebut untuk perusahaan.

2. METODOLOGI

2.1 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan insulasi yang optimal dari segi teknis dan ekonomis dengan biaya yang lebih kecil. Untuk mendapatkan insulasi yang optimal dilakukan perhitungan manual *heat loss* akibat perpindahan panas konduksi, konveksi dan perhitungan *downstream temperature* pada pipa *line number* PG-400-SSH-1250 menggunakan variasi insulasi berdasarkan buku referensi dan juga dilakukan perhitungan menggunakan *software finite element method*. Kemudian melakukan analisa ekonomis terhadap semua variasi insulasi. Pemilihan insulasi yang optimal berdasarkan analisa perpindahan panas yakni nilai *heat loss* dan *downstream temperature* yang paling kecil. Serta insulasi yang terpilih lebih terjangkau dari segi biaya material dan pemasangan.

2.2 Perpindahan Panas

2.2.1 Perpindahan Panas Konveksi

Pada penelitian ini perpindahan panas konveksi terbagi menjadi dua yakni *internal convection* dan *external convection* [3].

Perhitungan *internal convection* dimulai dari menentukan *reynold number* fluida dan *prandtl number* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_e \text{ fluida} = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad (1)$$

$$P_r \text{ fluida} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2)$$

Pada *internal convection* menghitung *Nusselt number* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$N_u = 0,023 R_e^{0,8} P_r^n \quad (3)$$

Sedangkan *external convection* adalah konveksi yang terjadi antara diameter luar permukaan pipa dengan lingkungan sekitar. Menggunakan persamaan [3] untuk mencari *Nusselt number* sebagai berikut:

$$N_{u_D} = \left\{ 0,60 + \frac{0,378 R_a \frac{1}{D}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{1}{4}}} \right\}^2 \quad (4)$$

Untuk mencari *Rad* menggunakan persamaan berikut:

$$Rad = Gr Pr \quad (5)$$

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (6)$$

Untuk mendapat nilai *Expansion Thermal* dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\beta = \frac{1}{\left(\frac{T_a - T_u}{2} \right)} \quad (7)$$

Mencari koefisien konveksi baik *internal* dan *external* menggunakan persamaan seperti berikut:

$$N_u = \frac{hD}{K} \quad (8)$$

2.2.2 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas konduksi adalah perpindahan energi dari partikel yang memiliki energi lebih tinggi menuju partikel didekatnya yang memiliki energi lebih sedikit [4]. Pada proses konduksi diperlukan konduktivitas *thermal*. Konduktivitas *thermal* merupakan *transport properties* yang dimiliki oleh material medium proses perpindahan panas.

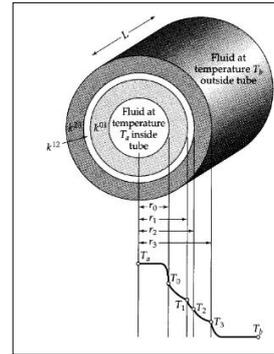
2.3 Analisis Kehilangan Panas (*Heat Loss*)

Untuk mendapatkan nilai *heat loss* harus mendapatkan nilai *thermal resistance* total terlebih dahulu. Untuk perpindahan panas konveksi menggunakan persamaan (9) dan konduksi menggunakan persamaan (10).

$$R_{conv} = \frac{1}{h_1 A_1} \quad (9)$$

$$R_{cond} = \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi L k} \quad (10)$$

Pada perpindahan panas yang terjadi pada *Multiple layer cylinder* merupakan perpindahan panas yang disertai dengan penambahan tebal insulasi pada benda silinder [5]. Konsep perhitungan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Thermal Multiple Layer Cylinder

$$R \text{ total} = R_{conv.1} + R_{cond.1} + R_{cond.2} + R_{conv.2} \quad (11)$$

Mencari nilai *heat loss* menggunakan persamaan dibawah ini *Multiple layer cylinder*

$$Q = \frac{2\pi L(T_a - T_u)}{R_{total}} \quad (12)$$

2.4 Downstream Temperature

Perhitungan *downstream temperature* dilakukan untuk mengetahui nilai perubahan suhu dari ujung *inlet* sampai ujung *outlet* pipa.

$$T_2 = T_1 - \frac{Q_{total}}{m C_p} \quad (13)$$

2.5 Pemodelan Software Finite Element Method

Software yang digunakan pada penelitian ini adalah *software finite element method* yang merupakan *software* yang berisi kemampuan pemodelan fisik yang luas untuk memodelkan aliran, turbulensi, perpindahan panas, dan reaksi dalam aplikasi industri mulai dari aliran udara di atas sayap pesawat terbang hingga pembakaran dalam ruang bakar, dari kolom gelembung hingga

platform minyak, manufaktur semikonduktor, dan perancangan penanganan air [2].

2.6 Analisa Ekonomis

Analisa ekonomis pada suatu kegiatan proyek merupakan suatu kajian secara ekonomi apakah suatu ide, sasaran, atau rencana suatu proyek dapat dibuat dengan porsi yang layak secara ekonomi. Analisa ekonomis pada insulasi lebih memperhitungkan material insulasi mana yang harganya lebih murah antara material *rockwool*, *calcium silicate*, dan *fiber glass*. Sehingga pada pengoptimalisasian insulasi untuk desain *line* PG-400-SSH-1250 tidak mengeluarkan biaya besar. Pada penelitian ini analisa ekonomis dilakukan dengan perhitungan total akumulasi dari sisi biaya material insulasi, biaya pada saat konstruksi, dan lain sebagainya dari desain yang sudah ada.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perhitungan Koefisien Konveksi

3.1.1 Koefisien Konveksi Internal

Untuk mendapatkan nilai koefisien konveksi internal perlu dilakukan perhitungan *Reynold number*, *Prandtl number*, dan *Nusselt number* terlebih dahulu menggunakan Persamaan (1), (2), dan (3). Setelah dilakukan perhitungan parameter yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai koefisien konveksi *internal*, dilakukan perhitungan koefisien konveksi *internal* menggunakan Persamaan (8) dengan rincian seperti pada Tabel 1.

3.1.2 Koefisien Konveksi External

Pertama melakukan perhitungan koefisien ekspansi *thermal* menggunakan Persamaan (7). Dengan adanya penambahan variasi insulasi maka nilai *grashof number*, *Rayleigh number*, *Nusselt number*, dan koefisien konveksi *external* setiap variasi akan berbeda karena radius yang berbeda. Perhitungan *grashof number* dan *rayleigh number* menggunakan Persamaan (6) dan (5). Lalu menghitung *nusselt number* menggunakan Persamaan (4), serta untuk menghitung koefisien konveksi *external* menggunakan Persamaan (8), dan hasil perhitungan *external convection* tertera pada Tabel 2.

3.2 Perhitungan Heat Loss

Perhitungan *thermal resistance* pada penelitian ini sesuai dengan rangkaian *thermal* pada Gambar 1 dan menggunakan Persamaan (9) dan (10). Kemudian hambatan tersebut diakumulasikan sesuai dengan Persamaan (11). Untuk mendapatkan nilai *heat loss* pada setiap variasi menggunakan Persamaan (12). Hasil perhitungan untuk semua variasi terdapat pada Tabel 3.

Berdasarkan nilai *heat loss* pada Tabel 3, selanjutnya pada Gambar 2 menjelaskan tentang pengaruh ketebalan insulasi. Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa semakin tebal insulasi maka nilai *heat loss* semakin menurun. Perbedaan material

insulasi juga mempengaruhi nilai *heat loss*. Walaupun dengan ketebalan yang sama namun material berbeda cukup mempengaruhi.

Tabel 1. Perhitungan *Internal Convection*

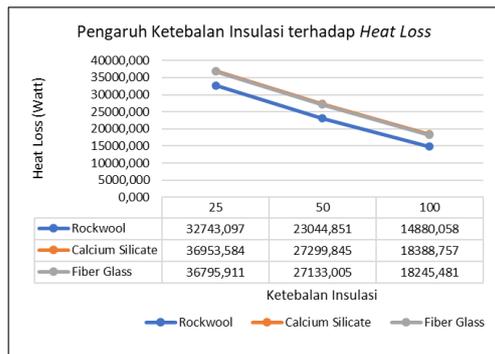
Parameter	Nilai	Units
<i>Reynold Number</i>	486823,028	-
<i>Prandtl Number</i>	0,052	-
<i>Nusselt Number</i>	250,593	-
<i>Internal Convection</i>	37,524	W/m ² -K

Tabel 2. Perhitungan *External Convection*

Variasi	Parameter	Units	Nilai
Pipa dengan Insulasi 25 mm	<i>Gr Number</i>	-	791746316,8
	<i>Pr Number</i>	-	0,7272
	<i>Rad Number</i>	-	575757921,6
	<i>Nu Number</i>	-	97,689
	<i>External Convection</i>	W/m ² -K	5,838
Pipa dengan Insulasi 50 mm	<i>Gr Number</i>	-	937524307,5
	<i>Pr Number</i>	-	0,7272
	<i>Rad Number</i>	-	681767676,4
	<i>Nu Number</i>	-	103,002
	<i>External Convection</i>	W/m ² -K	5,818
Pipa dengan Insulasi 100 mm	<i>Gr Number</i>	-	1280638991
	<i>Pr Number</i>	-	0,7272
	<i>Rad Number</i>	-	931280674,2
	<i>Nu Number</i>	-	113,603
	<i>External Convection</i>	W/m ² -K	5,783

Tabel 3. Hasil Perhitungan *Heat Loss*

Material Insulasi	Tebal	Parameter	Units	Nilai
<i>Rockwool</i>	25 mm	R total	m.K/W	1,762
		<i>Heat Loss</i>	W	32743,097
	50 mm	R total	m.K/W	2,503
		<i>Heat Loss</i>	W	23044,851
	100 mm	R total	m.K/W	3,877
		<i>Heat Loss</i>	W	14880,058
<i>Calcium Silicate</i>	25 mm	R total	m.K/W	1,561
		<i>Heat Loss</i>	W	36953,483
	50 mm	R total	m.K/W	2,113
		<i>Heat Loss</i>	W	27299,845
	100 mm	R total	m.K/W	3,137
		<i>Heat Loss</i>	W	18388,757
<i>Fiber Glass</i>	25 mm	R total	m.K/W	1,568
		<i>Heat Loss</i>	W	36795,911
	50 mm	R total	m.K/W	2,126
		<i>Heat Loss</i>	W	27133,005
	100 mm	R total	m.K/W	3,162
		<i>Heat Loss</i>	W	18245,481



Gambar 2. Pengaruh Ketebalan Insulasi terhadap Heat Loss

3.3 Perhitungan Downstream Temperature

Menggunakan Persamaan (13) hasil perhitungan downstream temperature pada keseluruhan variasi terdapat pada Tabel 4 yang menunjukkan hasil perhitungan downstream temperature ratio, rasio penurunan paling besar terjadi pada pipa yang menggunakan insulasi calcium silicate dengan tebal 25 mm sebesar 14,360%. Sedangkan rasio penurunan paling kecil terjadi pada pipa yang menggunakan insulasi rockwool dengan tebal 100 mm sebesar 5,782%.

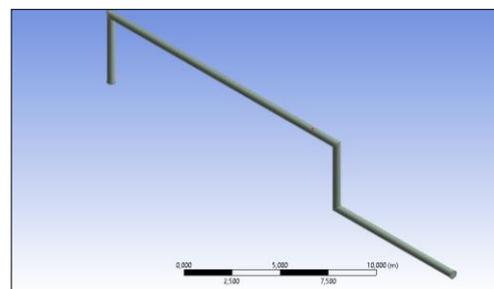
3.4 Pemodelan Sistem Perpipaan

Dengan menggunakan software finite element method dilakukan pemodelan dan analisa heat transfer jalur perpipaan. Gambar 3 menunjukkan pemodelan jalur perpipaan line number PG-400-SSH-1250. Pemodelan akan dilakukan pada keseluruhan pipa dengan variasi material dan insulasi yang digunakan. Pemodelan ditampilkan pada Gambar 3.

dengan rasio penurunan dari temperatur inlet sebesar 5,464 %.

3.7 Analisa Ekonomis Insulasi

Analisa ekonomis disini dilakukan untuk menentukan jenis dan tebal insulasi mana yang lebih murah dan optimal digunakan. Biaya yang dikeluarkan baik dari material hingga pemasangan. Berikut detail biaya insulasi pada Tabel 7. Dari Tabel 7 Tabel biaya setiap variasi insulasi diketahui bahwa ketebalan insulasi 25 mm total biaya yang paling murah adalah material rockwool yaitu sebesar Rp 6.437.730. Untuk ketebalan 50 mm dan 100 mm total biaya yang paling murah juga pada material rockwool yaitu sebesar Rp 10.192.050 dan Rp 17.375.250.



Gambar 3. Pemodelan Line PG-400-SSH-1250 dengan software finite element method

Tabel 4. Hasil Perhitungan Downstream Temperature

Material Insulasi	Tebal Insulasi (mm)	Downstream Temperature (K)	Rasio Penurunan (%)
Rockwool	25	500,091	12,724
	50	521,686	8,955
	100	539,867	5,782
Calcium Silicate	25	490,716	14,360
	50	512,212	10,609
	100	532,054	7,146
Fiber Glass	25	491,067	14,299
	50	512,583	10,544
	100	532,373	7,090

Tabel 5. Hasil Perhitungan Heat Loss Menggunakan Software

Material Insulasi	Tebal Insulasi (mm)	Heat Loss (W)
Rockwool	25	26984,002
	50	21548,490
	100	13800,990
Calcium Silicate	25	29590,676
	50	24580,148
	100	16609,666
Fiber Glass	25	29495,172
	50	24465,699
	100	16497,113

3.6 Downstream Temperature menggunakan software

Pada pemodelan menggunakan software dilakukan perhitungan downstream temperature dan hasil dari perhitungan software ditampilkan pada Tabel 6. Berdasarkan Tabel 6 hasil perhitungan penurunan temperatur, penurunan paling besar terjadi pada pipa yang menggunakan insulasi calcium silicate dengan tebal 25 mm sebesar 506 K. Sedangkan penurunan paling kecil terjadi pada pipa yang menggunakan insulasi rockwool dengan tebal 100 mm sebesar 541,693K

Tabel 6. Hasil Perhitungan *Downstream Temperature* menggunakan *software*

Material Insulasi	Tebal Insulasi (mm)	Downstream Temperature (K)	Rasio Penurunan (%)
Rockwool	25	512,047	10,638
	50	524,361	8,489
	100	541,693	5,464
Calcium Silicate	25	506,331	11,635
	50	517,481	9,689
	100	535,407	6,561
Fiber Glass	25	506,546	11,598
	50	517,739	9,644
	100	535,662	6,516

Tabel 7. Total Biaya Insulasi

Material Insulasi	Tebal Insulasi (mm)	Total Biaya
Rockwool	25	Rp 6.437.730
	50	Rp 10.192.050
	100	Rp 17.375.250
Calcium Silicate	25	Rp 13.568.520
	50	Rp 18.736.984
	100	Rp 30.307.760
Fiberglass	25	Rp 9.746.474
	50	Rp 14.226.960
	100	Rp 25.428.260

4. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan perpindahan panas dan analisa ekonomis insulasi yang lebih optimal pada *line* PG-400-SSH-1250 adalah insulasi material *rockwool* dengan ketebalan 100 mm. Dengan nilai *heat loss* dan *downstream temperature* yang paling kecil dibandingkan variasi yang lain. Serta dari segi biaya insulasi *rockwool* dengan tebal 100 mm lebih terjangkau dibandingkan dengan total biaya material *calcium silicate* dan *fiber glass* dengan ketebalan yang sama.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] Y. B., C. D. and A. K., “Determination of optimum insulation thickness for environmental impact reduction of pipe insulation,” *Applied Thermal Engineering*, 2016.

[2] A. A. Wibowo, “Optimasi Ketebalan Insulasi Multilayer Pada Offshore Pipeline untuk Mengurangi Tegangan Aksial,” *Conference on Piping Engineering and its Application*, vol. 4, 2019.

[3] F. P. Incropera and D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, U.S.A: John Wiley & Sons, Inc, 2002.

[4] G. E. Kusuma, *Desain Perpipaan Thermal Untuk Politeknik*, Surabaya: Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, 2019.

[5] R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 2022.