

APLIKASI INDUSTRIAL MATERIAL INSULASI TERMAL UNTUK LAYANAN TEMPERATUR OPERASI 140 °C

Handoko Subawi¹, Asep Suhana², Hartono³

^{1,2)} Sekolah Tinggi Teknologi Mandala, Bandung, Jawa Barat

³⁾ Politeknik Penerbangan Surabaya, Surabaya, Jawa Timur

Corresponding author

E-mail: subawihandoko@gmail.com



Diterima : 14 - 7 - 2025
Direvisi : 31 - 7 - 2025
Dipublikasi : 11 - 8 - 2025

Abstrak: Studi ini mengkaji kelayakan pemasangan insulator termal terhadap jaringan pipa sistem boiler industri. Material *glass wool* diinginkan dapat memenuhi kriteria peredaman panas uap pada tekanan operasi 3,8 bar. Metoda yang digunakan untuk pendekatan ini adalah metoda eksperimental. Suhu uap mengacu pada data termodinamika uap air dilakukan cek silang melalui pengukuran suhu pada bagian dinding luar pipa *steam header*. Sedangkan perhitungan kelayakan insulator divalidasi dengan hasil pengukuran langsung diatas lapisan penutup *glass wool*. Pengukuran temperatur dilakukan menggunakan peralatan *temperature gun* yang dikalibrasi. Hasil pengukuran langsung terhadap lapisan luar insulator adalah 47,8 °C. Hasil perhitungan simulasi untuk memenuhi kriteria temperatur terluar 45-60 °C memerlukan ketebalan *glass wool* antara 30 hingga 37 mm. Berdasarkan hasil dari kajian ini, dapat dikatakan bahwa tebal *glass wool* 35 mm dinilai memenuhi persyaratan teknis dan aman digunakan untuk keperluan industri.

Kata Kunci: *Glass wool*, insulator, konduksi, konveksi, termal

Abstract: This study examines the feasibility of installing thermal insulator on the industrial boiler system's piping network. Glass wool material is desired to meet the steam heat damping criteria at an operating pressure of 3.8 bar. The method used for this approach is experimental method. Steam temperature refers to thermodynamic data of water vapor, which is cross-checked by measuring the temperature on the outer wall of the steam header pipe. Meanwhile, the calculation of the suitability of the insulator is validated with the results of direct measurements on the glass wool cover. Temperature measurements are carried out using calibrated temperature gun equipment. The direct measurement result of the outer layer of the insulator is 47.8 °C. The results of calculations to meet the outer temperature criteria of 45-60 °C require a glass wool thickness of between 30 and 37 mm. Based on the results of this study, it can be said that a 35 mm glass wool thickness is considered to meet the technical requirements and is safe for use for industrial purposes.

● PENDAHULUAN

Dalam dunia industri, aliran energi termal hasil pemanasan uap air (*steam*) seringkali dimanfaatkan sebagai tenaga penggerak mesin produksi, pemanas cairan proses, dan kegiatan laboratorium. Industri farmasi, misalnya, menggunakan energi termal sebagai media pemanas cairan pelapis obat agar mudah menempel pada permukaan obat. Secara umum, penggunaan panas uap ini seringkali dianggap lebih aman dibandingkan penggunaan api secara langsung. Pembentukan uap panas ini umumnya dihasilkan oleh mesin *boiler*.

Pada sistem *boiler*, uap panas yang terbentuk dialirkan menuju *steam header* yang berfungsi sebagai lokasi awal pendistribusian uap ke beberapa bagian unit pemroses. Bejana ini umumnya terbuat dari pipa logam sehingga bersifat menghantarkan panas. Temperatur dalam *steam header* akan cepat menurun jika bagian pipa ini tidak dilengkapi lapisan pelindung untuk mencegah kebocoran termal.

Sistem peredam panas berupa lapisan insulator termal ini dimaksudkan agar panas dalam *steam header* tidak mudah mengalami kebocoran. Selain itu, peredam panas berguna sebagai pelindung bagi operator yang berinteraksi langsung dengan mesin sehingga dapat bekerja dengan aman. Temperatur uap dalam *steam header* perlu dijaga stabil untuk menyediakan energi yang stabil bagi kegiatan mesin produksi yang memerlukan uap panas tersebut. Bejana *steam header* perlu dilindungi dengan material mampu tahan panas, misalnya *glass wool* yang dibungkus oleh lapisan aluminium tipis. Konsumsi insulasi *glass wool* di seluruh dunia diperkirakan tumbuh 3% untuk mencapai 6,4 juta metrik ton pada tahun 2030 (Knauf, 2025).

Material *glass wool* banyak digunakan sebagai peredam panas karena dinilai mampu menahan panas cukup baik. Material *glass wool* ini tahan terhadap panas dan tidak mudah terbakar. *Glass wool* terbuat dari serat *glass* yang berbentuk seperti bulu domba. Aplikasi *glass wool* ini tergolong sangat mudah, asalkan dipasang secara tepat. Material *glass wool* perlu dipasang dengan ketebalan merata, menutup celah secara sempurna untuk mencegah kebocoran. Umumnya *glass wool* dilapisi plat aluminium tipis sebagai pembungkus dinding pipa bagian luar. Lapisan aluminium dinilai praktis karena mudah dibentuk sebagai lapisan pembungkus (*jacketing*) bagi lapisan *glass wool*. Lapisan aluminium perlu ketebalan tertentu sehingga optimal dalam aplikasinya.

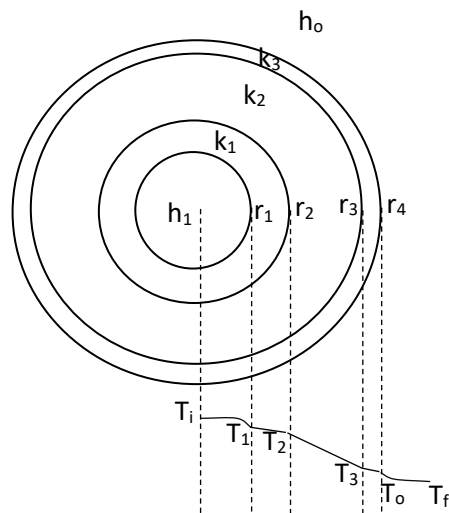
Mengingat fenomena perpindahan panas dalam skala industri memiliki peran penting bagi keberhasilan proses produksi, maka pengkajian proses perpindahan panas menjadi sangat penting. Objek kajian perpindahan panas yang dipilih adalah unit *steam header* dalam sistem *boiler* industri. Material insulator yang ditinjau adalah *glass wool* yang dibungkus dengan plat tipis aluminium. Penelitian ini difokuskan untuk menilai efektivitas kinerja material insulasi dalam meredam panas pada bagian *steam header* dalam sistem *boiler* industri.

KAJIAN PUSTAKA

○ Perpindahan Panas

Mekanisme perpindahan panas yang terjadi di dalam pipa akibat perbedaan temperatur fluida di dalam pipa terhadap udara luar merupakan perpindahan panas secara konveksi dan konduksi (Samsol dkk., 2019; Midiani, 2025). Skema penampang melintang arah rambatan panas

melewati pipa dan lapisan pelindung digambarkan seperti Gambar 1.



Gambar 1. Skema perambatan panas melewati pipa

Gambar tersebut mengilustrasikan proses perambatan panas dapat merambat secara konveksi dan konduksi. Pertama, perpindahan panas di dalam aliran fluida uap terjadi secara konveksi. Aliran fluida terjadi karena adanya perbedaan massa jenis. Aliran konveksi yang ditinjau adalah konveksi aliran fluida uap di dalam pipa *steam header*. Mekanisme perpindahan panas secara konveksi menurut Hukum Newton untuk pendinginan, dapat dinyatakan sebagai:

$$Q_{konveksi} = h A (T_i - T_1) \quad (1)$$

dimana:

$Q_{konveksi}$: laju perpindahan panas konveksi (W)

h : koefisien hambatan termal konveksi ($W/m^2.K$)

A : luas permukaan (m^2)

T_i : temperatur uap di dalam pipa *steam header* (K)

T_1 : temperatur permukaan dalam pipa *steam header* (K)

Kedua, perpindahan panas secara konduksi melewati jenis material padat yang sama yakni material pipa, material insulator, dan material pembungkus. Laju perambatan panas pada suatu material padat ditentukan oleh hambatan (konduktivitas) termal dari jenis material tersebut. Konduktivitas (hambatan) termal dijadikan suatu indikator hambatan rambatan panas melewati suatu padatan pada ketebalan tertentu. Laju perpindahan panas secara konduksi mengikuti Hukum Fourier, dan dapat dinyatakan sebagai:

$$Q_{konduksi} = - \frac{k A (T_1 - T_o)}{\Delta x} \quad (2)$$

imana:

Q_{konduksi} : laju perpindahan panas konduksi (W)
 T_i : temperatur dinding bagian dalam *steam header* (K)
 T_o : temperatur permukaan insulator terluar (K)
 k : koefisien hambatan termal konduksi (W/m.K)
 A : luas permukaan (m^2)
 Δx : ketebalan rambatan panas keseluruhan (m)

Berdasarkan kedua persamaan diatas, hambatan termal dalam sistem pipa secara keseluruhan menjadi

$$Q_{\text{all}} = C_{\text{all}} (T_1 - T_o) \quad (3)$$

dimana:

Q_{all} : laju perpindahan panas keseluruhan (W)
 T_i : temperatur uap di dalam pipa *steam header* (K)
 T_o : temperatur permukaan insulator terluar (K)
 C_{all} : konstanta hambatan termal keseluruhan (W/K)

Perpindahan panas secara konveksi yaitu konveksi uap. Perpindahan panas secara konveksi di udara tidak dibahas karena pengukuran dilakukan terhadap posisi pelapis aluminium. Mekanisme perpindahan panas secara konduksi terjadi melewati pipa, insulasi, dan *cladding* aluminium. Tetapan C_{all} merupakan koefisien perpindahan panas menyeluruh dan dapat dinyatakan sebagai:

$$C_{\text{all}} = \frac{2 \pi L_{\text{steam header}}}{\frac{1}{h_i r_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_3} + \frac{1}{h_o r_4}} \quad (4)$$

Panas menjalar melewati dinding pipa secara berurutan (seri) mulai dari bagian di dalam pipa *steam header* menuju arah penampang ke lingkungan, melewati dinding pipa dan lapisan insulator. Pendekatan hasil perhitungan dilakukan untuk mengetahui nilai tebal insulasi *glass wool* ketika persyaratan temperatur pada bagian luar insulator ditentukan (45-60 °C).

o Insulator Termal

Insulator merupakan sebuah material yang memiliki sifat penghantar zat yang buruk, artinya material ini tidak dapat menghantarkan panas dengan baik. Material ini biasanya berupa zat padat tertentu yang berasal dari alam, ataupun bahan sintetik yang telah diproses. Material ini sering digunakan pada berbagai macam alat kebutuhan rumah tangga maupun alat keselamatan. Sebagai contoh material insulator adalah: batu bata, kayu, serat glass, karet, *glass wool*, dan lain-lain.

Material *glass wool* merupakan material peredam suara dan panas yang cukup baik, terbuat dari bahan serat *glass* yang tidak mudah terbakar dan tahan terhadap panas (SNI, 2017; Salih, 2021). *Glass wool* ini sering digunakan sebagai peredam panas pada sebuah benda atau juga sebagai peredam suara pada sistem pembuangan kendaraan bermotor. Material *glass wool* tidak mudah terbakar, tidak beracun, dan tahan terhadap korosi; memiliki tingkat kelembaban rendah (Jeon, dkk, 2017). Bahan penggunaan bisa dipotong secara acak menurut kebutuhan

konstruksi.

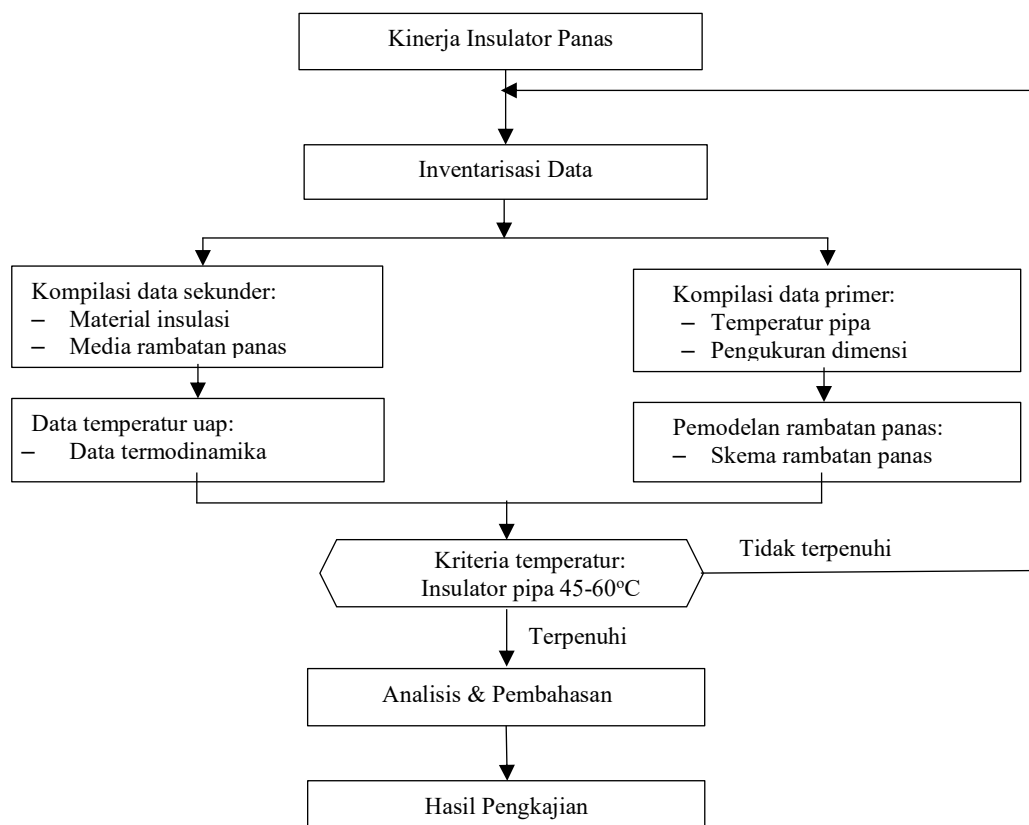
Produk *glass wool* ini adalah bahan papan yang terbuat dari wool yang super ramping ditambah dengan taburan resin fenolik pengikat untuk fungsi penekanan, pemanasan dan pepadatan. Produk *glass wool* ($<32 \text{ kg/m}^3$) relatif lebih ringan dibandingkan *rock wool* (40 kg/m^3) dapat tersedia dengan ditutup kain atau aluminium foil (Premier, 2023; Rockwool, 2025). Material *glass wool* komersial aman digunakan hingga $400 \text{ }^\circ\text{C}$.

o Pelapis Aluminium

Lapisan aluminium digunakan sebagai material pembungkus *glass wool*. Penggunaan aluminium sebagai pembungkus atau *jacketing* bertujuan untuk melindungi *glass wool* dari kerusakan. Pemasangan yang benar akan memaksimalkan peredaman panas. Sifat aluminium yang menonjol adalah berat jenisnya yang rendah. Logam aluminium bersifat tahan terhadap korosi pada media yang berubah-ubah dan juga mempunyai duktilitas yang tinggi. Material aluminium ini memiliki massa jenis $2,7 \text{ gr/cm}^3$ dan titik lebur 660° C . material ini tahan terhadap korosi, ringan dan mudah dibentuk.

• METODE PENELITIAN

Penelitian ini fokus mengkaji kinerja insulator *glass wool* sebagai media peredam panas. Objek yang diteliti adalah *steam header* pada peralatan *boiler*. Gambar 2 menampilkan metodologi penelitian dalam bentuk diagram alir.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Tahap awal riset adalah kompilasi data primer dan data sekunder yang diperlukan untuk perhitungan kinerja insulator. Selanjutnya dievaluasi apakah insulator yang terpasang dapat memenuhi kriteria temperatur aman yang diijinkan. Analisis dilakukan melalui perhitungan sehingga diperoleh rentang ketebalan yang aman untuk jenis insulator yang dikaji.

o Distribusi Termal

Luas Steam Header. Boiler yang dikaji dilengkapi dengan *steam header* untuk menghimpun produk uap yang dihasilkan. Diameter *steam header* adalah 12-inch, yang setara dengan 0,3048 meter. Panjang *steam header* adalah 3 meter. Luas permukaan silinder *steam header* (A), dapat dihitung menggunakan rumus:

$$A = \pi d L \quad (5)$$

dimana:

d adalah diameter bejana tekan (0,3048 m),

L adalah panjang bejana tekan (3 m).

Temperatur Steam Header. Temperatur pada permukaan *steam header* dan pada permukaan *jacketing* insulasi diukur selama 5 jam dan dilakukan pengukuran setiap 10 menit (Gambar 3). Pengukuran temperatur dilakukan menggunakan peralatan *thermometer gun* tipe *Fluke 62 MAX+ Handheld Infrared Laser Thermometer*. Pengukuran temperatur dilakukan terhadap bagian pipa terbuka dan bagian pipa yang terlapsi oleh insulator glass wool & aluminium.



Gambar 3. Temperatur *in-situ* pipa *steam header*
(a) Tanpa insulator, (b) Tertutup insulator

o Pelindung Termal

Dimensi insulator. Observasi dan pengukuran sifat fisik material glass wool dilakukan untuk keperluan data awal simulasi perhitungan. Sifat fisik yang diamati antara lain: tampilan (*appearance*), ketebalan lapisan, kondisi material, dimensi fisik, kondisi penyimpanan, spesifikasi teknis, dan lain-lain. Pengukuran ketebalan dikerjakan menggunakan jangka sorong terhadap material insulasi yang digunakan. Hasil pengukuran dicatat untuk digunakan sebagai bahan analisis data selanjutnya.

○ Peredaman Panas

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental. Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung terhadap mesin boiler milik industri farmasi di Bandung. Data primer tersebut dikombinasikan data sekunder sebagai bahan analisis dan perhitungan kinerja insulasi termal. Mekanisme perpindahan panas mengikuti hukum Fourier untuk proses perpindahan panas konduksi dan hukum Newton untuk perpindahan panas konveksi.

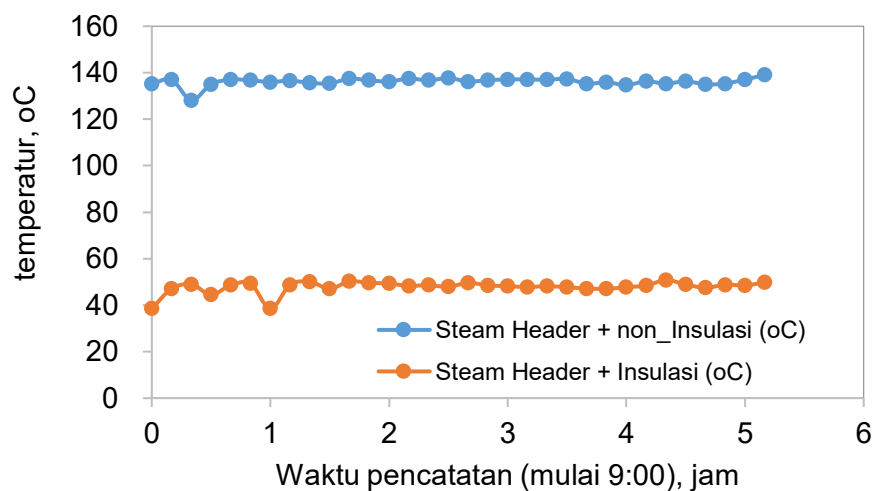
Evaluasi kinerja penyerapan termal yang optimal dengan mengevaluasi data primer, data literatur dan observasi langsung. Rencana peredaman panas diinginkan mencapai temperatur pada permukaan insulator 45 – 60 °C sehingga tingkat paparan termal dari area sekitar *steam header* yang diterima oleh manusia pada area tersebut tergolong aman.

● HASIL DAN PEMBAHASAN

○ Temperatur Pipa Distribusi

Standar internasional yang membahas standar perpipaan dilengkapi dengan *personal protection insulation* ialah *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 1055. Dalam ketentuan tersebut, dibahas penentuan kondisi yang dapat diterima pada sistem yang menggunakan panas. Sebagai gambaran, bahwa pipa dan peralatan yang beroperasi dengan temperatur fluida lebih dari 54 °C atau di bawah 10 °C harus diisolasi sebagai perlindungan terhadap luka bakar atau beku bagi personel hingga ketinggian 2,1 m di atas permukaan tanah dan platform dan 0,6 m di luar platform, jalan setapak, dan lain-lain, dengan pengecualian bahwa saluran yang beroperasi di atas 200 °C harus diisolasi sepenuhnya.

Sumber area panas di industri umumnya berasal dari mesin *boiler*. Sistem *boiler* dilengkapi dengan *steam header* sebagai komponen distribusi termal dari uap yang dihasilkan. *Steam header* dilapisi insulator pelindung untuk mencegah kebocoran termal. Pengukuran temperatur pada area *steam header* dilakukan pada bagian luar lapisan insulator (*jacketing*), dan bagian celah pipa (terbuka) tanpa lapisan insulator. Data hasil pengukuran temperatur pada bagian *steam header* ditampilkan dalam bentuk kurva sesuai Gambar 4.



Gambar 4. Data pengukuran temperature *in-situ*

Pemasangan insulasi ditentukan pada lokasi yang sering terjadi atau kemungkinan kontak dengan manusia. Insulator pipa dipasang untuk mencegah paparan temperatur tinggi dari fluida di dalam pipa ke lingkungan. Secara teknis, kestabilan temperatur fluida yang mengalir di dalam pipa perlu terjaga, baik untuk kondisi panas (*hot insulation*) atau kondisi dingin (Muhiedeen dkk, 2020). Temperatur permukaan pipa yang di pasang *personal protection insulation* dikehendaki berkisar antara 45-60 °C. Temperatur permukaan yang akan kontak langsung dengan manusia tidak boleh berbeda dari temperatur ruangan 25 °C.

○ Media Rambatan Termal

Media rambatan termal yang dimaksudkan mencakup: dinding pipa *steam header*, lapisan insulator *glass wool*, dan lapisan *jacketing* plat aluminium. Tabel 1 menunjukkan spesifikasi material yang dilewati perpindahan panas dalam kajian ini.

Tabel 1. Spesifikasi material

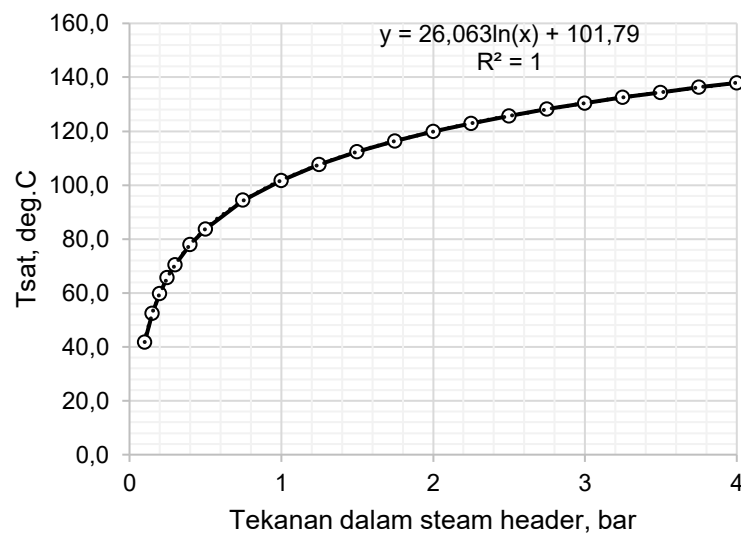
No	Parameter	Nilai
1	<i>Steam header</i>	
	– Material pipa baja	black steel
	– Konduktivitas termal, $k_{\text{pipa hitam}}$	15 W/m.K
	– Ketebalan pipa : t_{pipa}	10,3 mm
2	<i>Insulator</i>	
	– Material	glass wool
	– Konduktivitas termal, $k_{\text{glass wool}}$	0,04 W/m.K
	– Ketebalan glass wool: $t_{\text{glass woold}}$	35 mm
3	<i>Jacketing</i>	
	– Material jacketing	aluminium
	– Konduktivitas termal, $k_{\text{aluminium}}$	205 W/m.K
	– Ketebalan aluminium, $t_{\text{aluminium}}$	0,6 mm

○ Penentuan Temperatur Uap

Penentuan nilai temperatur uap (T_i) ditentukan melalui pendekatan regresi terhadap nilai tabel uap. Angka pada tabel termodinamika uap air mencantumkan temperatur uap pada tekanan nol hingga 1,25 bar. Oleh karena itu penentuan temperatur uap pada tekanan 3,8 bar atau 4 bar perlu dilakukan ekstrapolasi terhadap data statistik tersebut. Hasil dari ekstrapolasi temperatur uap jenuh ditampilkan dalam bentuk grafik sesuai Gambar 5 berikut ini. Aktualnya, sistem boiler dioperasikan pada rentang tekanan 3,8 – 4,0 bar, sehingga perkiraan terbaik nilai temperatur uap dalam *steam header* yang diperoleh berkisar 136,7 °C hingga 137,9 °C.

Penerapan metoda perkiraan regresi melalui program komputer masih kurang memuaskan, akrena menghasilkan simpangan signifikan. Akhirnya dipilih metoda manual dengan memperhatikan trends perhitungan komputer. Nilai regresi temperatur pada bagian dalam pipa

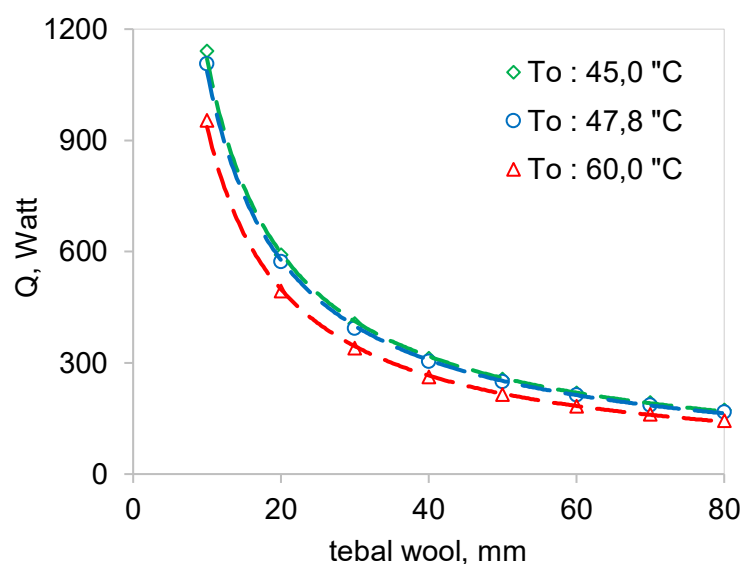
steam header yang diperoleh divalidasi dengan hasil pengukuran lapangan pada bagian dinding luar pipa *steam header*.



Gambar 5. Grafik ekstrapolasi temperatur uap

o Perhitungan Laju Aliran Termal

Perhitungan perpindahan panas konduksi dan konveksi dalam sistem *steam header* pada peralatan *boiler* menggunakan variabel tebal *glass wool*, sedangkan tebal *jacketing* bahan aluminium tidak divariasikan. Hasil simulasi perhitungan tebal *glass wool* dalam sistem *steam header* pada peralatan *boiler* disajikan dalam bentuk grafik sesuai Gambar 6. Kurva aliran termal terhadap tebal *glass wool* ditampilkan pada tiga kondisi yakni nilai batas temperatur insulator pipa terluar pada 45 °C (warna kurva hijau) dan 60 °C (warna kurva merah), serta temperatur insulator pipa terluar aktual 47,8 °C (warna kurva biru).



Gambar 6. Kinerja *glass wool* sesuai ketebalan

● KESIMPULAN DAN SARAN

○ Kesimpulan

- Berdasarkan sistem proteksi panas uap dari mesin boiler yang dikaji, mekanisme perpindahan panas pada *steam header* melewati lapisan padatan yakni: dinding pipa *black steel* ($k = 15 \text{ W/m.K}$), material lapisan *glass wool* ($k = 0,04 \text{ W/m.K}$), dan material lapisan aluminium ($k = 205 \text{ W/m.K}$).
- Ditinjau dari kemampuan material dalam menghambat kebocoran termal, material *glass wool* memiliki kemampuan termal yang baik dengan konduktivitas termal 0.04 W/m.K .
- Temperatur aktual dinding-luar *steam header* yang diproteksi insulator aktual rata-rata $47,8 \text{ }^\circ\text{C}$ dengan tebal *glass wool* 35 mm dinilai aman dan memenuhi persyaratan teknis sistem insulasi pada peralatan boiler antara $45\text{-}60^\circ\text{C}$.

○ Saran

- Kebutuhan tebal *glass wool* dianjurkan antara 30 - 37 mm, untuk pengoperasian *boiler* pada tekanan 3,8 - 4 bar.
- Frekuensi inspeksi terhadap pemasangan insulator pelindung perpipaan jaringan *boiler* perlu dilakukan secara berkala agar meningkatkan kualitas keamanan *boiler*.

● DAFTAR RUJUKAN

- American Society for Testing and Materials. 14 April 2020. *Standard guide for heated system surface conditions that produce contact burn injuries*. ASTM C1055-20.
- Jeon, C.K., Lee, J.S., Chung, H., Kim, J.H., and Park, J.P. 2017. "A study on insulation characteristics of glass wool and mineral wool coated with a polysiloxane agent". *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2017.
- Knauf. 2025. *Glass wool or fiberglass insulation – a global market overview*. Industry Expert. 4600 Visé, Belgium.
- Midiani, L.P.I. 2025. *Dasar-dasar perpindahan panas*. Perpindahan Panas. Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali, Badung.
- Muhseldeen, M.W., Yang, L.Z., Lye, L.C., Adam, N.M. 2020. "Analysis of optimum thickness of glass wool roof thermal insulation performance". *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. Vol. 76 (3), pp: 1-11.
- Premier. 2023. *Glasswool insulation*. Datasheet. Premier Glass Wool Ceiling Segments.
- Rockwool. 2023. *How to choose the right mineral wool for insulation*. Advertorial.
- Salih, T.W.M. 2021. *Insulation materials fundamentals and applications*. Mustansiriyah University, College of Engineering. Baghdad, Iraq.
- Samsol, Pudyastuti, K., dan Lie, N.M. Desember 2019. "Material insulasi terhadap efek kehilangan panas pada jalur pipa panas bumi". *Jurnal Petro*. Vol. VIII (4).
- Standar Nasional Indonesia. 2017. *Bahan isolasi panas, penyerap suara dan tahan api, dari mineral wool*. Badan Standarisasi Nasional. SNI 8421-2017.