

Analisis Ketebalan Ekonomis Insulasi Pada Jalur Perpipaan Auxiliary Boiler Menuju Desalination Plant Dengan Fluida Superheated Steam

Noer Alif Ramadhan¹, George Endri Kusuma², Tarikh Azis Ramadani³

PT. Sekawan Kontrindo, Palembang, Indonesia¹

Program studi Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia²

Program studi Teknik Perpipaan, Jurusan Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia³

Email: noeralif@student.ppns.ac.id^{1*}; kusuma.george@ppns.ac.id²; tarikh@ppns.ac.id³;

Abstract – Piping installation that connects the Auxiliary Boiler to the Desalination Plant has a function to channel steam to the brine heater. Failure can occur due to fluid temperature not reaching the specifications of the machine, resulting in reduced efficiency. So it is necessary to do an analysis to find out the insulation that can affect the size of the fluid temperature. This research analyses more about the economic aspect, namely the economic thickness of the insulation used. The insulation material used is Cellular Glass with a thickness variation of 0 mm to 100 mm with a difference of 5 mm for each variation. Economic analysis, carried out using life cycle cost analysis, the results show that the economic thickness of the insulation is at a thickness of 70 mm with a total energy cost of Rp570.751.000, - per metres and annual energy savings of Rp12.402.200.000, - per metres.

Keyword: heat transfer, heat loss, life cycle cost analysis, economic thickness

Nomenclature

C_e	Biaya bahan bakar per tahun, Rp/tahun
C'_e	Selisih biaya bahan bakar pipa tanpa insulasi dengan pipa berinsulasi, Rp/tahun
C_f	Harga bahan bakar, Rp/MMBtu
C_i	Harga material insulasi, Rp/m ³
C_{ins}	Biaya total insulasi, Rp
C_t	Biaya total per tahun, Rp
d_i	Discount rate, %
H_u	Lower heating value dari bahan bakar, J/kg
HDD	Heating degree days, K-hari
i	Interest rate, %
M_f	Konsumsi bahan bakar per tahun, kg
N_{hr}	Jumlah jam beroperasi, jam/hari
P_1	Life cycle energy, unitless
P_2	Life cycle expenses, unitless
S_A	Biaya energy savings, Rp/m
T_a	Temperatur udara, K
T_f	Temperatur fluida pada pipa tanpa insulasi, K
ΔU	Overall Heat Transfer Coefficient, W/m ² K
V	Volume material insulasi, m ³
η_s	Efisiensi dari sistem pemanas, %

1. PENDAHULUAN

Salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) yang berlokasi di pulau Jawa terdapat beberapa area antara lain area auxiliary boiler dan desalination plant. Pada commissioning, temperatur fluida tidak mencapai minimal requirement dari brine heater dan menyebabkan efisiensi mesin menurun. Hal ini dapat diminimalisir dengan penggunaan insulasi pada sistem perpipaan. Insulasi yang digunakan harus optimal dari segi teknis dan ekonomis. Penggunaan bahan insulasi yang optimal akan menghemat biaya insulasi, energi dan

operasional biaya sistem perpipaan [1].

Oleh karena itu perlu dilakukan analisis untuk menentukan ketebalan ekonomis dari insulasi yang digunakan. Penentuan ketebalan insulasi yang optimal dapat menggunakan konsep life cycle cost analysis [2]. Life cycle cost analysis adalah salah satu metode penilaian ekonomi suatu item, sistem atau fasilitas, mengingat semua biaya yang signifikan atas kehidupan ekonomi. Pada penelitian ini, akan menganalisis ketebalan ekonomis menggunakan life cycle cost analysis pada kasus yang terdapat di proyek PLTGU tersebut.

2. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan ketebalan ekonomis insulasi pada sistem perpipaan. Penentuan ketebalan ekonomis pada sistem perpipaan menggunakan metode life cycle cost. Metode ini digunakan dikarenakan memperhitungkan biaya ekonomis dari segi kemampuan teknisnya.

Adapun material insulasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu Cellular Glass dengan variasi ketebalan 0 sampai 100 mm dengan selisih 5 mm setiap ketebalan. Material insulasi tersebut memiliki harga sebesar Rp5.786.072,- per m³. Adapun bahan bakar yang digunakan pada sistem pemanas adalah Natural Gas dengan efisiensi sebesar 92% dengan memiliki lower heating value 36950 kJ/kg. Bahan bakar Natural Gas memiliki harga sebesar Rp39.535,- per MMBtu. Adapun data penelitian yang digunakan pada penelitian ini, yaitu pada Tabel 1 menunjukkan data spesifikasi pipa pada sistem.

Tabel 1. Data spesifikasi pipa

Spesifikasi Pipa		
Diameter Pipa	Parameter	Nilai

Material	ASTM A106 Gr. B	
Konduktivitas Termal (W/m.K)	57,61	
NPS (inch)	6	
SCH	40	
DN150	Outside Diameter (m)	0,1683
	Inside Diameter (m)	0,15408
	Panjang (m)	147
NPS (inch)	8	
SCH	40	
DN200	Outside Diameter (m)	0,2191
	Inside Diameter (m)	0,20274
	Panjang (m)	8
NPS (inch)	12	
SCH	40	
DN300	Outside Diameter (m)	0,3238
	Inside Diameter (m)	0,30318
	Panjang (m)	39

Berdasarkan Tabel 1, menunjukkan data spesifikasi pipa mulai dari DN150 sampai DN300. Adapun data propertis fluida yang ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Data propertis fluida dan udara

Parameter	Fluida	Udara
Jenis fluida	Superheated steam	
Temperatur (K)	513	303
Tekanan (bar)	9	1
Kecepatan (m/s)	30	33,43
Konduktivitas termal (W/m.K)	0,03936	0,026341

Berdasarkan Tabel 2, menunjukkan data propertis fluida yang digunakan pada penelitian. Fluida yang digunakan pada proyek ini adalah *superheated steam*. Tabel 5 menunjukkan data ekonomi dari negara lokasi PLTGU. Data ekonomi ini diambil per bulan Mei 2023.

Tabel 3 Data ekonomi

Ekonomi			
Data	Notasi	Nilai	Satuan
Inflation rate	d_i	4	%
Interest rate	i	5.75	%

2.1. Konsumsi Energi per Tahun

Penentuan konsumsi energi per tahun terdapat beberapa metode yang bisa digunakan. Salah satu metode yang akurat dalam memprediksi konsumsi energi per tahun dapat menggunakan *degree days method*. Jumlah *heating degree days*, HDD dapat diprediksi dengan Persamaan 1 [3].

$$HDD = \sum_1^{365} (1 \text{ day}) \sum_1^{N_{hr}} (T_f - T_a) \quad (1)$$

dimana T_f adalah rata-rata temperatur sepanjang pipa dan diasumsikan menggunakan pipa tanpa insulasi. Penentuan T_f dapat menggunakan konsep tahanan termal. Adapun batasan temperatur.

$$T_f < T_a, \text{ HDD} = 0 \text{ (tidak ada pemanasan)}$$

$$T_f > T_a, \text{ HDD dapat dihitung menggunakan persamaan 1}$$

2.2. Annual Heat Loss

Penentuan *annual heat loss* dapat menggunakan Persamaan 2 sebagai berikut [1]

$$\Delta Q_L = 86400 \cdot HDD \cdot \Delta U \quad (2)$$

dimana ΔU merupakan selisih antara *overall heat transfer coefficient* pada pipa tanpa insulasi dan berinsulasi. Nilai 86400 merupakan representasi dari jumlah detik dalam satu hari $86400 = 24 \times 60 \times 60$ detik/hari. Dari Persamaan 2, dapat digunakan untuk menentukan konsumsi bahan bakar tahunan dengan menggunakan Persamaan 3 sebagai berikut.

$$M_f = \frac{\Delta Q_L}{H_u \eta_s} \quad (3)$$

dimana H_u adalah *lower heating value* dari jenis bahan bakar, J/kg, dan η_s adalah efisiensi dari sistem pemanasan.

2.3. Annual Energy Cost

Perhitungan *annual energy cost* dalam satu tahun dapat menggunakan metode P_1 - P_2 dengan mempertimbangkan biaya bahan bakar dan insulasi untuk *life cycle cost*. Perhitungan *annual energy cost* dapat menggunakan Persamaan 4.

$$C_t = P_1 C_e + P_2 C_{ins} \quad (4)$$

dimana C_e adalah total biaya bahan bakar yang dapat ditentukan dengan Persamaan 5. Sedangkan C_{ins} adalah total biaya insulasi yang dapat ditentukan dengan Persamaan 6.

$$C_e = M_f \times C_f \quad (5)$$

$$C_{ins} = C_i \times V \quad (6)$$

2.4. Annual Energy Savings

Penentuan *Annual Energy Savings* dapat ditentukan dari P_1 - P_2 *method* menggunakan Persamaan 7. [4]

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

dimana C'_e merupakan perbedaan antara biaya bahan bakar untuk pipa tanpa insulasi dan insulasi.

2.5. Ketebalan Ekonomis Insulasi

Penentuan ketebalan ekonomis dari insulasi dapat menggunakan nilai minimum dari total biaya energi (*annual energy cost*) atau nilai maksimum dari total biaya *energy saving*. Hal tersebut dapat dilihat pada Persamaan 8 dan 9.

$$\min_x C_t(X, HDD) = \sum P_1 C_e + \sum P_2 C_{ins} \quad (8)$$

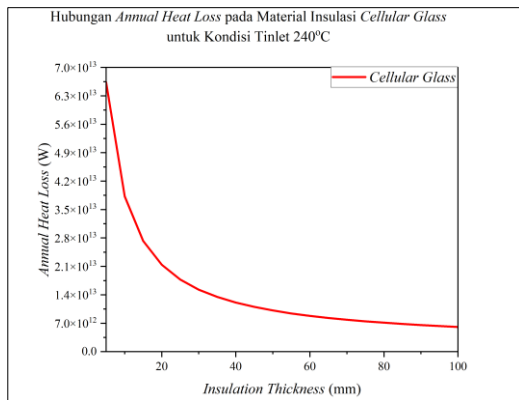
$$\max_x S_A(X, HDD) = \sum P_1 C'_e - \sum P_2 C_{ins} \quad (9)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, analisis ketebalan ekonomis pada insulasi menggunakan material insulasi *Cellular Glass* dan *Natural Gas* digunakan sebagai bahan bakar untuk sistem pemanas. Sistem perpipaan yang dianalisis terdapat tiga perbedaan diameter yaitu DN150, DN200, dan DN300. Sedangkan variasi ketebalan insulasi yang digunakan antara 0 mm sampai 100 mm dengan selisih tiap variasi adalah 5 mm.

3.1. Annual Heat Loss

Metode HDD dapat memprediksi jumlah *heating degree days* per tahun dengan menggunakan Persamaan 1, didapatkan nilai HDD menurun dari 619580 K-days ke 91391 K-days. Adapun data *overall heat transfer coefficient* adalah menurun dari 137,603 ke 2,762 W/m²K seiring bertambahnya ketebalan dari insulasi yang digunakan. Nilai *annual heat loss* dapat ditentukan dengan Persamaan 3. Berdasarkan Gambar 1, nilai *annual heat loss* pada cenderung menurun seiring bertambahnya nilai ketebalan material insulasi yang digunakan terjadi penurunan *annual heat loss* dari 66,37 TW ke 6,09 TW. Hal ini bisa terjadi karena kemampuan dari insulasi sebagai isolator panas yang akan menahan panas pada sistem perpipaan tersebut keluar ke udara. Kemampuan ini direpresentasikan ke dalam istilah konduktivitas termal.

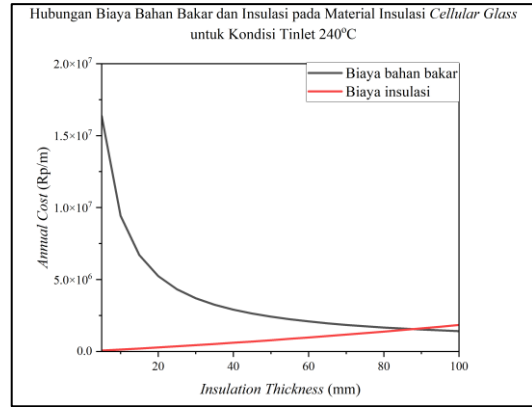


Gambar 1. Hubungan Annual Heat Loss terhadap material insulasi

3.2. Annual Energy Cost

1.) Biaya bahan bakar dan Biaya Insulasi

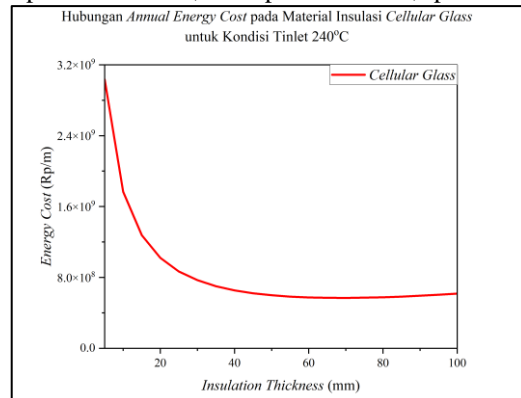
Biaya bahan bakar dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 5, sedangkan biaya insulasi dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 6. Berdasarkan Gambar 2, didapatkan hasil bahwa harga total biaya bahan bakar pada cenderung menurun seiring dengan bertambahnya ketebalan insulasi material, sedangkan harga total biaya insulasi cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya ketebalan insulasi material. Hal ini berarti bahwa penggunaan insulasi pada sistem, konsumsi bahan bakar cenderung berkurang dan lebih menghemat biaya dari pemakaian bahan bakar tersebut. Harga total biaya bahan bakar menurun dari Rp16.366.000,- ke Rp1.409.329,- per meter, sedangkan harga total biaya insulasi meningkat dari Rp66.002,- ke Rp1.838.107,- per meter.



Gambar 2. Hubungan biaya bahan bakar dan insulasi untuk material insulasi

2.) Total Energy Cost

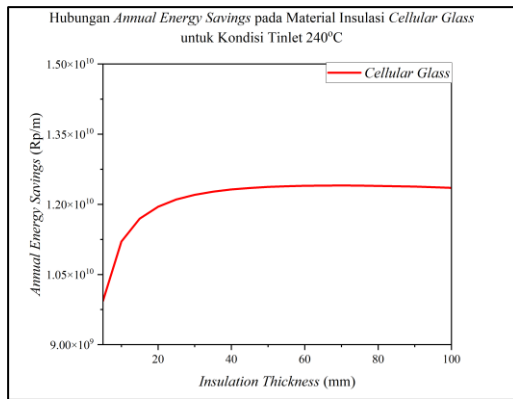
Perhitungan total *energy cost* dapat menggunakan Persamaan 4. Berdasarkan Gambar 3, total *energy cost* pada penelitian ini cenderung menurun seiring bertambahnya ketebalan material insulasi. Namun terdapat titik balik yang mengakibatkan *energy cost* meningkat seiring bertambahnya ketebalan dari insulasi. Hal ini terjadi dikarenakan biaya total bahan bakar terjadi penurunan, sedangkan total biaya insulasi mengalami peningkatan. Total *energy cost* menurun dari Rp3.504.630.000,- ke Rp618.533.000,- per meter.



Gambar 3. Hubungan total energy cost untuk material insulasi

3.3. Annual Energy Savings

Penentuan *annual energy savings* ditentukan menggunakan Persamaan 7. Berdasarkan Gambar 4, biaya *annual energy savings* pada penelitian ini cenderung meningkat seiring bertambahnya ketebalan material insulasi. Biaya *annual energy savings* meningkat dari Rp9.935.410.000,- ke Rp12.353.900.000,- per meter. Biaya *annual energy savings* berbanding terbalik dengan total *energy cost*, biaya *annual energy savings* menunjukkan biaya yang bisa dihemat saat insulasi digunakan.



Gambar 4. Hubungan annual energy savings pada material insulasi

pp. 492–504, 2017, doi:
10.1016/j.energy.2017.01.125.

3.4. Ketebalan Ekonomis Insulasi

Setelah menentukan total *energy cost* dan biaya *annual energy savings*, selanjutnya dapat menentukan ketebalan ekonomis dari insulasi yang digunakan dengan Persamaan 8 dan 9. Penentuan ketebalan ekonomis menggunakan *software Microsoft Excel*. Penentuan tersebut didapatkan dari nilai minimum pada total *energy cost* dan nilai maksimum pada *annual energy savings*. Dari Persamaan 8 dan 9 didapatkan ketebalan ekonomis insulasi pada ketebalan 70 mm dengan total *energy cost* sebesar Rp570.751.000,- /m dan biaya *annual energy savings* sebesar Rp12.402.200.000,- /m.

4. KESIMPULAN

Dari perhitungan yang sudah dilakukan didapatkan kesimpulan bahwa ketebalan ekonomis pada penelitian ini adalah material insulasi *Cellular Glass* dengan ketebalan 70 mm dengan total *energy cost* sebesar Rp570.751.000,- per meter dan biaya *annual energy savings* sebesar Rp12.402.200.000,- per meter.

5. PUSTAKA

- [1] E. A. Salem, M. Farid Khalil, and A. S. Sanhoury, "Optimization of Insulation Thickness And Emissions Rate Reduction During Pipeline Carrying Hot Oil," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 3, pp. 3429–3443, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.01.042.
- [2] A. Keebaş, M. Ali Alkan, and M. Bayhan, "Thermo-Economic Analysis of Pipe Insulation For District Heating Piping Systems" *Appl Therm Eng*, vol. 31, no. 17–18, pp. 3929–3937, 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.07.042.
- [3] U. İlhan, "Optimum Insulation Thickness For Pipes In District Heating Systems – Review," *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 225–232, Dec. 2018, doi: 10.30464/jmee.2018.2.3.225.
- [4] A. Daşdemir, M. Ertürk, A. Keçebaş, and C. Demircan, "Effects Of Air Gap On Insulation Thickness And Life Cycle Costs For Different Pipe Diameters In Pipeline," *Energy*, vol. 122,