

STUDI PENURUNAN TEMPERATUR PADA ALIRAN AIR PANAS DI PIPA SILINDER HORIZONTAL DENGAN MENGGUNAKAN PERSAMAAN EMPIRIS DENGAN VERIFIKASI EKSPERIMEN

STUDY OF TEMPERATURE DECREASING IN HOT WATER FLOWS IN HORIZONTAL CYLINDER PIPE USING EMPIRICAL EQUATION WITH EXPERIMENTAL VERIFICATION

Arinta Rianti¹, Tri Ayodha Ajiwiguna, S.T., M.Eng.², M.Ramdlan Kirom, S.Si., M.Si.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom Bandung

¹arintarianti@student.telkomuniversity.ac.id, ²triayodha@telkomuniversity.ac.id, ³mramdlankirom@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Sistem perpipaan digunakan dalam dunia industri sebagai media pendistribusi fluida, fluida yang dialirkan memiliki temperatur tinggi dan pihak industri menginginkan temperatur fluida setelah dialirkan tetap terjaga dengan toleransi tertentu. Dalam proses pendistribusian, akan terjadi penurunan temperatur fluida yang disebut rugi kalor. Pada penelitian ini, dirancang suatu konfigurasi sistem perpipaan untuk mengalirkan air panas. Untuk meminimalisir rugi kalor pada air ke lingkungan digunakan metode insulasi termal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penurunan temperatur pada aliran air panas di pipa silinder horizontal. Penelitian ini dilakukan dengan 2 metode, yaitu perhitungan menggunakan persamaan empiris dan eksperimen. Persamaan empiris yang tersedia hanya dapat diterapkan untuk temperatur pipa yang konstan sehingga pada penelitian ini dibuat partisi di sepanjang pipa untuk mengetahui temperatur air di setiap partisinya agar diperoleh data penurunan temperatur disepanjang pipa. Pengambilan data eksperimen dilakukan dengan kondisi pipa uji dengan beberapa variasi ketebalan bahan insulasi termal *polyfoam* dan setiap variasi ketebalan insulasi diuji dengan tiga kondisi temperatur awal fluida. Hasil dari eksperimen akan diperoleh temperatur akhir air dan hasilnya akan dibandingkan dengan perhitungan menggunakan persamaan empiris. Dari perbandingan tersebut diperoleh nilai persentase error terbesar dan terkecil yang didapatkan adalah 94.3% dan 90.4%. Rata-rata persentase nilai error yang didapatkan adalah 92.2%.

Kata kunci : sistem perpipaan, rugi kalor, insulasi termal, *polyfoam*, persamaan empiris, metode eksperimen

Abstract

The piping system is used in the industrial world as a fluid distribution medium, the fluid that flows has a high temperature and the industry wants the fluid temperature after flow to be maintained with a certain tolerance. In the process of distribution, there will be a temperature decreasing in fluid called heat loss. In this study, designed a piping system configuration to stream the hot water. To minimize the heat loss in water to the environment is used thermal insulation method. This study aims to determine the decreasing temperature in fluid in the horizontal cylinder pipe. This study is done by two methods, that is calculation using empirical equation and experiment. Calculations with empirical equations can only be applied to constant pipe temperatures so that in this study made partitions along pipe to determine the temperature of water in each partition to obtain data of temperature drop along the pipeline. The experimental data retrieval was carried out under the condition of the pipe with some variation of thermal insulation thickness of polyfoam and each variation of insulation thickness was tested under three conditions of initial fluid temperature. The results of the experiment will be obtained by the final temperature of the water and the results will be compared with the calculations using the empirical equations. From the comparison, the biggest percentage value and the smallest obtained from this study is 94.3% and 90.4%. The average percentage of error value obtained is 92.2%.

Keywords : piping system, heat loss, thermal insulation, polyfoam, empirical equation, experimental method

1. Pendahuluan

Sistem perpipaan dapat ditemukan di hampir semua jenis industri. Perancangan sistem perpipaan sangatlah penting agar kegunaan pipa untuk mendistribusikan fluida menjadi efektif. Pada umumnya, fluida yang didistribusikan memiliki temperatur yang tinggi dan pihak industri tetap menginginkan temperatur fluida setelah

dialirkan tetap terjaga dengan toleransi yang telah ditentukan. Dalam proses pendistribusian fluida akan terjadi penurunan temperatur fluida yang diakibatkan oleh lingkungan luar yang disebut rugi kalor.

Rugi kalor disebabkan oleh adanya perpindahan kalor secara konduksi, konveksi, dan radiasi. Ketiga metode ini dapat terjadi pada pipa, dimana perpindahan kalor secara konduksi terjadi akibat adanya perbedaan temperatur antara permukaan dalam pipa dan permukaan luar pipa, perpindahan kalor secara konveksi terjadi antara fluida dengan pipa dan pipa dengan udara disekitarnya, dan perpindahan kalor secara radiasi terjadi antara pipa dengan lingkungan sekitarnya [1].

Untuk mengurangi rugi kalor pada pipa biasanya digunakan metode insulasi termal. Aliran kalor dapat dikendalikan dengan proses insulasi termal, tergantung pada jenis material yang dipergunakan [2]. Material dengan nilai konduktivitas termal rendah memiliki kemampuan untuk mengurangi terjadinya kehilangan kalor yang besar [3]. Oleh karena itu, demi menjaga temperatur fluida yang dialirkan, pihak industri menggunakan metode insulasi termal.

Dalam penelitian ini dirancang suatu konfigurasi sistem perpipaan untuk mengalirkan air panas. Untuk meminimalisir rugi kalor pada air ke lingkungan digunakan metode insulasi termal dengan variasi ketebalan tertentu. Bahan insulasi termal yang digunakan adalah *polyfoam*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penurunan temperatur pada aliran air panas di pipa silinder horizontal dengan menggunakan dua parameter pengukuran, yaitu variasi ketebalan insulasi dan temperatur awal fluida. Pada penelitian ini, untuk melihat penurunan temperatur pada air dalam pipa dilakukan dengan 2 metode. Metode pertama adalah perhitungan menggunakan persamaan-persamaan empiris dibantu oleh *RStudio* dan Microsoft Excel dalam melakukan perhitungan agar didapat grafik penurunan temperatur air dalam pipa. Pada metode pertama, persamaan empiris yang tersedia hanya dapat digunakan pada temperatur pipa yang konstan. Di sisi lain pada dasarnya saat fluida panas dialirkan pada pipa, temperaturnya akan berubah. Untuk itu pada penelitian ini akan dilakukan perhitungan dengan membuat partisi-partisi di sepanjang pipa untuk mengetahui temperatur air dalam pipa di setiap partisinya, agar diperoleh data penurunan temperatur disepanjang pipa. Metode kedua adalah metode eksperimen, yaitu pengambilan data secara langsung pada konfigurasi sistem perpipaan yang dibuat, dengan cara mengambil data penurunan temperatur. Selanjutnya akan diperoleh hasil pengukuran berdasarkan kedua metode yang akan dibandingkan.

2. Dasar Teori

2.1 Heat Transfer (Perpindahan Kalor)

Heat transfer (perpindahan kalor) adalah ilmu yang mempelajari perpindahan energi yang terjadi antara dua atau lebih material akibat adanya perbedaan temperatur. Ilmu tentang perpindahan kalor tidak hanya untuk mempelajari bagaimana energi atau temperatur berpindah diantara dua atau lebih material tetapi juga digunakan untuk mempelajari bagaimana pertukaran energi pada kondisi-kondisi tertentu [4]. Kalor dapat berpindah melalui tiga proses yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.2 Konduksi

Konduksi adalah perpindahan kalor yang terjadi ketika adanya pertukaran energi kinetik antar molekul (atom), dimana partikel yang memiliki energi lebih rendah dapat meningkat dengan menumbuk partikel yang memiliki energi yang lebih tinggi. Konduksi dapat terjadi pada benda padat, cair dan gas [5].

Persamaan laju perpindahan kalor konduksi biasa dikenal dengan Hukum Fourier, yaitu :

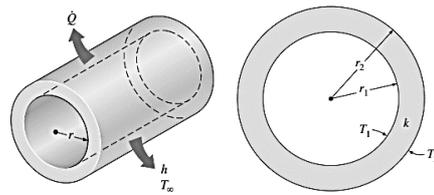
$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (2.1)$$

dengan,

k	= konduktifitas termal, W/m . K	T_1	= temperatur rendah, K
A	= luas permukaan, m ²	Δx	= tebal bahan, m
T_2	= temperatur tinggi, K		

2.2.1 Konduksi pada Silinder Berongga

Besarnya laju perpindahan kalor dengan cara konduksi melalui silinder panjang berongga, misalnya konduksi pada pipa atau isolasi pipa dapat dirumuskan dengan :



Gambar 2.1 Silinder Berongga [5]

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = 2\pi Lk \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)} \quad (W) \quad (2.2)$$

dimana besarnya tahanan termal yang terjadi adalah

$$R_{cyl} = \frac{T_1 - T_2}{\dot{Q}_{cond,cyl}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (2.3)$$

dengan,

r_1	= jari-jari dalam silinder, m	T_1	= temperatur permukaan dalam, K
r_2	= jari-jari luar silinder, m	T_2	= temperatur permukaan luar, K
L	= panjang silinder, m		

2.3 Konveksi

Konveksi adalah proses perpindahan energi antara permukaan padat dan fluida yang bergerak disekitar permukaan. Proses perpindahan energi secara konveksi melibatkan proses perpindahan kalor secara konduksi dan pergerakan fluida, semakin cepat pergerakan fluida maka semakin besar perpindahan kalor secara konveksi. Ketika tidak adanya pergerakan fluida, perpindahan kalor antara permukaan padat dan fluida menjadi konduksi murni. Konveksi dikelompokkan menjadi konveksi alami (*natural convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*) tergantung dari bagaimana cara fluida bergerak [5].

Laju perpindahan kalor untuk konveksi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (W) \quad (2.4)$$

dengan,

h	= koefisien perpindahan kalor konveksi, $W/m^2 \cdot K$	T_s	= temperatur permukaan benda, K
A_s	= luas permukaan, m^2	T_∞	= temperatur fluida di luar batas lapisan termal, K

Dimana koefisien perpindahan kalor konveksi h dapat dicari juga dengan menggunakan bilangan Nusselt (Nu) :

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (2.5)$$

dengan,

k	= konduktivitas termal fluida, $W/m \cdot K$
L_c	= panjang karakteristik, m

2.3.1 Konveksi Alami (Natural Convection)

Konveksi alami merupakan proses pertukaran kalor yang terjadi secara alami atau tidak adanya tenaga dari luar dan hanya melibatkan perbedaan temperatur. Gerakan fluida pada konveksi alami terjadi karena adanya gaya *buoyancy* (apung) yang dialaminya karena terdapat perbedaan rapat massa. Dalam mencari besarnya laju perpindahan kalor secara konveksi alami dibutuhkan Bilangan Grashof (Gr_L) yang menunjukkan rasio antara gaya *buoyancy* dengan viskositas kinematik yang besarnya ditunjukkan dengan persamaan :

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (2.6)$$

dengan,

g	= percepatan gravitasi, m/s^2
β	= koefisien ekspansi volume, $1/K$ ($\beta = 1/T$ untuk gas ideal)
T_s	= temperatur permukaan benda, K
T_∞	= temperatur fluida di luar batas lapisan termal, K
L_c	= panjang karakteristik bidang, m
ν	= viskositas kinematik fluida, m^2/s

Koefisien perpindahan kalor secara konveksi bebas rata-rata untuk berbagai situasi dinyatakan dalam bentuk :

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C(Gr_L Pr)^n = C Ra_L^n \quad (2.7)$$

dengan Ra_L adalah bilangan Rayleigh. Apabila $Ra_L > 10^9$ aliran adalah turbulen; $Ra_L < 10^9$ aliran adalah laminar [6].

2.3.2 Konveksi Alami pada Silinder Horizontal

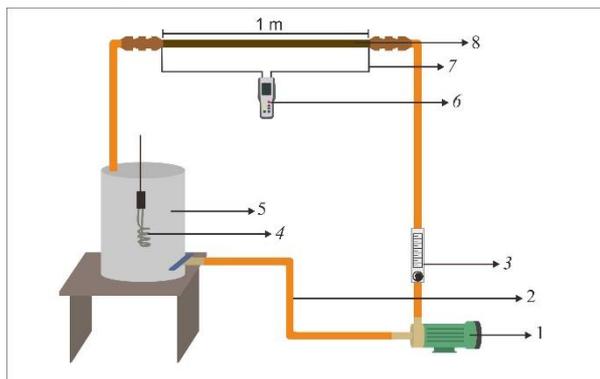
Perpindahan kalor secara konveksi alami pada silinder horizontal dimisalkan pada pipa yang diliari fluida bertemperatur tinggi. Bilangan Nusselt untuk konveksi alami pada silinder horizontal dirumuskan sebagai berikut :

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387Ra_D^{1/6}}{[1+(0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.8)$$

dengan panjang karakteristik L_c sama dengan D (diameter silinder).

3. Pembahasan

3.1 Skema Pengukuran Data



Keterangan :

1. Pompa air
2. Pipa rifeng
3. *Flowmeter*
4. *Heater*
5. Tangki air
6. HT-9815 *Thermocouple Thermometers*
7. *Thermocouple type-K*
8. Pipa uji (Pipa tembaga)

Gambar 3. 1 Konfigurasi sistem perpipaan

Terdapat satu buah *flowmeter* yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran air yang masuk ke dalam pipa uji. HT-9815 *Thermocouple Thermometers* untuk merekam temperatur yang masuk, keluar pipa uji dan temperatur lingkungan, dengan satu *thermocouple* pada bagian inlet untuk mengetahui temperatur air yang masuk ke dalam pipa tembaga dan satu *thermocouple* pada bagian outlet untuk mengetahui temperatur air yang keluar dari pipa tembaga. Pengambilan data dengan variasi ketebalan yaitu tanpa insulasi; 0,5 cm; 1 cm; 1.5 cm dan disertai variasi ketebalan pengambilan data pada kondisi temperatur awal fluida 40°C; 50°C; dan 60°C.

3.2 Perhitungan dengan Menggunakan Persamaan Empiris

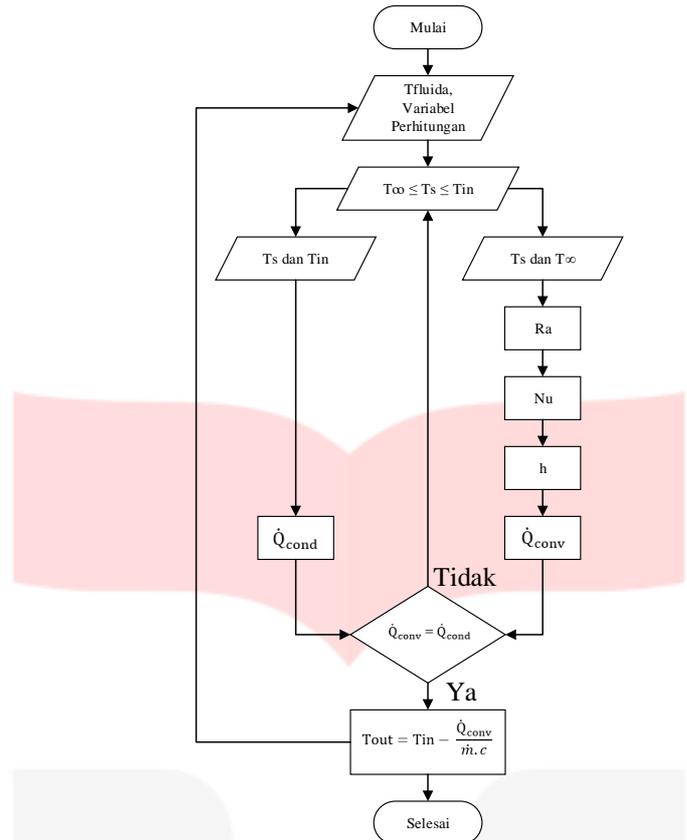
Pada penelitian ini, perhitungan dengan menggunakan persamaan empiris dilakukan dengan cara perhitungan secara manual menggunakan persamaan-persamaan empiris didalam software RStudio.

Pengolahan data dengan perhitungan digunakan untuk mengetahui temperatur permukaan dalam pipa di setiap segmen pipa. Perhitungan dimulai dari mendapatkan data temperatur permukaan dalam pipa (T_{in}) yang diperoleh dari HT-9815 *Thermocouple Thermometers* dan mengetahui temperatur lingkungan (T_{∞}) kemudian mencari temperatur permukaan insulasi (T_s) dengan mengasumsikan tempertur lingkungan (T_{∞}) $\leq T_s \leq T_{in}$. Data temperatur tersebut akan digunakan untuk menghitung \dot{Q}_{conv} dan \dot{Q}_{cond} . Perhitungan untuk mencari \dot{Q}_{conv} dengan menggunakan data T_s dan T_{∞} maka dapat menentukan nilai bilangan Prandtl dan bilangan Grashof dengan menggunakan persamaan 2.9 dan 2.12 untuk menentukan nilai bilangan Rayleigh dengan mengalikan kedua bilangan tersebut. Bilangan Rayleigh kemudian digunakan untuk menghitung nilai bilangan Nusselt (Nu) dengan menggunakan rumus konveksi alami pada silinder horizontal pada persamaan 2.15 atau dengan menggunakan data tabel 2.1 bila diketahui bilangan Rayleigh. Setelah didapatkan bilangan Nu maka dapat mencari koefisien perpindahan kalor konveksi (h) dengan persamaan 2.13 yang akan digunakan untuk mencari \dot{Q}_{conv} . Perhitungan untuk mencari \dot{Q}_{cond} untuk silinder dengan menggunakan data T_s dan T_{in} dengan menggunakan persamaan 2.4. Hasil dari perhitungan \dot{Q}_{conv} dan \dot{Q}_{cond} akan dibandingkan hingga eror nya mendekati nol. Metode ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{conv} &= \int_{T_1}^{T_2} \dot{m} c dT \\ \dot{Q}_{conv} &= \dot{m} c (T_2 - T_1) \\ T_1 &= T_2 - \frac{\dot{Q}_{conv}}{\dot{m} c} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Dengan nilai h tidak konstan, T_1 adalah temperatur outlet pipa uji dan T_2 adalah temperatur inlet pipa uji.

Berikut adalah diagram alir perhitungan dengan persamaan empiris pada penelitian ini :



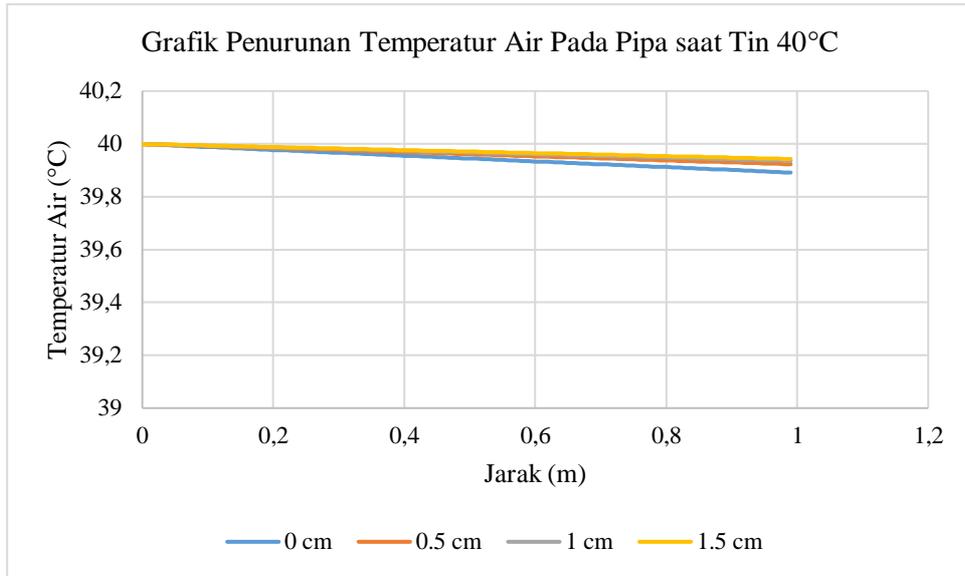
Gambar 3. 2 Diagram alir perhitungan

3.3 Hasil Pengujian dan Analisis

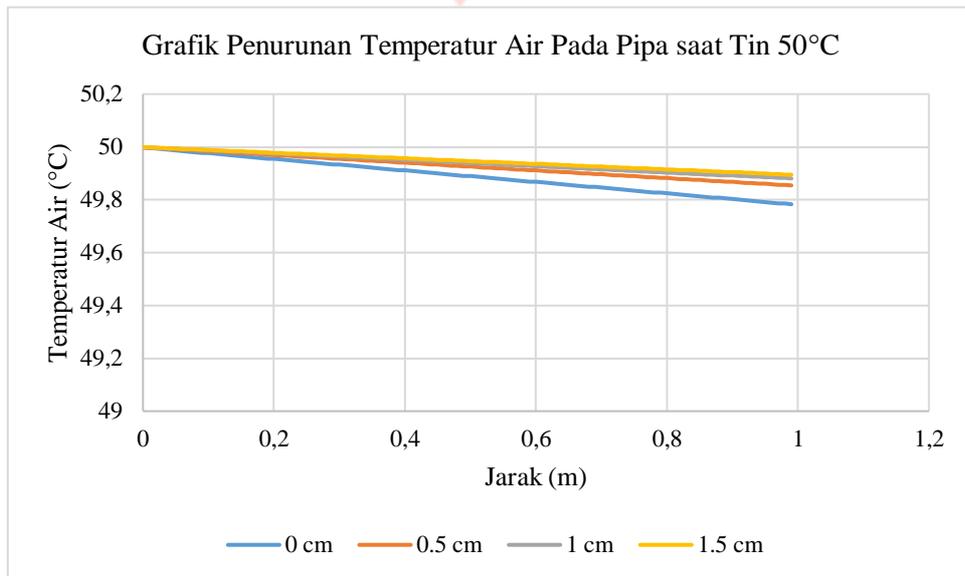
Tabel 3.1 Data Perancangan Perhitungan

Data	Nilai
Jari-jari dalam pipa (r_{ic})	0.0064 m
Tebal pipa (r_{oc})	0.0005 m
Konduktivitas termal tembaga (k_c)	401 W/m.K
Densitas air (ρ)	1000 kg/m ³
Konduktivitas termal udara (k_{flu})	0.0255 W/m.K
Viskositas kinematik udara (ν)	0.00002 m ² /s
Prandtl number (Pr)	0.7296
Konduktivitas termal polyfoam (k_i)	0.033 W/m.K
Kecepatan aliran air	0.4 liter per menit
Kalor jenis air (c)	4200 J/kg.K
Laju aliran massa (\dot{m})	0.00667 kg/s

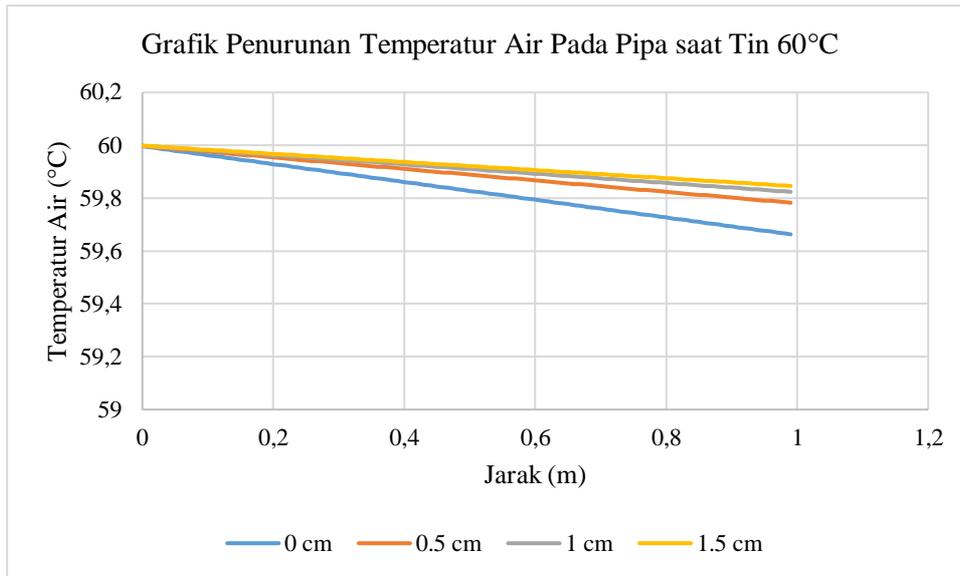
Data yang diperoleh merupakan data perbandingan temperatur akhir air hasil eksperimen yang dilakukan dan data hasil perhitungan berdasarkan persamaan-persamaan empiris yang berlaku pada sistem dengan berbagai variasi kondisi pengujian. Data hasil perhitungan ditunjukkan oleh grafik 4.1 sampai dengan grafik 4.3.



Grafik 4.1 Penurunan Temperatur Air pada Pipa saat Temperatur Awal Fluida 40°C dengan Berbagai Variasi Ketebalan Insulasi Termal



Grafik 4.2 Penurunan Temperatur Air pada Pipa saat Temperatur Awal Fluida 50°C dengan Berbagai Variasi Ketebalan Insulasi Termal



Grafik 4.3 Penurunan Temperatur Air pada Pipa saat Temperatur Awal Fluida 60°C dengan Berbagai Variasi Ketebalan Insulasi Termal

Berikut adalah rangkuman dari hasil eksperimen yang dilakukan dan hasil perhitungan :

Tabel 3.1 Hasil Temperatur Akhir Eksperimen dan Evaluasi Perhitungan

Tebal Insulasi (cm)	Tin (°C)	Eksperimen (°C)		Perhitungan (°C)		Error (%)
		Tout	ΔT	Tout	ΔT	
0	40	38.1	1.9	39.9	0.1	94.3
	50	47.3	2.7	49.8	0.2	92.1
	60	56.5	3.5	59.7	0.3	90.4
0.5	40	39.0	1.1	39.9	0.1	92.7
	50	48.1	2.0	49.9	0.1	92.5
	60	57.2	2.9	59.8	0.1	92.4
1	40	39.3	0.8	39.9	0.1	91.4
	50	48.3	1.7	49.9	0.2	93.0
	60	57.8	2.3	59.8	0.2	92.2
1.5	40	39.3	0.8	39.9	0.1	92.4
	50	48.7	1.4	49.9	0.1	92.2
	60	58.3	1.8	59.8	0.2	91.2

Dari hasil eksperimen yang dilakukan dan perhitungan menggunakan persamaan empiris, didapatkan data penurunan temperatur air pada pipa uji dengan ketebalan insulasi termal 1.5 cm memiliki selisih penurunan temperatur (ΔT) air paling kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin tebal bahan insulasi termal maka kemampuan sistem untuk meminimalisir rugi kalor. Dari hasil kedua pengujian tersebut juga terlihat nilai temperatur akhir air pada evaluasi perhitungan selalu lebih besar dari nilai temperatur akhir pada eksperimen. Perbedaan terjadi dikarenakan dalam melakukan perhitungan menggunakan persamaan empiris terdapat asumsi yang digunakan seperti temperatur ruangan tetap dan variabel-variabel lain pada data perancangan perhitungan yang dianggap tetap. Pada kondisi aktual variabel-variabel lain tersebut akan berubah seiring berubahnya temperatur air. Sehingga hasil yang didapatkan kurang mendekati kondisi aktual

eksperimen. Selain itu, pada dasarnya persamaan-persamaan empiris yang ada merupakan suatu pendekatan terhadap hasil eksperimen sehingga memiliki tingkat ketelitian tertentu. Nilai persentase eror terbesar yang didapatkan dari penelitian ini adalah 94.3% dan persentase eror terkecil 90.4%. Rata-rata persentase nilai eror yang didapatkan adalah 92.2% dengan besarnya eror dihitung menggunakan persamaan :

$$\text{Error prediksi} = \left| \frac{\Delta T_{eks} - \Delta T_p}{\Delta T_{eks}} \right| \times 100\% \quad (4.1)$$

dengan ΔT_{eks} adalah selisih penurunan temperatur pada eksperimen dan ΔT_p adalah selisih penurunan temperatur pada hasil perhitungan menggunakan persamaan empiris.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah dibuat sebuah konfigurasi sistem perpipaan untuk mengalirkan air panas untuk kegunaan eksperimen.
2. Dari penelitian ini telah diperoleh data penurunan temperatur pipa yang didapatkan dari perhitungan menggunakan persamaan-persamaan empiris perpindahan kalor.
3. Dari hasil kedua pengujain dapat diketahui ketebalan insulasi termal 1.5 cm memiliki selisih penurunan temperatur air paling kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin tebal bahan insulasi termal maka kemampuan sistem untuk meminimalisir rugi kalor.
4. Melalui penelitian ini, didapatkan hasil perbandingan penurunan temperatur dengan nilai persentase eror terbesar adalah 13.8% dan persentase eror terkecil 4.8%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ekadewi Anggraini Handoyo, "Pengaruh Tebal Isolasi Termal Terhadap Efektivitas Plate Heat Exchanger," *J. Tek. Mesin*, vol. 2, no. 2, pp. 73–78, 2000.
- [2] P. S. Ke- *et al.*, "Analisa Isolator Pipa Boiler Untuk Meminimalisir Heat Loss Saluran Permukaan Pipa Uap Pada Boiler Pabrik Krupuk Yarkasih," no. 3, pp. 121–128, 2014.
- [3] G. Pikra, A. Salim, T. Admono, and M. I. Devi, "Analisis Rugi-Rugi Panas Pada Tangki Penyimpan Panas Dalam Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Matahari," vol. 1, no. 1, pp. 13–18, 2010.
- [4] J. P. Holman, "Heat transfer," *New York McGraw-Hill*, p. 752, 2010.
- [5] Y. A. Cengel, "Heat Transfer: A Practical Approach," *New York McGraw-Hill*, pp. 785–841, 2003.
- [6] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 1981.
- [7] Engineering ToolBox, "Thermal Conductivity of common Materials and Gases," 2003. [Online]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html. [Diakses 17 April 2018].