

Analisis Perbandingan Kinerja Termal Material Isolasi untuk Thermal Jacket Turbin Uap pada Kondisi Suhu Tinggi

Zein Muhamad, Riza Muhida, Muhammad Riza, Erry Yulian T Adesta, Indra Surya, Bambang Pratowo, Kunarto, Harjono Saputro, Mulyana, Eros Fauzan Ahwat

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Bandar Lampung, Bandar Lampung, 35143, Indonesia
Email: zein.muhamad@ubl.ac.id

Abstrak Kehilangan panas pada sistem turbin uap berdampak langsung terhadap efisiensi termal dan konsumsi energi pembangkit listrik. Penerapan thermal jacket dengan material isolasi yang tepat menjadi salah satu solusi untuk meminimalkan kehilangan panas pada permukaan turbin bersuhu tinggi. Penelitian ini bertujuan menganalisis dan membandingkan kinerja termal lima jenis material isolasi, yaitu Glasswool, Silica, Needle Mat, Knitmesh, dan PTFE Fiberglass, pada aplikasi thermal jacket turbin uap. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dan analisis teoritis berdasarkan hukum konduksi panas Fourier satu dimensi dalam kondisi tunak. Model pengujian berupa silinder baja karbon berdiameter 200 mm dan panjang 400 mm yang dipanaskan hingga 1200°C, dengan suhu lingkungan 30°C. Variasi ketebalan isolasi yang diuji adalah 50 mm, 75 mm, dan 100 mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa laju perpindahan panas berbanding lurus dengan konduktivitas termal material dan berbanding terbalik dengan ketebalan isolasi. Knitmesh menghasilkan laju perpindahan panas terendah sebesar 2340 W pada ketebalan 50 mm dengan konduktivitas termal 0,10 W/m·K. Needle Mat menunjukkan performa yang mendekati dengan laju perpindahan panas 2808 W pada ketebalan yang sama. Sebaliknya, Glasswool dan Silica menunjukkan laju perpindahan panas yang lebih tinggi. Pemilihan material isolasi yang tepat terbukti berpengaruh signifikan terhadap reduksi kehilangan panas dan peningkatan efisiensi termal sistem. Knitmesh direkomendasikan untuk aplikasi suhu tinggi pada turbin uap, sedangkan Needle Mat dapat menjadi alternatif dengan pertimbangan optimasi biaya.

Kata kunci, isolasi termal, turbin uap, thermal jacket, konduksi panas, hukum Fourier.

1 Pendahuluan

Judul Turbin uap merupakan komponen utama dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap yang berfungsi mengonversi energi termal menjadi energi mekanik. Pada proses operasinya, sebagian energi panas hilang ke lingkungan melalui mekanisme konduksi, konveksi,[1] dan radiasi dari permukaan casing turbin. Kehilangan panas

ini menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan dan berpotensi meningkatkan konsumsi bahan bakar.[2]

Penerapan sistem isolasi termal berupa thermal jacket merupakan metode yang umum digunakan untuk mengurangi kehilangan panas tersebut. Efektivitas thermal jacket sangat dipengaruhi oleh sifat termal material isolasi, terutama nilai konduktivitas termal (k), ketahanan suhu maksimum, dan ketebalan lapisan isolasi.

Beberapa material isolasi yang umum digunakan pada aplikasi industri bersuhu tinggi antara lain Glasswool, Silica, Needle Mat, Knitmesh, dan PTFE Fiberglass. Namun, karakteristik konduktivitas termal dan batas suhu kerja masing-masing material berbeda, sehingga diperlukan analisis komparatif untuk menentukan material yang paling sesuai untuk aplikasi turbin uap bersuhu tinggi.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja termal berbagai material isolasi menggunakan pendekatan eksperimental dan analisis teoritis berdasarkan hukum Fourier dalam kondisi tunak.

2 Material dan Metode Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi untuk proses pemanasan, pemasangan isolasi, serta pengukuran temperatur permukaan. Spesifikasi alat dijelaskan sebagai berikut: Silinder Baja Karbon, Elemen Pemanas Listrik, Thermogun Inframerah (Testo 872), Mesin Jahit Industri, Alat Potong (Gunting dan Cutter), Alat Ukur Panjang (Penggaris dan Meteran).

Bahan utama dalam penelitian ini adalah material isolasi termal yang digunakan sebagai thermal jacket. Karakteristik utama yang diperhatikan adalah konduktivitas termal dan ketahanan suhu maksimum. Glasswool, Silica Blanket, Needle Mat, Knitmesh, PTFE Fiberglass.



Gambar 1. Needle Mat adalah material isolasi berbentuk lembaran serat yang didapatkan menggunakan metode needle punching.

2.2. Metode

Penelitian ini dilakukan di Perusahaan X. Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan analisis teoritis. Model thermal jacket dipasang pada silinder baja karbon yang dipanaskan menggunakan pemanas listrik. Pengukuran dilakukan pada suhu operasi 300–1200°C untuk setiap material dan variasi ketebalan 50 mm, 75 mm, dan 100 mm.

Perhitungan laju perpindahan panas dilakukan menggunakan Hukum Fourier:

Dimana:

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

q = laju perpindahan panas (W),

k = konduktivitas thermal (W/m·K),

A = luas penampang perpindahan panas (m²),

$\frac{dT}{dx}$ = gradien suhu.

Dengan mengintegrasikan persamaan diferensial untuk kasus konduksi satu dimensi keadaan tunak yang diperoleh bentuk:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2)$$

Hasil perhitungan digunakan untuk menentukan efisiensi isolasi dan ketebalan optimal masing-masing material.

2.3. Rencana Desain

Desain pengujian pada penelitian ini dibuat untuk mendokumentasikan kondisi nyata pada permukaan turbin uap. Pengujian model menggunakan silinder baja karbon sebagai representasi casing turbin dengan diameter 200 mm dan panjang 400 mm. Permukaan luar silinder dibalut dengan bahan isolasi sesuai variasi yang diteliti, yaitu Glasswool, Silica, Needle Mat, Knitmesh, dan PTFE Fiberglass.

Setiap material dipasang dalam bentuk *thermal jacket* dengan tiga variasi ketebalan, yaitu 50 mm, 75 mm, dan 100 mm. Lapisan luar dilengkapi dengan pelindung aluminium foil untuk meminimalkan kehilangan panas akibat radiasi. Sumber panas diperoleh dari pemanas listrik yang dipasang di bagian dalam silinder, silinder panas turbin uap dengan rentang suhu 300–1200°C.

Sensor suhu (thermogun Testo 872) digunakan untuk mengukur suhu pada permukaan luar jaket termal guna menentukan efisiensi isolasi tiap bahan. Desain ini memungkinkan perbandingan langsung antar material terhadap penurunan suhu permukaan dan kestabilan termal.



Gambar 2. *Thermal Jacket*

2.4. Proses Fabrikasi

Proses penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

Persiapan Alat dan Material

Semua alat seperti pemanas listrik, thermogun, dan silinder baja karbon disiapkan serta dikalibrasi. Bahan isolasi (Glasswool, Silica, Needle Mat, Knitmesh, dan PTFE Fiberglass) dipotong sesuai ukuran silinder.

Pembuatan *Thermal Jacket*

Bahannya diisolasi dan dibentuk menyerupai selimut silinder (jaket). Lapisan pelindung aluminium foil dipasang pada sisi luar untuk melindungi isolasi dari radiasi dan kerusakan mekanis.

Proses Pemanasan dan Pemanasan

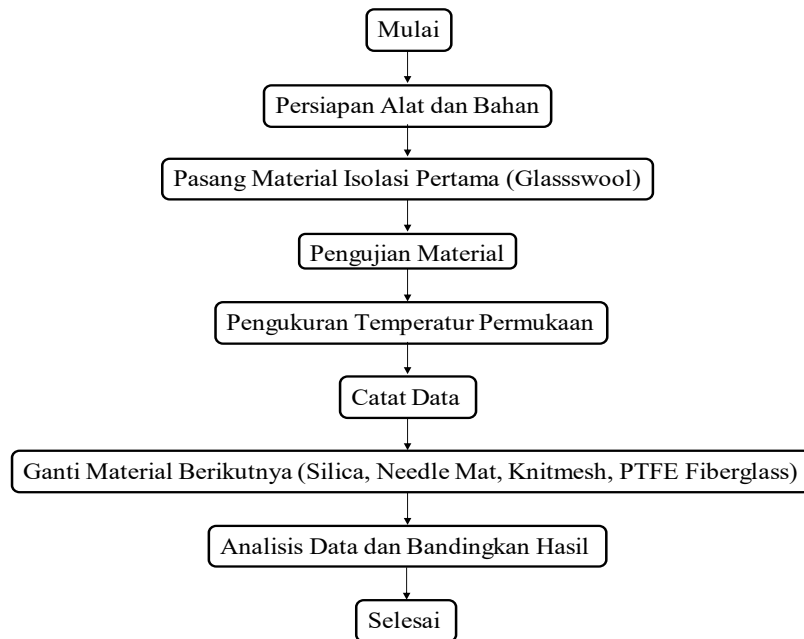
Pemanasan listrik dinyalakan hingga mencapai suhu yang diinginkan (300°C – 1200°C). Setelah kondisi stabil, suhu permukaan luar *thermal jacket* diukur pada beberapa titik menggunakan thermogun Testo 872.

Pengumpulan dan Analisis Data

Data hasil pengukuran suhu digunakan untuk menghitung laju pergerakan panas dengan rumus Hukum Fourier. Nilai efisiensi termal dihitung berdasarkan perbandingan antara suhu sumber panas dengan suhu permukaan luar isolasi.

Evaluasi dan Interpretasi Hasil

Setiap hasil pengujian dibandingkan antar material dan antar ketebalan untuk menentukan kombinasi paling efisien dalam menahan panas serta material paling layak diterapkan pada *thermal jacket* turbin uap..



Gambar 2. Diagram Alir

2.5. Perhitungan Knitmesh

Perhitungan laju perpindahan panas dilakukan untuk menentukan kemampuan tiap material isolasi dalam menahan panas pada kondisi suhu operasi turbin uap 1200°C dengan suhu lingkungan 30°C. Persamaan yang digunakan mengacu pada Hukum Konduksi Fourier satu dimensi dalam keadaan tunak, yaitu:

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Karena gradien temperatur dianggap linear dan nilai konduktivitas termal konstan pada tiap lapisan isolasi, maka bentuk persamaan dapat disederhanakan menjadi:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (4)$$

Dimana:

- Q= laju perpindahan panas (W),
- k= Konduktivitas termal (W/m·K),
- A= luas permukaan silinder (1 m²),
- T₁= suhu sisi dalam (1200°C),
- T₂= suhu sisi luar (30°C),
- L= Ketebalan isolasi (m).

Perbedaan suhu antar sisi ($\Delta=T_1-T_2=1170^\circ\text{C}$) digunakan untuk semua material.

2.6. Perhitungan (Material Knitmesh)

Pada Diketahui:

- $k = 0,10 \text{ W/m K}$
- $A = 1 \text{ m}^2$
- $T_1 - T_2 = 1170 \text{ }^\circ\text{C}$
- $L = 0,05 \text{ m}$

$$q = 0, \times 1 \times \frac{1170}{0,05} = 0, \times 23400 = 2340 \text{ W}$$

(5)

Maka laju perpindahan panas melalui material Knitmesh pada ketebalan 50mm adalah 2340 W.

Efisiensi isolasi dapat dihitung menggunakan:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\% = \frac{1170}{1200} \times 100\% = 97,5\%$$

(6)

2.7. Hasil Perhitungan untuk Semua Maerial

Perhitungan dilakukan pada tiga variasi ketebalan ($L=0.05\text{m}$; $0,075\text{m}$; dan $0,1\text{m}$) Hasilnya ditampilkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 1. Hasil Perhitungan Laju Perpindahan Panas (q) tiap Material

Material	k (W/m·K)	L (m)	q (W)	Efisiensi (%)
Glasswool	0,40	0,05	9360	97,5
		0,075	6240	97,5
		0,10	4680	97,5
Silica	0,70	0,05	16.380	97,5
		0,075	10.920	97,5
		0,10	8.190	97,5
Needle Mat	0,12	0,05	2/808	97,5
		0,075	1.872	97,5
		0,10	1.404	97,5
Knitmesh	0,10	0,05	2.340	97,5
		0,075	1.560	97,5
		0,10	1.170	97,5
PTFE Fiberglass	0,25	0,05	5.850	97,5
		0,075	3.900	97,5
		0,10	2.925	97,5

2.8. Analisis Hasil dan Perhitungan

Uraikan Dari hasil pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa laju perpindahan panas q berbanding lurus dengan nilai konduktivitas termal k dan berbanding terbalik dengan ketebalan isolasi L .

Nilai q terendah diperoleh pada Knitmesh (2340 W) untuk ketebalan 50 mm, sedangkan Silica dan Glasswool menghasilkan nilai q tertinggi (>9000 W), yang menunjukkan kemampuan isolasi yang lebih buruk.

Peningkatan ketebalan isolasi terbukti menurunkan nilai q secara proporsional, misalnya untuk Knitmesh, dari 2340 W (50 mm) menjadi 1560 W (75 mm) dan 1170 W (100 mm). Hal ini membuktikan bahwa semakin tebal lapisan isolasi, semakin kecil panas yang diteruskan ke lingkungan.

Berdasarkan hasil tersebut, material Knitmesh memiliki performa termal terbaik, diikuti oleh Needle Mat, karena keduanya memiliki nilai k yang sangat rendah (0,10 dan 0,12 W/m·K) serta tahan terhadap suhu hingga 1200°C.

Material Glasswool dan PTFE Fiberglass tidak direkomendasikan untuk area bersuhu tinggi karena konduktivitas termalnya tinggi dan rentan terhadap degradasi di atas 300°C.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Perhitungan Laju Perpindahan Panas

Perhitungan laju perpindahan panas dilakukan menggunakan persamaan konduksi satu dimensi keadaan tunak berdasarkan Hukum Fourier dengan asumsi luas permukaan 1 m² dan perbedaan suhu (ΔT) sebesar 1170°C antara sisi dalam (1200°C) dan lingkungan (30°C).

Tabel berikut menunjukkan hasil perhitungan laju perpindahan panas (q) untuk masing-masing material pada variasi ketebalan 50 mm, 75 mm, dan 100 mm.

Tabel 2. Laju Perpindahan Panas pada Berbagai Material Isolasi

Material	k (W/m·K)	q (50 mm) (W)	q (75 mm) (W)	q (100 mm) (W)
Glasswool	0,40	9.360	6.240	4.680
Silica	0,70	16.380	10.920	8.190
Needle Mat	0,12	2.808	1.872	1.404
Knitmesh	0,10	2.340	1.560	1.170
PTFE Fiberglass	0,25	5.850	3.900	2.925

Nilai konduktivitas yang rendah menunjukkan kemampuan material dalam menghambat laju perpindahan panas. Dengan demikian, Knitmesh dan Needle Mat memiliki potensi performa termal terbaik untuk digunakan sebagai isolasi pada *thermal jacket* turbin uap.

3.2. Analisis Pengaruh Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal merupakan parameter utama yang menentukan kemampuan material dalam menghantarkan panas. Berdasarkan persamaan Fourier:

Semakin besar nilai konduktivitas termal, semakin besar laju panas yang dihantarkan. Material Silica menunjukkan nilai konduktivitas tertinggi ($0,70 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), sehingga menghasilkan laju perpindahan panas terbesar pada seluruh variasi ketebalan. Sebaliknya, Knitmesh memiliki konduktivitas terendah ($0,10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) sehingga menghasilkan nilai q paling kecil.

Pada ketebalan 50 mm, perbandingan performa menunjukkan:

Silica menghasilkan panas 7 kali lebih besar dibanding Knitmesh.

Glasswool menghasilkan panas hampir 4 kali lebih besar dibanding Needle Mat.

Knitmesh mampu menurunkan laju perpindahan panas sebesar $\pm 85\%$ dibanding Silica.

Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan material dengan konduktivitas rendah sangat krusial dalam sistem isolasi suhu tinggi sederhana.

3.3. Analisis Pengaruh Konduktivitas Termal

Efisiensi termal untuk semua material secara teoritis mencapai sekitar 97,5 %, karena perbandingan dihitung terhadap suhu sumber panas ($1200 \text{ }^\circ\text{C}$) dan suhu lingkungan ($30 \text{ }^\circ\text{C}$).

Meskipun secara numerik efisiensinya serupa, laju perpindahan panas menunjukkan perbedaan signifikan antar material.

Knitmesh dan Needle Mat memiliki laju perpindahan panas terendah, menunjukkan performa termal tertinggi dalam menjaga kestabilan suhu permukaan luar turbin.

3.4. Pengaruh Ketebalan Isolasi

Ketebalan lapisan isolasi memiliki pengaruh besar terhadap laju perpindahan panas.

Pada material Knitmesh:

- $L=0,05 \text{ m} \rightarrow q=2340 \text{ W}$
- $L=0,075 \text{ m} \rightarrow q=1560 \text{ W}$
- $L=0,10 \text{ m} \rightarrow q=1170 \text{ W}$

Nilai q turun seiring peningkatan ketebalan, menegaskan hubungan berbanding terbalik antara q dan L sesuai dengan Hukum Fourier. Semakin tebal lapisan isolasi, semakin efektif material dalam menahan panas.

3.4. Perbandingan Material dan Rekomendasi

Dari keseluruhan hasil, material dengan performa terbaik berturut-turut adalah:

- 1) Knitmesh — konduktivitas $0,10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, laju q terendah (2 340 W).
- 2) Needle Mat — konduktivitas $0,12 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, nilai q mendekati Knitmesh.
- 3) PTFE Fiberglass — performa sedang, namun suhu maksimum rendah ($\leq 300 \text{ }^\circ\text{C}$).
- 4) Glasswool dan Silica — laju q tinggi ($> 9\,000 \text{ W}$) dan tidak cocok untuk suhu di atas $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dengan demikian, Knitmesh direkomendasikan sebagai material utama *thermal jacket* turbin uap, sedangkan Needle Mat dapat menjadi alternatif ekonomis dengan performa hampir setara.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis teoritis dan perhitungan laju perpindahan panas menggunakan hukum konduksi satu dimensi keadaan tunak, dapat disimpulkan bahwa sifat konduktivitas termal dan ketebalan isolasi merupakan parameter dominan dalam menentukan kinerja *thermal jacket* pada turbin uap bersuhu tinggi.

Laju perpindahan panas terbukti berbanding lurus dengan konduktivitas termal material dan berbanding terbalik dengan ketebalan isolasi. Peningkatan ketebalan dari 50 mm menjadi 100 mm mampu menurunkan laju perpindahan panas hingga sekitar 50% pada seluruh material yang diuji.

Dari lima material yang dianalisis, Knitmesh menunjukkan kinerja termal terbaik dengan konduktivitas termal $0,10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ dan laju perpindahan panas terendah sebesar 2.340 W pada ketebalan 50 mm. Needle Mat memiliki performa yang mendekati dengan konduktivitas $0,12 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ dan laju perpindahan panas sebesar 2.808 W, sehingga dapat dipertimbangkan sebagai alternatif dengan pertimbangan efisiensi biaya.

Material Glasswool dan PTFE Fiberglass memiliki keterbatasan pada suhu operasi tinggi dan menghasilkan laju perpindahan panas yang relatif lebih besar, sehingga kurang direkomendasikan untuk aplikasi pada permukaan turbin dengan suhu ekstrem.

Secara keseluruhan, pemilihan material isolasi yang tepat dan optimasi ketebalan lapisan isolasi berkontribusi signifikan terhadap pengurangan kehilangan panas dan peningkatan efisiensi termal sistem turbin uap. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan agar analisis diperluas dengan mempertimbangkan mekanisme perpindahan panas gabungan (konduksi, konveksi, dan radiasi) serta validasi eksperimental pada sistem turbin skala industri.

Referensi

- [1] I. Y. A. Çengel dan A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, 5th ed.* New York, NY, USA, 2015.
- [2] A. S. L. F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed.* Hoboken, NJ, USA, 2011.

- [3] A. Bejan, *Convection Heat Transfer, 4th ed.* Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013.

- [4] R. Kumar dan A. Sharma, "Effect of thermal insulation on performance of steam turbines: A case study," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 18, 2020, Art. no. 100623.

- [5] ASTM C892-15, *Standard Specification for High-Temperature Fiber Blanket Thermal Insulation.* West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2015.

- [6] A. Bahadori, *Thermal Insulation Handbook for the Oil, Gas, and Petrochemical Industries.* Oxford, U.K.: Gulf Professional Publishing, 2014.

- [7] J. P. Holman, *Heat Transfer, 10th ed.* New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010.

- [8] D. W. Hahn dan M. N. Özisik, *Heat Conduction, 3rd ed.* Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012.

- [9] M. Kaviany, *Principles of Heat Transfer in Porous Media, 2nd ed.* New York, NY, USA: Springer, 2011.

- [10] B. A. Boley dan J. H. Weiner, *Theory of Thermal Stresses.* Mineola, NY, USA: Dover Publications, 1997.