ANALISA EKONOMI SISTEM PERPIPAAN BOILER PADA PEMBANGKIT LISTRIK DENGAN PERBEDAAN SUHU INPUT, KETEBALAN INSULASI DAN JENIS INSULASI

Tarikh Azis Ramadani[1,*)], Noer Alif Ramadhan[2)], dan George Endri Kusuma[2)]

[1]Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111
[2]Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111

E-mail: tarikh@ppns.ac.id

Abstract

Rising global energy consumption is driving environmental issues that impact sustainable development. Boiler piping systems are one of the components that support the process, where heat loss affects operational costs. This study aims to evaluate annual energy costs and annual energy savings resulting from the effects of inlet temperature, insulation thickness, and insulation type under actual operating conditions. This study demonstrates a reduction in annual energy costs and an increase in annual energy savings when insulation thickness is increased. Conversely, an increase in inlet temperature results in higher annual energy costs and reduced annual energy savings. Rockwool insulation demonstrated the best performance compared to other types, with the lowest annual energy costs ranging from Rp 270,687,000 to Rp 286,406,000, and the highest annual energy savings ranging from Rp 9,198,580,000 to Rp 10,072,800,000 at a thickness of 60 mm. This study concludes that the use of 60 mm thick rockwool insulation is highly recommended for economic efficiency in industrial boiler piping systems.

Keywords: *annual energy cost, annual energy savings, boiler piping systems*

Abstrak

Meningkatnya konsumsi energi global memicu masalah lingkungan yang berdampak pada pembangunan berkelanjutan. Sistem perpipaan boiler merupakan salah satu komponen yang mendukung proses tersebut, di mana kehilangan panas memengaruhi biaya operasional. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi biaya energi tahunan dan penghematan energi tahunan yang diakibatkan oleh pengaruh suhu masuk, ketebalan isolasi, dan jenis isolasi dalam kondisi operasi aktual. Penelitian ini menunjukkan adanya penurunan biaya energi tahunan dan peningkatan penghematan energi tahunan ketika ketebalan isolasi ditingkatkan. Sebaliknya, peningkatan suhu masuk mengakibatkan biaya energi tahunan yang lebih tinggi dan penghematan energi tahunan yang berkurang. Isolasi rockwool menunjukkan kinerja terbaik dibandingkan jenis lainnya, dengan biaya energi tahunan terendah berkisar antara Rp 270.687.000 hingga Rp 286.406.000, serta penghematan energi tahunan tertinggi berkisar antara Rp 9.198.580.000 hingga Rp 10.072.800.000 pada ketebalan 60 mm. Studi ini menyimpulkan bahwa penggunaan isolasi rockwool dengan ketebalan 60 mm sangat direkomendasikan untuk efisiensi ekonomi pada sistem perpipaan boiler industri.

Kata Kunci: Biaya energi tahunan, penghematan energi tahunan, sistem perpipaan boiler

PENDAHULUAN

Energi merupakan aspek penting dalam pertumbuhan ekomomi global (Daşdemir et al., 2017). Namun, konsumsi energi yang meningkat menjadi salah satu permasalahan global yang diakibatkan oleh kegiatan industrialisasi, urbanisasi dan peningkatan populasi. Bahan bakar fosil merupakan salah satu sumber energi yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi global (Liu et al., 2026). Disisi lain, permasalahan lingkungkan seperti pemanasan global dan perubahan iklim akan muncul akibat proses pembakaran bahan bakar fosil yang menghasilkan emisi gas rumah kaca (Guclu et al., 2026). Hal ini mendorong terwujudnya pembangunan berkelanjutan yang dilakukan oleh sektor industri sebagai bentuk tanggung jawab terhadap emisi karbon, netralitas karbon dan dekarbonisasi (J. Cui et al., 2026).

Pada sektor industri, *boiler* merupakan alat yang digunakan untuk menciptakan uap air dalam proses pembangkitan energi yang biasanya untuk pemanasan dan generasi listrik (Ntonda et al., 2025). Kondisi pengoperasian sistem, keterkaitan dan interaksi antar peralatan, perubahan yang timbul akibat pemeliharaan, serta faktor lingkungan merupakan faktor yang mempengaruhi kinerja *boiler* (D. Zhang et al., 2026). Sistem perpipaan merupakan penunjang dalam transportasi fluida dimana akan mempengaruhi konsumsi bahan bakar yang digunakan di *boiler*. Konsumsi bahan bakar dapat mempengaruhi biaya operasi perusahaan. Analisa ekonomi pada sistem perpipaan telah diinvestigasi oleh beberapa peneliti terdahulu (Abujab & Abusafa, 2022; Y. Cui et al., 2026; Daşdemir et al., 2017; Khan et al., 2026; Liu et al., 2026; Salem et al., 2021). Penelitian terdahulu mengindikasikan adanya pengaruh ketebalan insulasi pipa dan jenis insulasi terhadap konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan di *boiler*. Seiring dengan peningkatan harga bahan bakar dan permintaan bahan bakar maka konsumsi energi dalam *boiler* khususnya aspek kehilangan panas di sistem perpipaan menjadi perhatian industri. Hal ini mendorong adanya analisa ekonomi dalam sistem perpipaan di *boiler* sehingga dapat mengetahui *annual energy cost* dan *annual energy savings*.

Berdasarkan penelitian terdahulu menunjukan adanya pengaruh ketebalan insulasi dan jenis insulasi sistem perpipaan terhadap analisa ekonomi. Namun, analisa ekonomi pada sistem perpipaan berdasarkan kondisi operasional aktual di boiler industri masih terbatas. Hal ini mendorong adanya penelitian mengenai analisa ekonomi untuk memprediksi dan mengevaluasi *annual energy cost* dan *annual energy savings*. *Annual*

energy cost dan *annual energy savings* dievalusi berdasarkan *inlet temperature*, ketebalan insulasi dan jenis insulasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan guna mengevaluasi *annual energy cost* dan *annual energy savings* dalam sistem perpipaan. *Annual energy cost* dan *annual energy savings* dievaluasi berdasarkan *inlet temperature* sebesar 175 C dan 190 C, ketebalan insulasi dari 0 hingga 100 mm dan jenis insulasi yaitu *rockwool*, *calcium silicate* dan *cellullar glass*. Tabel 1 menunjukan kondisi operasi dari sistem perpipaan. Tabel 2 dan 3 menunjukan data spesifikasi insulasi pipa dan data ekonomi yang digunakan dalam penelitian ini. Harga insulasi didasarkan pada harga yang ditawarkan oleh vendor pada awal tahap pembangunan pada tahun 2023. Data ekonomi merujuk pada nilai suku bunga dan laju inflasi Indonesia yang didokumentasikan oleh Bank Indonesia.

Tabel 1
Kondisi Operasi Sistem Perpipaan

Parameter	Keterangan
Material	ASTM A106 Gr. B
Suhu (C)	175 – 190
Tekanan (bar)	9
Kecepatan (m/s)	30
Mass flow rate (Kg/s)	2,78

Tabel 2
Data Spesifikasi Insulasi

Tipe Insulasi	Konduktifitas Termal (W/m.K)	Densitas (kg/m^3)	Biaya Insulasi (Rp/m^3)
Rockwool	0,055	80	Rp. 3.156.873,-
Calcium silicate	0,079	170	Rp. 5.175.262,-
Cellular glass	0,091	117	Rp. 5.786.072,-

Tabel 3
Data Ekonomi

Data	Keterangan
Inflation rate (%)	4
Interest rate (%)	5,75
Lifetime (Tahun)	25

Life cycle cost analysis diaplikasikan guna memprediksi *annual energy cost* dan *annual energy savings.* Persamaan berikut digunakan untuk mengitung *annual energy cost* (persamaan 1) dan *annual energy savings* (persamaan 7) (Daşdemir et al., 2017; Salem et al., 2021).

$$C_t = P_1 C_e + P_2 C_{ins} \quad (1)$$

$$C_e = M_f \times C_f \quad (2)$$

$$C_{ins} = C_i \times V \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{N}{1+i} \text{ ; jika i=d}_i \quad (4)$$

$$P_1 = \frac{1}{d_i - i}\left[1 - \left(\frac{1+i}{1+d_i}\right)^N\right] \text{ ; jika i} \neq \text{d}_i \quad (5)$$

$$P_2 = 1 + P_1 M_s - \frac{R_v}{(1+d_i)^N} \quad (6)$$

$$S_A = P_1 C'_e - P_2 C_{ins} \quad (7)$$

Dimana:

C_e = biaya bahan bakar tahunan (Rp per meter)

M_f = konsumsi energi tahunan (kg)

C_f = biaya bahan bakar (Rp/MMBTu)

C_{ins} = total biaya insulasi (Rp)

C_i = biaya material insulasi (Rp/m^3)

V = volume material insulasi (m^3)

P_l = *life cycle energy*

i = *interest rate*

f = *inflation rate*

N = *lifetime* (tahun)

M_s = biaya perawatan

R_v = rasio penjualan Kembali

C'_e = selisih antara biaya total bahan bakar untuk pipa tanpa insulasi dan insulasi

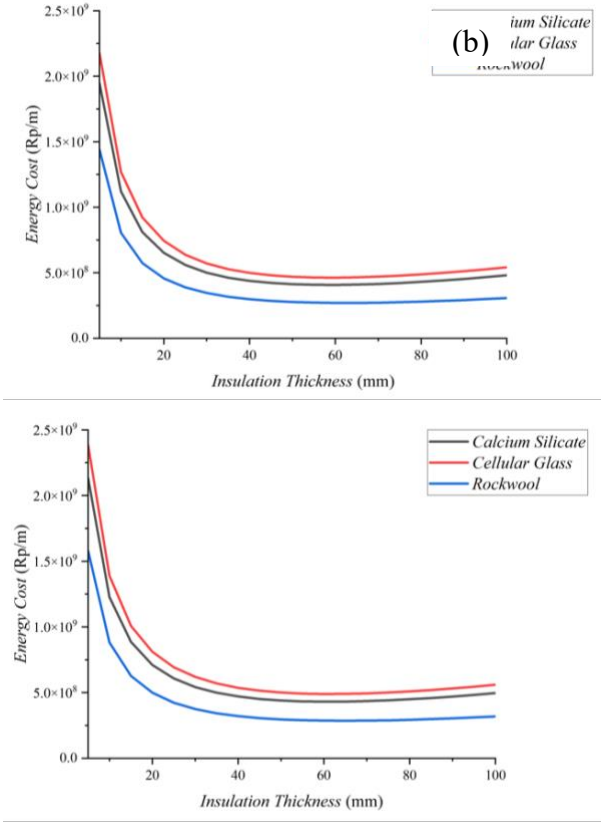
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh *inlet temperature*, ketebalan insulasi dan jenis insulasi terhadap nilai *annual energy cost* dan *annual energy savings*. *Annual energy cost* dan *annual energy savings* merupakan biaya yang muncul selama *lifetime* sistem perpipaan di industri. Gambar 1 menunjukan hasil *annual energy cost* yang dipengaruhi oleh ketebalan insulasi, jenis insulasi dan *inlet temperature*. Hasil menunjukkan bahwa semakin tebal insulasi akan memberi dampak pada penurunan *annual energy cost* pada sistem perpipaan. Hal tersebut bertolak belakang dengan perubahan *inlet temperature*

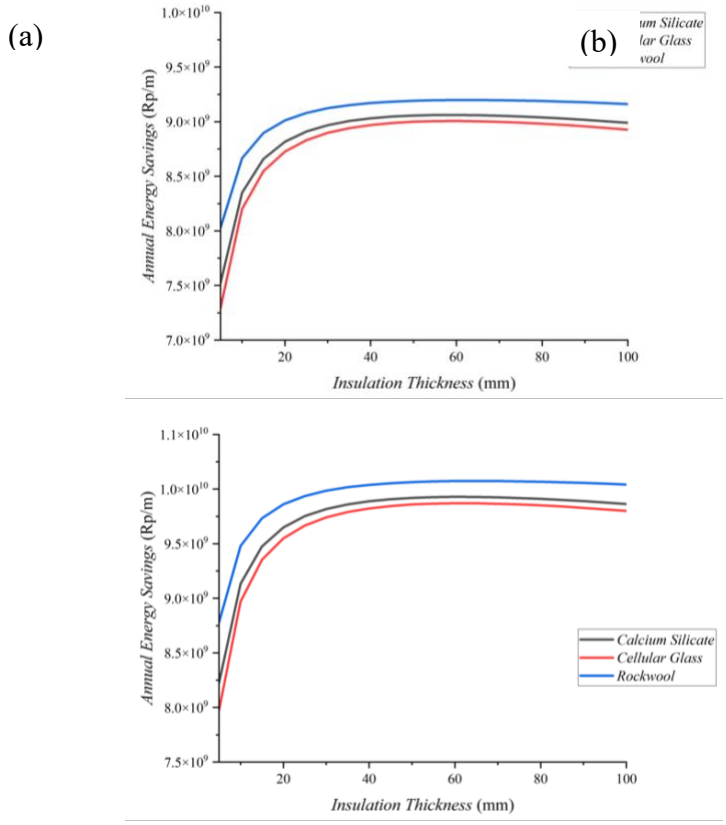
dimana semakin tinggi *inlet temperature* menghasilkan *annual energy cost* yang lebih tinggi. Selain itu, insulasi jenis *rockwool* menunjukan *annual energy cost* yang lebih rendah dibandingkan jenis lainnya. Insulasi *rockwool* menghasilkan *annual energy cost* sebesar Rp. 270.687.000,- hingga Rp. 286.406.000,- dan mampu mereduksi *annual energy cost* hingga mencapai 41,63% pada ketebalan 60 mm jika diaplikasikan pada system perpipaan.

Gambar 2 menunjukan hasil *annual energy savings* yang dipengaruhi oleh ketebalan insulasi, jenis insulasi dan *inlet temperature*. Penggunaan insulasi yang semakin tebal dan *inlet temperature* yang semakin tinggi pada sistem perpipaan menunjukan peningkatan *annual energy savings*. Insulasi *rockwool* menghasilkan tertinggi *annual energy savings* dibandingkan dengan jenis insulasi yang lain dengan nilai *annual energy savings* sebesar Rp 9.198.580.000,- hingga Rp. 10.072.800.000,-. Hasil ini didapatkan ketika ketebalan insulasi sebesar 60 mm diaplikasikan ke dalam sistem.

(a)



Gambar 1. Pengaruh ketebalan insulasi terhadap *annual energy cost* pada *inlet temperature* sebesar 175 C (a) dan 190 C (b)



Gambar 2. Pengaruh ketebalan insulasi terhadap *annual energy savings* (b) pada *inlet temperature* sebesar 175 C (a) dan 190 C (b)

Hasil penelitian menunjukan bahwa pengunaan insulasi dengan ketebalan 60 mm secara konsisten menghasilkan performa yang baik untuk semua jenis insulasi yang digunakan (Tabel 3). Ketebalan tersebut menghasilkan *annual energy savings* yang paling tinggi dan *annual energy cost* yang paling rendah dibandingkan ketebalan lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa ketebalan insulasi sebesar 60 mm merupakan hasil yang direkomendasikan untuk kondisi sistem yang digunakan. Beberapa penelitian terkait juga menghasilkan hasil yang serupa (Daşdemir et al., 2017; Kayfeci, 2014; Salem et al., 2021; L. Zhang et al., 2017).

Tabel 4
Pemilihan Insulasi Terbaik

Tipe Insulasi	*Inlet Temperature* (C)	Ketebalan (mm)	*Annual Energy Cost* (Rp/m)	*Annual Energy Savings* (Rp/m)
Rockwool	175	60	Rp. 270.687.000,-	Rp. 9.198.580.000,-
	190	65	Rp. 286.406.000,-	Rp. 10.073.800.000,-
Calcium silicate	175	60	Rp. 408.267.000,-	Rp. 9.061.230.000,-
	190	60	Rp. 432.186.000,-	Rp. 9.928.550.000,-

Cellular glass	175	60	Rp. 463.757.000,-	Rp. 9.005.860.000,-
	190	60	Rp. 491.225.000,-	Rp. 9.869.740.000,-

SIMPULAN

Studi ini menunjukan evaluasi *annual energy cost* dan *annual energy savings* telah berhasil dilakukan untuk kondisi operasi operasional aktual. Peningkatan ketebalan insulasi menunjukan adanya penurunan *annual energy cost* dan meningkatkan *annual energy savings*, sedangkan peningkatan *inlet temperature* berdampak pada kenaikan nilai keduanya. Insulasi jenis *rockwool* menunjukkan *annual energy cost* terendah sebesar Rp 270.687.000,- hingga Rp 286.406.000,-, serta menghasilkan *annual energy savings* tertinggi mencapai Rp 9.198.580.000,- hingga Rp 10.072.800.000,- pada ketebalan 60 mm. Untuk pengembangan penelitian ke depan, analisis ini dapat diperluas dengan mengintegrasikan perhitungan *payback period* investasi serta evaluasi terhadap potensi penurunan emisi karbon yang dihasilkan dari langkah efisiensi ini.

DAFTAR PUSTAKA

Abujab, M., & Abusafa, A. (2022). Optimal insulation's thickness of pipes in Variable Refrigerant Flow (VRF) system—An-Najah Child Institute as a case study. *Energy Reports*, *8*, 321–330. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.104

Cui, J., Xiao, Y., Yang, X., Zheng, Z., Zhu, L., Xu, B., Sun, J., Yang, S., Fu, Y., Pan, H., & Xu, Y. (2026). Investigation on HHO-assisted combustion performance and NOx emissions in pulverized coal boilers under low-load conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, *79*, 107791. https://doi.org/10.1016/j.csite.2026.107791

Cui, Y., Du, X., Jiang, K., Wei, H., & Xu, L. (2026). Retrofit scheme for coal-fired power plants based on molten salt thermal energy storage: New heat source side process overlapping solution and 4E analysis. *Applied Thermal Engineering*, *292*, 130324. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130324

Daşdemir, A., Ertürk, M., Keçebaş, A., & Demircan, C. (2017). Effects of air gap on insulation thickness and life cycle costs for different pipe diameters in pipeline. *Energy*, *122*, 492–504. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.125

Guclu, T., Cuce, P. M., & Cuce, E. (2026). Experimental 4E analysis (energy-exergy-economic-environmental) of hybrid parabolic trough collector-thermoelectric generator-phase change material cogeneration system. *Energy*, *349*, 140702. https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140702

Kayfeci, M. (2014). Determination of energy saving and optimum insulation thicknesses of the heating piping systems for different insulation materials. *Energy and Buildings*, *69*, 278–284. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.017

Khan, M. S., Bin, G., Imran, M., Yuntao, S., & Hussain, M. T. (2026). Energy, exergy and environmental analysis of Rankine cycle for a steady state CFETR power plant

with divertor as preheater. *Energy*, *349*, 140589. https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140589

Liu, Z., Ye, Y., Xu, Z., Zhang, H., Wang, H., Li, H., Jin, X., & Su, W. (2026). Analysis of 5E (energy, exergy, energy level, exergoeconomics, and exergetic sustainability) for a liquid CO2 energy storage system coupling solar energy and LNG. *Applied Thermal Engineering*, *299*, 131142. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131142

Ntonda, J., Lekané, N. N., Boupda, O., Kamhoua, A., & Lontsi, F. (2025). Thermodynamic analysis of a combined cooling and power system driven by waste exhaust heat from industrial boilers in the energy and climatic context of the city of Douala, Cameroon. *International Journal of Thermofluids*, *26*, 101150. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101150

Salem, E. A., Farid Khalil, M., & Sanhoury, A. S. (2021). Optimization of insulation thickness and emissions rate reduction during pipeline carrying hot oil. *Alexandria Engineering Journal*, *60*(3), 3429–3443. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.01.042

Zhang, D., Wang, R., Zhang, X., Zhu, J., & Gao, J. (2026). Boiler life state analysis based on energy flow model and multi-dimensional judgment. *Measurement*, *273*, 121136. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.121136

Zhang, L., Wang, Z., Yang, X., Jin, L., Zhang, Q., & Hu, W. (2017). Thermo-economic Analysis for Directly-buried Pipes Insulation of District Heating Piping Systems. *Energy Procedia*, *105*, 3369–3376. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.759