

PENGARUH VARIASI KETEBALAN ISOLASI *MINERAL WOOL* TERHADAP KEHILANGAN PANAS PADA PIPA UAP MENGUNAKAN CFD

Syahrul Huda Mauludana¹, Muhamad Safi'i², Althesa Androva³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang
Jl. Sidodadi Timur No. 24, Dr. Cipto, Semarang, Jawa Tengah 50125
Email: ¹syahruldana456@gmail.com

Submitted Date: Mei 19, 2026
Revised Date: Mei 26, 2026

Reviewed Date: Mei 24, 2026
Accepted Date: Mei 30, 2026

Abstract

Steam pipes are essential components in industrial thermal energy distribution systems. The temperature difference between the steam inside the pipe and the surrounding environment causes heat loss, which reduces system efficiency. One method to minimize heat loss is the use of thermal insulation materials such as mineral wool. This study aims to analyze the effect of mineral wool insulation thickness on heat loss in steam pipes using Computational Fluid Dynamics (CFD) and ANSYS Fluent software. The insulation thicknesses used were 50 mm, 75 mm, and 100 mm. The simulation conditions included a steam temperature of 423.15 K, an ambient temperature of 308.15 K, and a convective heat transfer coefficient of 10 W/m²K. The results showed that increasing the insulation thickness reduced the heat loss. The heat loss values obtained were 342.43 W, 264.34 W, and 223.35 W for insulation thicknesses of 50 mm, 75 mm, and 100 mm, respectively. The 100 mm insulation reduced heat loss by 34.77% compared with the 50 mm insulation and effectively improved the thermal efficiency of the steam piping system. A grid independence study was conducted to verify mesh quality, and validation against analytical solutions confirmed a consistent trend of decreasing heat loss with increasing insulation thickness.

Keywords: mineral wool, heat loss, thermal insulation, steam pipe, CFD.

Abstrak

Pipa uap merupakan komponen penting dalam sistem distribusi energi termal di industri. Perbedaan temperatur antara uap di dalam pipa dan lingkungan menyebabkan terjadinya kehilangan panas (*heat loss*) yang dapat menurunkan efisiensi sistem. Salah satu upaya untuk mengurangi kehilangan panas adalah penggunaan isolasi termal, seperti *mineral wool*. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi ketebalan isolasi *mineral wool* terhadap kehilangan panas pada pipa uap menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan perangkat lunak ANSYS Fluent. Variasi ketebalan isolasi yang digunakan adalah 50 mm, 75 mm, dan 100 mm. Simulasi dilakukan pada temperatur uap 423,15 K, temperatur lingkungan 308,15 K, dan koefisien perpindahan panas konveksi 10 W/m²K. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan isolasi menyebabkan penurunan *heat loss*. Nilai *heat loss* yang diperoleh berturut-turut sebesar 342,43 W, 264,34 W, dan 223,35 W untuk ketebalan isolasi 50 mm, 75 mm, dan 100 mm. Ketebalan isolasi 100 mm mampu menurunkan kehilangan panas sebesar 34,77% dibandingkan ketebalan 50 mm, sehingga efektif dalam meningkatkan efisiensi termal sistem perpipaan uap. Uji independensi grid dilakukan untuk memverifikasi kualitas mesh, dan validasi terhadap solusi analitik menunjukkan kecenderungan penurunan *heat loss* yang konsisten seiring bertambahnya ketebalan isolasi.

Kata kunci: mineral wool, heat loss, isolasi termal, pipa uap, CFD.

I. Pendahuluan

Pipa uap adalah salah satu komponen penting dalam sistem distribusi energi termal di berbagai sektor industri, seperti pembangkit listrik, industri makanan, industri kimia, dan industri manufaktur (Putradianto & Lukmana. 2023), (Liu dkk. 2021). Pada aplikasinya, pipa uap banyak digunakan dalam jaringan distribusi

panas (*district heating*), proses pemanasan pada boiler industri, serta sistem perpipaan pada pembangkit listrik tenaga panas bumi (*geothermal*), yang seluruhnya membutuhkan sistem isolasi termal yang efektif untuk menjaga efisiensi energi (Putradianto & Lukmana. 2023), (Çengel & Ghajar. 2020). Uap digunakan sebagai media pembawa energi panas karena memiliki kapasitas kalor yang tinggi dan mampu

mendistribusikan energi secara efisien. Namun, perbedaan temperatur antara uap di dalam pipa dan lingkungan menyebabkan terjadinya kehilangan panas (*heat loss*) yang dapat menurunkan efisiensi sistem serta meningkatkan konsumsi energi dan biaya operasional. (Putradiano & Lukmana, 2023), (Alrasheed. 2024).

Salah satu metode yang digunakan untuk mengurangi *heat loss* pada sistem perpipaan adalah pemasangan material isolasi termal pada permukaan luar pipa. Penggunaan isolasi dapat meningkatkan tahanan termal sehingga laju perpindahan panas menuju lingkungan menjadi lebih kecil. Di antara berbagai jenis material isolasi, *mineral wool* banyak digunakan karena memiliki konduktivitas termal yang rendah, tahan terhadap temperatur tinggi, tidak mudah terbakar, dan memiliki biaya produksi yang relatif terjangkau dibandingkan material isolasi berkinerja tinggi lainnya seperti aerogel (Rahmat, 2024), (Zhang, Rode, & Hall. 2024), (Çengel & Ghajar. 2020). Meskipun demikian, *mineral wool* juga memiliki keterbatasan. Sifatnya yang berpori membuat material ini rentan menyerap kelembapan apabila lapisan pelindung (*cladding*) mengalami kebocoran, yang dapat meningkatkan konduktivitas termal efektif material dan menurunkan kinerja isolasi secara signifikan (Zhang, Rode, & Hall. 2024), (Lu dkk., 2024). Selain itu, penambahan ketebalan isolasi yang berlebihan berdampak pada peningkatan biaya material, beban struktural, dan dimensi fisik sistem perpipaan.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh ketebalan isolasi terhadap kehilangan panas dan aspek ekonominya. Putradiano dan Lukmana (Putradiano & Lukmana, 2023) melaporkan bahwa penggunaan isolasi pada pipa *geothermal* mampu menurunkan kehilangan panas dan mengurangi biaya operasional secara signifikan. Rahmat dkk. (Rahmat dkk. 2024) menunjukkan bahwa penambahan ketebalan isolasi meningkatkan tahanan termal sehingga laju perpindahan panas menurun, berdasarkan simulasi menggunakan metode ANFIS dan *Least-squares Estimation*. Alrasheed (Alrasheed. 2024) mengoptimalkan ketebalan isolasi berlapis (*multilayer*) pada berbagai jenis pipa untuk meminimalkan biaya total terkait kehilangan panas, dan menemukan bahwa ketebalan optimum bergantung pada keseimbangan antara biaya material dan penghematan energi. Noumo dkk. (Noumo dkk. 2021) melakukan simulasi numerik untuk

menentukan ketebalan isolasi minimum pada pipa bawah laut (*subsea pipeline*) yang membawa aliran minyak dan gas, dan menunjukkan bahwa desain termal yang tepat dapat mencegah pembentukan hidrat. Zhang dkk. (Zhang dkk. 2022) menganalisis ketebalan isolasi ekonomis dan biaya siklus hidup pada pipa pemanas distrik perkotaan (*urban district steam heating pipe*), dengan hasil yang menegaskan adanya titik optimum antara ketebalan isolasi dan biaya total. Terhan (Terhan, 2022) mengoptimalkan ketebalan isolasi pada jaringan *district heating* dari berbagai generasi sekaligus mengevaluasi penurunan emisi CO₂ yang dihasilkan dari pengurangan kehilangan panas. Usman dan Kim (Usman & Kim. 2022) melakukan simulasi CFD menggunakan ANSYS Fluent untuk mengevaluasi ketebalan isolasi optimum pada pipa *district heating* bertemperatur rendah di Korea Selatan, dengan mempertimbangkan biaya material dan biaya penggalan.

Selain aspek ketebalan dan ekonomi, beberapa penelitian juga mengkaji perilaku *mineral wool* dalam kondisi basah serta metode pemantauan kondisi termal pipa di lapangan. Zhang dkk. (Zhang, Rode, & Hall. 2024) meneliti perpindahan panas, massa, dan momentum pada isolasi *mineral wool* dalam kondisi basah, dan menemukan bahwa kandungan air dapat meningkatkan kehilangan panas hingga beberapa kali lipat dibandingkan kondisi isolasi kering akibat efek *heat-pipe* radial. Lu dkk. (Lu dkk., 2024) mengembangkan simulasi tiga dimensi untuk memahami fenomena *heat-pipe* akibat aliran uap aksial pada isolasi *mineral wool* basah, yang relevan dengan permasalahan korosi di bawah isolasi (*corrosion under insulation*) pada sistem perpipaan industri. Dragovic dkk. (Dragovic dkk. 2024) meneliti transpor air dan korosi di bawah isolasi melalui investigasi eksperimental terhadap proses pengeringan pada *mineral wool*, yang menyoroti pentingnya menjaga integritas *cladding* pada sistem isolasi pipa. Sementara itu, Lidén dan Adl-Zarrabi (Lidén & Adl-Zarrabi. 2020) mengembangkan metode pengujian non-destruktif untuk memantau status termal pipa *district heating* di lapangan. Penelitian-penelitian tersebut menegaskan bahwa metode numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) mampu memberikan prediksi distribusi temperatur dan karakteristik perpindahan panas yang baik pada sistem termal (ANSYS Inc. 2021a), (ANSYS Inc. 2021b).

Berdasarkan ulasan tersebut, sebagian besar penelitian mengenai ketebalan isolasi pada sistem perpipaan masih berfokus pada pendekatan teoritis, eksperimen, atau optimasi biaya, sedangkan penelitian yang secara khusus menganalisis pengaruh variasi ketebalan isolasi *mineral wool* terhadap distribusi temperatur dan kehilangan panas pada pipa uap menggunakan simulasi tiga dimensi berbasis CFD masih terbatas. Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu belum secara eksplisit menjustifikasi pemilihan model aliran (laminar maupun turbulen) berdasarkan nilai Reynolds number aktual pada kondisi operasi yang dikaji, sehingga validitas hasil simulasi terhadap kondisi fisik sebenarnya perlu mendapat perhatian lebih lanjut. Kekosongan inilah yang menjadi dasar dilakukannya penelitian ini.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada penggunaan simulasi tiga dimensi berbasis *Computational Fluid Dynamics* menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent untuk membandingkan pengaruh tiga variasi ketebalan isolasi *mineral wool* 50 mm, 75 mm, dan 100 mm terhadap distribusi temperatur dan kehilangan panas pada pipa uap dalam kondisi operasi yang sama, dengan model aliran yang dipilih berdasarkan justifikasi nilai Reynolds number aktual pada kondisi operasi yang dikaji. Kebaruan tambahan penelitian ini juga mencakup pelaksanaan uji independensi grid secara sistematis dan validasi hasil simulasi terhadap solusi analitik berbasis tahanan termal silinder berlapis, yang memperkuat kredibilitas hasil numerik yang diperoleh.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi ketebalan isolasi *mineral wool* terhadap distribusi temperatur dan nilai *heat loss* pada pipa uap menggunakan simulasi CFD ANSYS Fluent. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi bahan pertimbangan bagi praktisi maupun perancang sistem perpipaan dalam menentukan ketebalan isolasi *mineral wool* yang tepat pada pipa uap, sehingga dapat mengurangi kehilangan energi, menurunkan biaya operasional, serta mendukung efisiensi energi pada sistem industri. Secara akademis, hasil penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dalam penerapan metode CFD pada analisis perpindahan panas di bidang teknik mesin, serta menegaskan pentingnya pemilihan model turbulensi yang sesuai dengan kondisi aliran aktual dalam simulasi CFD pada studi perpindahan panas serupa.

II. Metode Penelitian

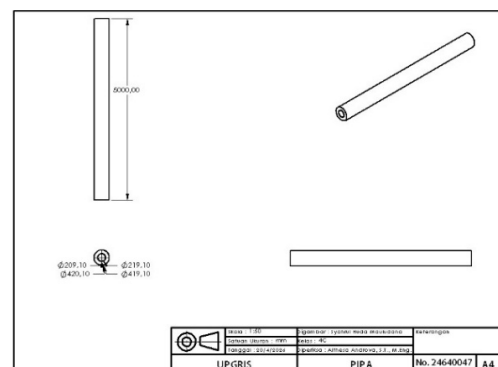
Model Fisik

Penelitian ini menggunakan model geometri pipa uap tiga dimensi yang terdiri atas fluida uap, dinding pipa, lapisan isolasi *mineral wool*, dan *cladding* aluminium. Pipa yang digunakan memiliki diameter luar sebesar 219,1 mm dan panjang sebesar 5000 mm. Ketebalan isolasi divariasikan menjadi 50 mm, 75 mm, dan 100 mm, sedangkan ketebalan *cladding* ditetapkan sebesar 1 mm. Variasi ketebalan isolasi dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap distribusi temperatur dan nilai kehilangan panas pada sistem perpipaan.

Tabel 1. Dimensi geometri pipa

Parameter	Nilai (mm)
Diameter Dalam	209,1
Diameter luar	219,1
Panjang pipa	5000
Ketebalan <i>cladding</i>	1
Ketebalan isolasi	50, 75, dan 100

Dimensi geometri penelitian ditunjukkan pada Tabel 1. Variasi ketebalan isolasi dilakukan dengan mempertahankan dimensi pipa dan kondisi operasi yang sama sehingga pengaruh ketebalan isolasi terhadap kehilangan panas dapat dianalisis secara langsung.



Gambar 1. Geometri Pipa.

Material Penelitian

Material yang digunakan dalam simulasi terdiri atas baja karbon sebagai material pipa, *mineral wool* sebagai material isolasi, dan aluminium sebagai material *cladding*. Pemilihan *mineral wool* didasarkan pada nilai konduktivitas termalnya yang rendah sehingga mampu menghambat perpindahan panas dari permukaan pipa menuju lingkungan (Zhang, Rode, & Hall. 2024), (Çengel & Ghajar. 2020). Sifat termofisika material yang digunakan dalam simulasi ditunjukkan pada Tabel 2 dan

dimasukkan ke dalam basis data material pada perangkat lunak ANSYS Fluent. Adapun properti fluida uap yang digunakan dalam simulasi pada temperatur operasi 423,15 K adalah sebagai berikut: densitas $\rho = 4,04 \text{ kg/m}^3$, viskositas dinamis $\mu = 1,57 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, konduktivitas termal $k = 0,034 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, dan kalor jenis $c_p = 2.030 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ (Çengel & Ghajar. 2020).

Tabel 2. Sifat termofisika material

Material	Massa jenis (kg/m ³)	Kalor jenis (J/kg·K)	Konduktivitas termal (W/m·K)
Baja karbon	7850	434	54
Mineral wool	100	840	0,049
Aluminium	2719	871	202,4

Reduksi Data

Laju kehilangan panas pada pipa berisolasi dapat dihitung berdasarkan konsep tahanan termal total pada silinder berlapis. (Çengel & Ghajar. 2020) Persamaan dasar perpindahan panas dinyatakan sebagai berikut.

$$R_{\text{total}} = R_{\text{pipa}} + R_{\text{isolasi}} + R_{\text{cladding}} + R_{\text{conv}} \quad (1)$$

dengan:

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{hA} \quad (2)$$

$$R_{\text{pipa}} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{(2\pi kL)} \quad (3)$$

$$R_{\text{isolasi}} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{(2\pi kL)} \quad (4)$$

$$R_{\text{cladding}} = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{(2\pi kL)} \quad (5)$$

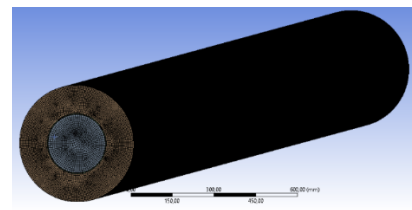
Meshing

Proses meshing dilakukan menggunakan metode tetrahedral mesh dengan penambahan inflation layer pada daerah dekat dinding. Ukuran elemen mesh pada domain fluida ditetapkan sebesar 8 mm, pada dinding pipa dan dinding *cladding* sebesar 3 mm, dan pada lapisan isolasi sebesar 5 mm. Ukuran elemen tersebut merupakan konfigurasi mesh *medium* yang dipilih berdasarkan hasil uji independensi grid sebagaimana dijelaskan pada subbab berikutnya.

Tabel 3. Parameter meshing (mesh *medium*, digunakan pada seluruh simulasi)

Parameter	Nilai
Jenis mesh	Tetrahedral
Ukuran mesh fluida	8 mm
Ukuran mesh pipa dan <i>cladding</i>	3 mm
Ukuran mesh isolasi	5 mm

Kualitas mesh diperiksa menggunakan parameter skewness dengan nilai target maksimum 0,900, yang masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk simulasi CFD. Inflation layer diterapkan dengan metode smooth transition, jumlah lapisan maksimum sebesar 5, dan growth rate sebesar 1,2 guna memastikan resolusi yang memadai pada daerah dekat dinding. Hasil evaluasi kualitas mesh pada level medium menunjukkan nilai skewness rata-rata sebesar $9,95 \times 10^{-2}$, dengan nilai maksimum 0,602 dan deviasi standar 0,103. Nilai skewness rata-rata yang mendekati nol dan nilai maksimum yang berada di bawah ambang batas 0,9 mengindikasikan bahwa kualitas mesh yang dihasilkan tergolong baik dan memadai untuk simulasi CFD perpindahan panas.



Gambar 2. Mesh Geometri.

Uji Independensi Grid

Uji independensi grid dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak bergantung pada ukuran elemen mesh yang digunakan, sehingga akurasi numerik dapat dipertanggungjawabkan. Pengujian dilakukan pada kasus ketebalan isolasi 50 mm dengan model turbulensi k-epsilon standar, karena kondisi ini menghasilkan gradien temperatur paling tajam di antara seluruh variasi dan merupakan kondisi paling menuntut ketelitian mesh. Tiga level kerapatan mesh diuji, yaitu *coarse*, *medium*, dan *fine*, dengan parameter ukuran elemen yang berbeda pada masing-masing domain seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Uji pada level *very fine* tidak dilakukan mengingat jumlah elemen mesh *fine* telah mencapai 15.127.380 elemen sehingga melebihi kapasitas komputasi yang tersedia, sementara hasil uji pada level *fine* telah memenuhi kriteria independensi grid.

Parameter yang dibandingkan antar level mesh adalah nilai *heat loss* (W) sebagai

parameter utama penelitian. Kriteria independensi ditetapkan apabila perbedaan *heat loss* antara dua level mesh yang berurutan tidak melebihi 5%. Hasil uji independensi grid disajikan pada Tabel 5.

Berdasarkan Tabel 5, perbedaan *heat loss* antara mesh *coarse* dan *medium* sebesar 6,46%, sedangkan antara mesh *medium* dan *fine* sebesar 2,46%. Perbedaan antara mesh *medium* dan *fine* telah berada di bawah ambang batas 5%, sehingga mesh *medium* dinyatakan telah independen terhadap grid. Oleh karena itu, mesh *medium* dengan ukuran elemen fluida 8 mm, pipa dan *cladding* 3 mm, serta isolasi 5 mm digunakan untuk seluruh simulasi pada penelitian ini guna menyeimbangkan akurasi hasil dan efisiensi komputasi.

Tabel 4. Konfigurasi ukuran mesh pada setiap level uji independensi grid

Level Mesh	Ukuran Mesh Fluida	Ukuran Mesh Pipa & Cladding	Ukuran Mesh Isolasi
<i>Coarse</i>	12 mm	5 mm	8 mm
<i>Medium</i>	8 mm	3 mm	5 mm
<i>Fine</i>	5 mm	2 mm	3 mm

Tabel 5. Hasil uji independensi grid (isolasi 50 mm, model k-epsilon)

Mesh	Elemen	Heat Loss (W)	Δ (%)
<i>Coarse</i>	1.131.306	321,63	-
<i>Medium</i>	4.177.386	342,43	6,46%
<i>Fine</i>	15.127.380	350,86	2,46%

Data konvergensi pada setiap level mesh disajikan pada Tabel 6. Seluruh residual turbulensi k dan ϵ berada pada rentang 10^{-8} hingga 10^{-5} , jauh di bawah ambang batas 10^{-4} yang ditetapkan, sehingga seluruh hasil *heat loss* pada Tabel 5 dinyatakan diperoleh dari solusi yang telah konvergen.

Tabel 6. Data konvergensi per level mesh (isolasi 50 mm)

Mesh	Iter.	Res. Kontinuitas	Res. Energi
<i>Coarse</i>	117	$9,87 \times 10^{-4}$	$1,28 \times 10^{-7}$
<i>Medium</i>	70	$9,76 \times 10^{-4}$	$6,66 \times 10^{-8}$
<i>Fine</i>	48	$9,48 \times 10^{-4}$	$1,12 \times 10^{-7}$

Validasi

Validasi dilakukan untuk memverifikasi kecenderungan hasil simulasi CFD terhadap solusi analitik berdasarkan persamaan konduksi radial pada silinder berlapis (Çengel & Ghajar. 2020). Nilai *heat loss* analitik dihitung menggunakan persamaan tahanan termal total sebagai berikut: $Q = (T_{\text{uap}} - T_{\text{lingkungan}}) / R_{\text{total}}$, dengan $R_{\text{total}} = R_{\text{pipa}} + R_{\text{isolasi}} + R_{\text{cladding}} + R_{\text{konveksi}}$, di mana masing-masing komponen dihitung menggunakan persamaan tahanan konduksi silinder dan tahanan konveksi pada permukaan luar *cladding*. Kondisi operasi yang digunakan identik dengan kondisi simulasi, yaitu $T_{\text{uap}} = 423,15$ K, $T_{\text{lingkungan}} = 308,15$ K, dan $h = 10$ W/m²K. Hasil perbandingan antara nilai *heat loss* CFD dan analitik untuk ketiga variasi ketebalan isolasi disajikan pada Tabel 9 di bagian Hasil dan Pembahasan.

Kondisi Batas Simulasi

Tabel 7. Kondisi batas simulasi

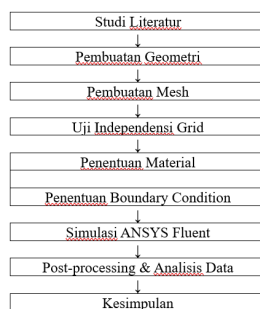
Parameter	Nilai
Temperatur	423,15 K
Temperatur lingkungan	308,15 K
Koefisien konveksi	10 W/m ² K
Solver	Pressure-Based
Model aliran	k-epsilon standar
Energy Equation	ON
Iterasi	500

Simulasi dilakukan pada kondisi tunak (*steady state*) menggunakan *pressure-based solver*. Nilai Reynolds number dihitung menggunakan persamaan $Re = \rho v D / \mu$, dengan densitas uap $\rho = 4,04$ kg/m³, kecepatan aliran $v = 1$ m/s, diameter dalam pipa $D = 0,2091$ m, dan viskositas dinamis uap $\mu = 1,57 \times 10^{-5}$ Pa·s pada temperatur operasi 423,15 K. Nilai Reynolds number yang diperoleh sebesar ± 35.500 , yang menunjukkan bahwa aliran berada pada rezim turbulen ($Re > 4.000$). Kecepatan aliran uap sebesar 1 m/s dipilih sebagai kondisi batas representatif untuk tujuan analisis perpindahan panas, bukan untuk mensimulasikan kondisi distribusi uap industri secara penuh, dengan tujuan memastikan rezim aliran turbulen sekaligus memfokuskan analisis pada pengaruh ketebalan isolasi terhadap *heat loss* (ANSYS Inc. 2021a), (ANSYS Inc. 2021b). Oleh karena itu, simulasi pada penelitian ini menggunakan model turbulensi k-epsilon standar (standard k- ϵ).

Kriteria konvergensi ditetapkan pada nilai residual di bawah 10^{-4} untuk seluruh persamaan yang diselesaikan, termasuk persamaan kontinuitas, momentum, energi, dan persamaan turbulensi k dan ϵ . Persamaan energi diaktifkan untuk memperoleh distribusi temperatur dan laju perpindahan panas pada sistem perpipaan. Temperatur uap ditetapkan sebesar 423,15 K, sedangkan temperatur lingkungan sebesar 308,15 K.

Koefisien perpindahan panas konveksi pada permukaan luar *cladding* ditetapkan konstan sebesar $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ untuk seluruh variasi ketebalan isolasi, sebagai penyederhanaan dari kondisi konveksi alami yang sesungguhnya bergantung pada selisih temperatur permukaan-lingkungan. Asumsi ini merupakan salah satu keterbatasan dalam penelitian ini. Selain itu, perpindahan panas radiasi pada permukaan *cladding* diabaikan dengan asumsi kontribusi radiasi relatif kecil dibandingkan konveksi pada rentang temperatur permukaan yang diamati, meskipun estimasi kuantitatif kontribusi radiasi tidak dihitung secara terpisah dalam penelitian ini.

Tahapan Simulasi CFD



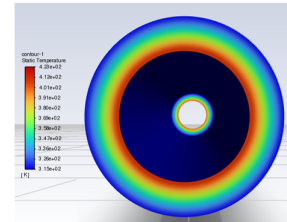
Gambar 3. Diagram alir penelitian

Tahapan penelitian dimulai dari studi literatur, pembuatan geometri, proses meshing, uji independensi grid, penentuan kondisi batas, pelaksanaan simulasi menggunakan ANSYS Fluent, validasi hasil terhadap solusi analitik, hingga tahap post-processing dan analisis data. Proses simulasi diawali dengan hybrid initialization dan dilanjutkan dengan iterasi sebanyak 500 iterasi hingga diperoleh solusi yang konvergen. Nilai kehilangan panas diperoleh melalui menu *Report* → *Fluxes* → *Total Heat Transfer Rate* pada ANSYS Fluent 2021 R2. (ANSYS Inc. 2021a), (ANSYS Inc. 2021b).

III. Hasil dan Pembahasan

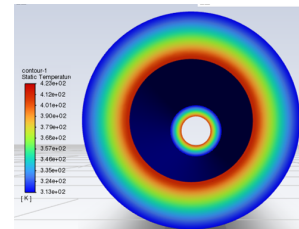
Performa Termal

Untuk mengetahui pengaruh ketebalan isolasi terhadap distribusi temperatur pada sistem perpipaan, dilakukan visualisasi kontur temperatur pada masing-masing variasi ketebalan isolasi.



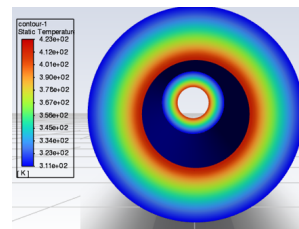
Gambar 4. Kontur isolasi 50 mm

Pada ketebalan isolasi 50 mm, temperatur permukaan luar *cladding* masih relatif tinggi karena tahanan termal yang diberikan oleh lapisan isolasi belum cukup besar untuk menghambat perpindahan panas.



Gambar 5. Kontur isolasi 75 mm

Peningkatan ketebalan isolasi menjadi 75 mm menyebabkan temperatur permukaan luar menurun. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan isolasi meningkatkan tahanan konduksi sehingga laju perpindahan panas menjadi lebih kecil.



Gambar 6. Kontur isolasi 100 mm

Pada ketebalan isolasi 100 mm diperoleh temperatur permukaan luar paling rendah dibandingkan variasi lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan ketebalan isolasi memberikan hambatan perpindahan panas yang lebih besar sehingga kehilangan panas dapat diminimalkan (Putradianito &

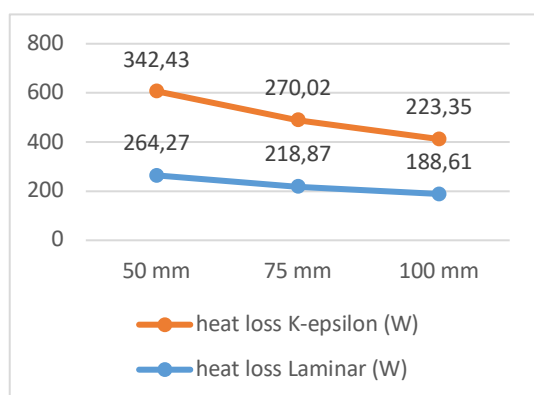
Lukmana, 2023), (Alrasheed. 2024), (Zhang dkk. 2022), (Lu dkk., 2024).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa temperatur tertinggi berada pada permukaan dalam pipa yang bersentuhan langsung dengan uap, yaitu sebesar 423,15 K. Temperatur kemudian menurun secara bertahap menuju permukaan luar isolasi akibat terjadinya perpindahan panas secara konduksi melalui dinding pipa, lapisan *mineral wool*, dan *cladding*. Semakin besar ketebalan isolasi yang digunakan, semakin rendah temperatur pada permukaan luar *cladding* karena kemampuan isolasi dalam menahan perpindahan panas semakin meningkat.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa temperatur permukaan luar *cladding* menurun seiring bertambahnya ketebalan isolasi. Pada ketebalan isolasi 50 mm, temperatur permukaan luar *cladding* yang diperoleh sebesar 314,99 K (41,84 °C), sedangkan pada ketebalan 75 mm dan 100 mm masing-masing sebesar 312,81 K (39,66 °C) dan 311,59 K (38,44 °C). Penurunan temperatur permukaan ini mengonfirmasi bahwa penambahan ketebalan isolasi secara efektif meningkatkan resistansi termal total sistem perpipaan, sehingga mengurangi laju perpindahan panas dari uap ke lingkungan.

Pengaruh ketebalan isolasi terhadap heat loss

Untuk memperjelas pengaruh ketebalan isolasi terhadap kehilangan panas, hasil simulasi *heat loss* pada setiap variasi ketebalan disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik pengaruh ketebalan isolasi

Berdasarkan hasil simulasi, peningkatan ketebalan isolasi menyebabkan penurunan nilai *heat loss*. Pada penelitian ini, simulasi juga dilakukan dengan model aliran laminar sebagai pembandingan terhadap model k-epsilon standar yang dipilih berdasarkan nilai Reynolds number aktual. Hasil kedua model ditunjukkan pada

Tabel 8. Model k-epsilon menghasilkan nilai *heat loss* yang lebih tinggi pada seluruh variasi ketebalan dibandingkan model laminar, yaitu sebesar 342,43 W, 264,34 W, dan 223,35 W untuk ketebalan 50 mm, 75 mm, dan 100 mm, sedangkan model laminar menghasilkan nilai berturut-turut sebesar 264,27 W, 218,87 W, dan 188,61 W. Perbedaan ini terjadi karena model k-epsilon memperhitungkan efek turbulensi yang meningkatkan pencampuran fluida dan laju perpindahan panas konvektif, sehingga menghasilkan estimasi *heat loss* yang lebih tinggi dibandingkan model laminar. Hal ini menegaskan bahwa pemilihan model aliran yang sesuai dengan rezim aliran aktual (Reynolds number ± 35.500 , turbulen) sangat penting untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat. Pembahasan selanjutnya difokuskan pada hasil model k-epsilon karena merupakan model yang sesuai dengan kondisi aliran aktual pada penelitian ini. Ketebalan isolasi 50 mm menghasilkan kehilangan panas sebesar 342,43 W, sedangkan ketebalan 75 mm dan 100 mm menghasilkan *heat loss* masing-masing sebesar 264,34 W dan 223,35 W. Penggunaan isolasi setebal 100 mm mampu menurunkan *heat loss* sebesar 34,77% dibandingkan ketebalan 50 mm.

Penurunan *heat loss* terjadi karena peningkatan tahanan termal total seiring bertambahnya ketebalan isolasi. Semakin besar ketebalan isolasi, maka tahanan konduksi meningkat sehingga laju perpindahan panas menuju lingkungan menjadi semakin kecil (Alrasheed. 2024), (Zhang dkk. 2022), (Çengel & Ghajar. 2020). Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Putradianto dan Lukmana (Putradianto & Lukmana, 2023) serta Alrasheed (Alrasheed. 2024) yang menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan isolasi mampu meningkatkan efisiensi termal sistem perpipaan.

Tabel 8. Hasil *heat loss*

Ketebalan (mm)	Heat loss K-epsilon (W)	Heat loss laminar (W)
50	342,43	264,27
75	264,34	218,87
100	223,35	188,61

Berdasarkan teori konduksi radial pada silinder berlapis, laju kehilangan panas berbanding terbalik dengan tahanan termal total. Hal ini dapat ditunjukkan secara kuantitatif dari persentase penurunan *heat loss* antar variasi ketebalan berikut.

Bertambahnya ketebalan isolasi menyebabkan jari-jari luar isolasi meningkat sehingga tahanan konduksi pada lapisan silinder berlapis menjadi lebih besar, sesuai dengan persamaan konduksi radial yang digunakan dalam analisis termal sistem ini (Çengel & Ghajar. 2020).

$$\%Penurunan = \frac{342,43 - 264,34}{342,43} \times 100\% = 22,83\% \quad (6)$$

$$\%Penurunan = \frac{342,43 - 223,35}{342,43} \times 100\% = 34,77\% \quad (7)$$

Penggunaan isolasi setebal 75 mm mampu menurunkan *heat loss* sebesar 22,83% , sedangkan ketebalan 100 mm mampu menurunkan *heat loss* sebesar 34,77% dibandingkan ketebalan 50 mm.

Meskipun penambahan ketebalan isolasi secara konsisten menurunkan kehilangan panas, peningkatan ketebalan juga berdampak pada bertambahnya biaya material, beban, dan dimensi fisik pipa. Sejalan dengan temuan Alrasheed (Alrasheed. 2024) dan Zhang dkk. (Zhang dkk. 2022), penentuan ketebalan isolasi optimum perlu mempertimbangkan titik temu antara penurunan kehilangan panas dan kenaikan biaya, sehingga ketebalan 100 mm pada penelitian ini belum tentu menjadi pilihan paling ekonomis meskipun memberikan penurunan kehilangan panas terbesar.

Berdasarkan Tabel 9, nilai *heat loss* analitik lebih tinggi dibandingkan hasil simulasi CFD pada seluruh variasi ketebalan isolasi, dengan deviasi berkisar antara 18,18% hingga 21,4%. Perbedaan ini terjadi karena perhitungan analitik mengasumsikan temperatur dinding dalam pipa sama dengan temperatur uap (423,15 K), sehingga tidak memperhitungkan tahanan konveksi internal antara fluida uap dan dinding pipa. Sebaliknya, simulasi CFD memodelkan konveksi turbulen di dalam pipa secara langsung, sehingga temperatur efektif pada dinding dalam sedikit lebih rendah dari 423,15 K, yang menghasilkan nilai *heat loss* yang lebih rendah pula. Deviasi ini merupakan konsekuensi dari perbedaan asumsi mendasar antara kedua pendekatan, bukan indikasi kesalahan simulasi. Meskipun terdapat selisih kuantitatif, kedua metode menunjukkan kecenderungan yang konsisten, yaitu peningkatan ketebalan isolasi secara monoton menurunkan nilai *heat loss*, sehingga hasil simulasi CFD dinyatakan valid secara kualitatif dalam menggambarkan perilaku perpindahan panas pada sistem pipa uap berisolasi.

Tabel 9. Perbandingan hasil simulasi CFD dan perhitungan analitik

Ketebalan Isolasi (mm)	Heat Loss CFD (W)	Heat Loss Analitik (W)	Deviasi (%)
50	342,43	435,45	21,4 %
75	264,34	323,05	18,18 %
100	223,35	263,48	15,2 %

VI. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan ANSYS Fluent, variasi ketebalan isolasi *mineral wool* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kehilangan panas (*heat loss*) pada pipa uap. Nilai *heat loss* yang diperoleh berturut-turut sebesar 342,43 W pada ketebalan isolasi 50 mm, 264,34 W pada ketebalan 75 mm, dan 223,35 W pada ketebalan 100 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar ketebalan isolasi yang digunakan, maka nilai kehilangan panas yang terjadi semakin kecil akibat meningkatnya tahanan termal pada sistem perpipaan. Penggunaan isolasi *mineral wool* dengan ketebalan 100 mm mampu menurunkan *heat loss* sebesar 34,77% dibandingkan dengan ketebalan 50 mm dan menghasilkan temperatur permukaan luar terendah di antara seluruh variasi yang diuji. Dengan demikian, penggunaan isolasi *mineral wool* dengan ketebalan yang lebih besar terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi termal sistem perpipaan uap. Uji independensi grid menunjukkan bahwa mesh *medium* dengan selisih *heat loss* sebesar 2,46% terhadap mesh *fine* telah memenuhi kriteria independensi. Kualitas mesh yang digunakan dinyatakan baik berdasarkan nilai skewness rata-rata sebesar $9,95 \times 10^{-2}$ dengan nilai maksimum 0,602, yang berada di bawah ambang batas yang dapat diterima untuk simulasi CFD. Validasi terhadap perhitungan analitik menunjukkan kecenderungan yang konsisten antara kedua metode, meskipun terdapat deviasi kuantitatif akibat perbedaan asumsi kondisi batas pada permukaan dalam pipa. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mempertimbangkan pengaruh radiasi termal, variasi material isolasi lainnya, serta validasi eksperimental guna memperoleh hasil yang lebih komprehensif.

Ucapan terimakasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang atas dukungan, fasilitas, dan kesempatan yang diberikan selama proses penelitian ini berlangsung. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan bimbingan selama penyusunan penelitian serta kepada keluarga dan seluruh pihak yang telah membantu dan memberikan dukungan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Daftar pustaka

- Putradianto RR, Lukmana AH. *Heat loss and Cost Reduction of Insulation Materials on Geothermal Pipes*. Journal of Petroleum and Geothermal Technology, 4(1), 58–65. doi:10.31315/jpgt.v4i1.9706.
- Rahmat, Agusta MK, Ihsan A. *Testing of Thermal Resistance and Heat loss Simulator Design of the Fluid Flow in Insulated Pipe Using ANFIS and Least-squares Estimation Method*. J Otom Kontrol Instrum. 2024;16(1):11–20. doi:10.5614/joki.2024.16.1.2.
- Zhang Y, Rode M, Hall C. *Heat, Mass and Momentum Transport in Wet Mineral-Wool Insulation: Experiment and Simulation*. Int J Heat Mass Transf. 2024;228:125644. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125644.
- Lu F, Kaviany M, Williams J, Addison-Smith T. *Axial-Vapor-Flow Induced, Low-Liquid-Saturation Heat-Pipe Effect in Wet Insulation: Simulation and Experiment*. Int J Heat Mass Transf. 2024 ;244:126857. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126857.
- Alrasheed MRA. *Optimizing the Thickness of Multilayer Thermal Insulation on Different Pipelines for Minimizing Overall Cost-Associated Heat loss*. Processes. 2024;12(2):318. doi:10.3390/pr12020318.
- Liu X, et al. *Analysis of Transmission Characteristics of Steam Long-Distance Heating Pipeline*. Energy Reports. 2021;7:242–253. doi:10.1016/j.egyr.2021.10.034.
- Noumo PG, Njomo D, Nana KZ, Nguewo LRC. *Numerical Simulation of the Minimum Insulation Thickness to Thermally Design a Subsea Pipeline Carrying an Oil and Gas Flow*. Int J Heat Technol. 2021;39(3):763–774. doi:10.18280/ijht.390310.
- Zhang Y, et al. *Economic Thickness and Life Cycle Cost Analysis of Insulating Layer for the Urban District Steam Heating Pipe*. Case Stud Therm Eng. 2022;34:102058. doi:10.1016/j.csite.2022.102058.
- Terhan M. *Optimization Insulation Thickness and Reduction of CO2 Emissions for Pipes in All Generation District Heating Networks*. Simul Ser. 2022. doi:10.1177/00368504221122287.
- Lidén HP, Adl-Zarrabi B. *Development of a Non-destructive Testing Method for Assessing Thermal Status of District Heating Pipes*. J Nondestruct Eval. 2020;39:22. doi:10.1007/s10921-020-0667-5.
- Çengel YA, Ghajar AJ. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 6th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2020.
- ANSYS Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide*. Release 2021 R2. Canonsburg, PA: ANSYS Inc.; 2021.
- ANSYS Inc. *ANSYS Fluent User's Guide*. Release 2021 R2. Canonsburg, PA: ANSYS Inc.; 2021.
- Usman M, Kim YK. *Pipe Insulation Evaluation for Low-Temperature District Heating Implementation in South Korea*. Front Energy Res. 2022;9:793557. doi:10.3389/fenrg.2021.793557.
- Dragovic H, Damaceno DS, Meyer OHH, Ervik Å. *Water Transport and Corrosion under Insulation: Experimental Investigations of Drying in Mineral wool*. Process Saf Environ Prot. 2024;190:198–210. doi:10.1016/j.psep.2024.07.034.