

Analisis Perhitungan Heat Loss pada Electric Superheater Melalui Variasi Jumlah Heater dan Isolator

Syalif Fadhilah Rohman¹, Belyamin^{1*}, Candra Damis Widiawaty¹

Haolia Rahman¹, Akhmad Junaidi²

¹)Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

²)Badan Riset dan Inovasi Indonesia (BRIN), Jakarta, Indonesia

*Corresponding author: belyamin@mesin.pnj.ac.id

Abstrak

Electric superheater berfungsi untuk meningkatkan temperatur uap hingga mencapai kondisi superheated steam. Namun, operasi pada temperatur tinggi menyebabkan terjadinya kehilangan panas (heat loss) ke lingkungan yang dapat menurunkan kinerja termal sistem. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi jumlah band heater dan penggunaan isolator Ceramic Fiber terhadap temperatur permukaan, temperatur outlet steam, dan heat loss pada electric superheater. Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimental yang dipadukan dengan perhitungan matematis menggunakan metode resistansi termal. Pengujian dilakukan pada tekanan operasi 1 atm dengan variasi penggunaan 2, 3, 4, dan 5 band heater pada kondisi tanpa isolator dan menggunakan isolator Ceramic Fiber setebal 25 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan isolator Ceramic Fiber menghasilkan temperatur permukaan yang lebih rendah dan temperatur outlet steam yang lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa isolator. Selain itu, nilai heat loss pada kondisi tanpa isolator meningkat dari 185,8 W menjadi 281,8 W, sedangkan pada kondisi menggunakan isolator meningkat dari 72,7 W menjadi 108,6 W. Penggunaan isolator Ceramic Fiber mampu menurunkan heat loss lebih dari 59% pada seluruh variasi jumlah band heater, dengan penurunan terbesar mencapai 61,5% pada penggunaan 5 band heater. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan isolator Ceramic Fiber efektif dalam mengurangi kehilangan panas ke lingkungan sehingga dapat meningkatkan kinerja termal electric superheater. Kata-kata kunci: Band heater, Ceramic Fiber, Electric superheater, Heat loss, Hambatan termal.

Abstract

Electric superheaters are used to increase steam temperature to achieve superheated steam conditions. However, operation at high temperatures causes heat loss to the surrounding environment, which can reduce the thermal performance of the system. This study aims to analyze the effect of the number of band heaters and the application of Ceramic Fiber insulation on surface temperature, outlet steam temperature, and heat loss in an electric superheater. The research employed a quantitative experimental approach combined with a thermal resistance method for heat loss calculation. Experiments were conducted at an operating pressure of 1 atm using 2, 3, 4, and 5 band heaters under two conditions: without insulation and with 25 mm Ceramic Fiber insulation. The results showed that the insulated system produced lower surface temperatures and higher outlet steam temperatures than the uninsulated system. In addition, heat loss increased from 185.8 W to 281.8 W without insulation, while it ranged from 72.7 W to 108.6 W with Ceramic Fiber insulation. The application of Ceramic Fiber insulation reduced heat loss by more than 59% for all band heater variations, with the highest reduction of 61.5% achieved using 5 band heaters. These findings indicate that Ceramic Fiber insulation effectively minimizes heat loss to the surroundings and improves the thermal performance of the electric superheater.

Keywords: Band heater, Ceramic Fiber, Electric superheater, Heat loss, Thermal resistance.

1. PENDAHULUAN

Penggunaan uap panas lanjut (*superheated steam*) dalam aplikasi pengeringan industri semakin diminati karena menghasilkan proses dehidrasi yang cepat, merata, dan menjaga kualitas nutrisi produk [1][2][3]. Dalam sistem ini, *electric superheater* berperan vital untuk memanaskan uap hingga melampaui suhu saturasinya [1]. Namun, pengoperasian alat ini pada temperatur tinggi (150°C - 180°C) sangat rentan mengalami kehilangan panas (*heat loss*) ke udara lingkungan melalui rambatan konduksi pada dinding pipa dan terlepas lewat konveksi bebas [4][5]. Besarnya energi yang terbuang ini sangat bergantung pada parameter operasional, khususnya jumlah elemen pemanas (*band heater*) yang aktif serta keberadaan lapisan pelindung termal, sehingga berpotensi menurunkan efisiensi konsumsi energi jika tidak dirancang dengan tepat.

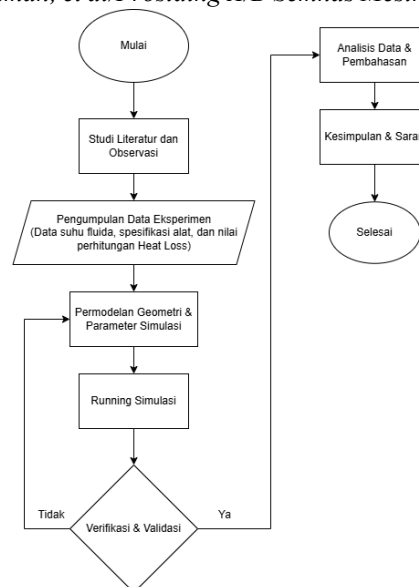
Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan material isolasi termal pada sistem perpipaan uap mampu mengurangi *heat loss* secara signifikan sehingga efisiensi energi sistem meningkat. Selain itu, peningkatan daya atau jumlah elemen pemanas akan meningkatkan temperatur fluida, tetapi juga meningkatkan kehilangan panas apabila tidak diimbangi dengan sistem isolasi yang memadai.

Untuk meminimalisir pemborosan energi tersebut, penelitian ini bertujuan mengkaji dan menghitung besaran *heat loss* pada *electric superheater* skala laboratorium melalui pendekatan matematis resistansi termal [6]. Evaluasi kinerja termal dilakukan dengan memvariasikan jumlah *band heater* (mulai dari 2 hingga 5 unit) serta membandingkan kondisi pipa telanjang (*bare pipe*) dengan pipa yang dilapisi isolator *Ceramic Fiber* berketebalan 25 mm. Melalui analisis perhitungan komparatif ini, diharapkan dapat ditentukan kombinasi parameter operasional yang paling efisien untuk menekan rugi-rugi panas, sekaligus memastikan sistem tetap mampu mencapai target suhu uap yang diharapkan.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji karakteristik termal sistem *superheater* maupun efektivitas material isolator dalam menekan *heat loss*. Trojan [7] menggunakan pemodelan komputasional untuk memetakan sebaran suhu pada *convective steam superheater* skala boiler industri, sedangkan Granda dkk. [8] mengevaluasi kinerja *superheater* pada kondisi operasi tunak dan transien dengan tingkat kesalahan prediksi suhu di bawah 3,2%. Di sisi lain, Li dkk. [9] mengoptimalkan ketebalan isolator berbasis pendekatan biaya siklus hidup pada sistem perpipaan uap, namun belum mengaitkannya dengan variasi jumlah elemen pemanas elektrik. Penelitian-penelitian tersebut masih terbatas pada skala boiler berbahan bakar atau optimasi isolator yang terpisah dari sumber panas elektrik, sehingga belum menjawab bagaimana kombinasi jumlah *band heater* dan penggunaan isolator *Ceramic Fiber* memengaruhi besaran *heat loss* pada *superheater* elektrik skala laboratorium. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis komparatif *heat loss* antara pipa tanpa isolator dan berisolator pada empat variasi jumlah *band heater* sekaligus, menggunakan pendekatan resistansi termal yang koefisien konveksinya dihitung melalui korelasi Churchill-Chu dan divalidasi dengan data pengukuran temperatur permukaan secara langsung.

2. METODE PENELITIAN

Pendekatan yang diterapkan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif eksperimental yang dipadukan dengan perhitungan teoretis perpindahan panas. Desain eksperimen ini dirancang secara khusus untuk mengkaji seberapa besar pengaruh variabel bebas, yakni variasi jumlah *band heater* dan penggunaan material isolator termal, terhadap variabel terikat yang meliputi profil temperatur sistem dan laju kehilangan panas (*heat loss*). Adapun rincian tahapan pelaksanaan dan prosedur analitik penelitian ini diilustrasikan lebih lanjut melalui diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir

Penelitian ini dimulai dengan tahap persiapan penelitian yang meliputi studi literatur mengenai prinsip dasar termodinamika serta penyiapan instalasi alat dan bahan. Selanjutnya, proses dilanjutkan ke tahap pengujian dan pengambilan data. Pada tahap ini, instalasi alat uji dirangkai untuk kemudian dilakukan pengukuran parameter operasi, yang mencakup pengukuran suhu uap masuk (dijaga pada 100°C dan 1 atm), suhu permukaan pipa pada variasi 2, 3, 4, dan 5 *heater* (baik tanpa pelindung maupun dengan isolator), serta suhu keluaran uap (*outlet steam*). Data hasil pengukuran tersebut kemudian dievaluasi kestabilan dan kevalidannya. Apabila data terukur fluktuatif atau tidak valid, proses akan dikembalikan ke tahap pengujian ulang. Namun, jika data telah dipastikan stabil dan valid, langkah berlanjut pada proses perhitungan matematis. Pada tahap ini, dilakukan kalkulasi nilai hambatan termal konveksi dan konduksi (R_{total}) yang dilanjutkan dengan perhitungan laju kehilangan panas (*heat loss*) menggunakan persamaan termodinamika. Hasil dari perhitungan analitik tersebut kemudian dibawa ke tahap analisis data dan pembahasan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan jumlah *heater* terhadap lonjakan suhu uap, sekaligus membandingkan perbedaan nilai *heat loss* antara pipa telanjang dengan pipa yang dilapisi isolator *Ceramic Fiber*. Pada tahap akhir, ditarik kesimpulan berdasarkan temuan tersebut untuk menjawab tujuan penelitian secara komprehensif.

Objek Penelitian dan Data Penelitian

Objek utama yang diteliti dalam penelitian ini adalah sistem perpipaan *electric superheater* skala laboratorium berbahan *carbon steel (ASTM A53 Grade B)* dengan diameter luar 35,75 mm, diameter dalam 31,75 mm, dan ketebalan 2 mm, yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pipa Superheater

Data yang dikumpulkan difokuskan pada pengukuran sejumlah parameter operasional, seperti temperatur permukaan luar pipa, temperatur permukaan luar isolator, dan temperatur *outlet steam*. Keseluruhan data tersebut diperoleh melalui pengujian variasi beban pemanasan menggunakan elemen *band heater* (berkapasitas daya 184 W per unit) guna mengevaluasi dampaknya terhadap karakteristik termal alat. Seluruh proses observasi dijalankan pada kondisi tekanan operasional uap yang konstan sebesar 1 atm. Untuk menguji efektivitas penahanan panas, sebagian pengujian dilapisi dengan material isolator *Ceramic Fiber* berketebalan 25 mm yang memiliki konduktivitas termal pada rentang 0,037 W/m·K.

Prosedur Pengujian

Syalif Fadhilah Rohman, et al/Prosiding A/B Semnas Mesin PNJ (2026)

Tahapan pengujian dimulai dengan mengalirkan uap jenuh (*saturated steam*) pada suhu 100°C ke dalam sistem perpipaan *superheater*. Termokopel kemudian dipasang pada titik-titik krusial di dinding permukaan dan saluran keluar untuk merekam data suhu selama proses berlangsung. Setelah persiapan instalasi selesai, sistem mulai dioperasikan secara bertahap menggunakan variasi 2, 3, 4, dan 5 buah *band heater*. Setiap variasi ditahan hingga mencapai kondisi termal tunak (*steady state*), lalu data suhu dicatat. Pengujian dilakukan dua kali putaran, yakni pada kondisi pipa tanpa isolator (*bare pipe*) dan pada kondisi pipa dibalut isolator *Ceramic Fiber*.

Metode Analisis Data

Tahap analisis data dalam penelitian ini berfokus pada perhitungan laju kehilangan panas (*heat loss*) ke lingkungan udara sekitar menggunakan prinsip resistansi termal pada silinder komposit. Laju panas yang terlepas berbanding terbalik dengan besarnya hambatan termal total sistem.

Persamaan untuk menghitung hambatan termal total dapat dilihat pada persamaan (1) [4].

$$R_{loss} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_{iso} L} + \frac{1}{h_{out} A_{out}} \quad (1)$$

Perlu dicatat bahwa suku hambatan konduksi isolator pada persamaan (1) hanya berlaku untuk kondisi pipa berisolator. Pada kondisi pipa tanpa isolator (*bare pipe*), suku tersebut ditiadakan sehingga persamaan disederhanakan menjadi hanya suku hambatan konveksi bebas udara luar, dengan temperatur permukaan luar pipa baja hasil pengukuran langsung digunakan sebagai acuan perbedaan suhu. Nilai koefisien konveksi bebas udara luar (h_{out}) tidak bersifat konstan, melainkan dihitung menggunakan korelasi Churchill-Chu untuk silinder horizontal yang dievaluasi pada suhu film (rata-rata suhu permukaan dan suhu lingkungan), dengan bilangan Rayleigh dan bilangan Prandtl udara sebagai parameter tak berdimensi utamanya. Pendekatan ini digunakan agar nilai h_{out} merepresentasikan kondisi fisis aktual pada setiap variasi suhu permukaan, bukan nilai koefisien konveksi tunggal yang diasumsikan sama untuk seluruh variasi.

Pengujian pada setiap variasi konfigurasi dilakukan sebanyak dua kali pengulangan hingga kondisi termal tunak (*steady state*) tercapai, guna memastikan stabilitas dan konsistensi data suhu yang terekam sebelum digunakan dalam perhitungan. Pengukuran suhu permukaan pipa dan isolator menggunakan termometer inframerah (*thermogun*) tipe Krisbow KW06-559 dengan rentang ukur -50°C hingga 660°C, sedangkan suhu uap masuk dan keluar direkam menggunakan termokopel Tipe-K berentang -50°C hingga 500°C yang terintegrasi dengan mikrokontroler Arduino. Perhitungan *heat loss* teoritis pada penelitian ini menggunakan beberapa asumsi, yaitu kondisi operasi tunak (*steady state*), suhu lingkungan konstan sebesar 27°C, perpindahan panas radiasi diabaikan, serta sifat termofisika udara dievaluasi pada suhu film masing-masing variasi. Dua kali pengulangan pengujian dinilai cukup untuk setiap variasi karena kriteria penerimaan data yang digunakan bukan jumlah replikasi statistik, melainkan tercapainya kondisi termal tunak (perubahan suhu antar-pembacaan berturut-turut kurang dari 0,5°C dalam interval 5 menit); apabila kedua pengulangan menunjukkan selisih suhu keluaran yang kecil dan konsisten, data dinyatakan valid dan mewakili kondisi operasi sistem.

Setelah mendapatkan nilai resistansi total dari masing-masing skenario pengujian, nilai laju kehilangan panas (*heat loss*) dikalkulasi berdasarkan perbedaan temperatur antara fluida uap di dalam pipa dengan suhu udara lingkungan. Persamaan untuk menghitung laju kehilangan panas dapat dilihat pada persamaan (2) [6].

$$Q_{loss} = \frac{T_i - T_{\infty}}{R_{total}} \quad (2)$$

Berdasarkan formulasi tersebut, data eksperimen diolah untuk kemudian dianalisis tingkat efisiensi termal dan penurunan *heat loss* akibat penambahan isolator.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Temperatur Permukaan *Electric Superheater*

Hasil pengukuran temperatur permukaan *electric superheater* pada variasi jumlah *band heater* untuk kondisi tanpa isolator dan menggunakan isolator *Ceramic Fiber* ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Temperatur Permukaan Superheater

Jumlah Band Heater	Temperatur Permukaan Tanpa Isolator (°C)	Temperatur Permukaan dengan Ceramic Fiber 25 mm (°C)
2	202,08	104,66
3	235,99	116,60
4	263,68	128,80
5	275,81	126,52

Berdasarkan Tabel 1, temperatur permukaan pada kondisi tanpa isolator meningkat dari 202,08°C pada penggunaan 2 *band heater* menjadi 275,81°C pada penggunaan 5 *band heater*. Pada kondisi menggunakan isolator *Ceramic Fiber*, temperatur permukaan meningkat dari 104,66°C menjadi 128,80°C pada penggunaan 4 *band heater*, kemudian sedikit menurun menjadi 126,52°C pada penggunaan 5 *band heater*.

Temperatur permukaan pada kondisi menggunakan isolator lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa isolator pada setiap variasi *band heater*. Hal tersebut menunjukkan bahwa isolator *Ceramic Fiber* mampu menghambat perpindahan panas dari permukaan pipa menuju lingkungan sehingga temperatur pada permukaan luar menjadi lebih rendah. Dengan konduktivitas termal sebesar 0,037 W/m·K, *Ceramic Fiber* meningkatkan hambatan termal sistem sehingga panas lebih banyak dipertahankan di dalam *electric superheater*.

Temperatur *Outlet Steam*

Hasil pengukuran temperatur *outlet steam* pada variasi jumlah *band heater* untuk kondisi tanpa isolator dan menggunakan isolator *Ceramic Fiber* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Temperatur Outlet Steam

Jumlah Band Heater	Tanpa Isolator (°C)	Dengan Isolator (°C)
2	112,25	172,50
3	128,00	233,25
4	178,50	278,00
5	189,20	310,75

Berdasarkan Tabel 2, temperatur *outlet steam* pada kondisi tanpa isolator meningkat dari 112,25°C pada penggunaan 2 *band heater* menjadi 189,20°C pada penggunaan 5 *band heater*. Pada kondisi menggunakan isolator *Ceramic Fiber*, temperatur *outlet steam* meningkat dari 172,50°C menjadi 278,00°C pada penggunaan 4 *band heater*, kemudian menurun menjadi 310,75°C pada penggunaan 5 *band heater*.

Temperatur *outlet steam* pada kondisi menggunakan isolator lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa isolator pada setiap variasi *band heater*. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan isolator *Ceramic Fiber* mampu mempertahankan panas di dalam sistem sehingga energi yang diterima uap menjadi lebih besar. Penurunan temperatur *outlet steam* pada penggunaan 5 *band heater* dibandingkan 4 *band heater* akan dibahas lebih lanjut berdasarkan hasil perhitungan *heat loss* pada Subbab selanjutnya.

Pengaruh Ketebalan Isolator terhadap *Heat Loss*

Sebelum menghitung besaran *heat loss*, terlebih dahulu ditentukan nilai koefisien konveksi bebas udara luar (h_{out}) menggunakan korelasi Churchill-Chu, dengan suhu permukaan luar yang bersentuhan langsung dengan udara lingkungan sebagai acuan bilangan Rayleigh. Adapun temperatur pipa (T_s) yang digunakan pada persamaan (2) untuk kondisi berisolator adalah temperatur pipa baja di bawah lapisan isolator, karena posisi tersebut merepresentasikan sumber panas efektif sebelum melewati resistansi konduksi isolator, sedangkan untuk kondisi tanpa isolator kedua suhu tersebut bernilai sama. Hasil perhitungan h_{out} beserta suhu acuan pada setiap variasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Suhu Acuan dan Koefisien Konveksi Bebas Udara Luar (h_{out})

Jumlah Band Heater	Kondisi Pipa	Suhu Permukaan untuk h_{out} (°C)	Suhu Pipa T_s pada Pers. (2) (°C)	h_{out} (W/m ² ·K)
2	Tanpa Isolator	202,00	202,00	8,6
2	Ceramic Fiber	104,66	400,00	6,8

3	Tanpa Isolator	235,99	235,99	8,9
3	Ceramic Fiber	116,60	503,00	7,0
4	Tanpa Isolator	263,68	263,68	9,1
4	Ceramic Fiber	128,80	557,00	7,2
5	Tanpa Isolator	275,81	275,81	9,2
5	Ceramic Fiber	126,52	583,00	7,1

Berdasarkan Tabel 3, nilai h_{out} pada kondisi tanpa isolator berada pada rentang 8,6-9,2 W/m²·K, sedikit lebih tinggi dibandingkan kondisi berisolator yang berada pada rentang 6,8-7,2 W/m²·K. Perbedaan ini terjadi karena diameter luar sistem yang lebih besar akibat penambahan isolator turut memengaruhi bilangan Rayleigh dan Nusselt pada korelasi Churchill-Chu. Nilai koefisien konveksi yang tidak konstan ini kemudian digunakan pada persamaan (1) untuk memperoleh resistansi termal total pada setiap variasi, sebelum dikalkulasi menjadi laju *heat loss* menggunakan persamaan (2).

Hasil perhitungan *heat loss* pada variasi jumlah *band heater* untuk kondisi tanpa isolator dan menggunakan isolator *Ceramic Fiber* ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Heat Loss

Jumlah Band Heater	Heat Loss Tanpa Isolator (W)	Heat Loss Dengan Isolator (W)
2	185,8	72,7
3	228,6	92,9
4	265,2	103,6
5	281,8	108,6

Berdasarkan Tabel 4, nilai *heat loss* pada kondisi tanpa isolator meningkat dari 185,8 W menjadi 281,8 W seiring bertambahnya jumlah *band heater*. Peningkatan tersebut terjadi karena temperatur permukaan pipa semakin tinggi sehingga perpindahan panas dari permukaan pipa menuju lingkungan juga meningkat.

Pada kondisi menggunakan isolator *Ceramic Fiber*, nilai *heat loss* juga mengalami peningkatan, yaitu dari 72,7 W menjadi 108,6 W. Meskipun demikian, nilai *heat loss* yang dihasilkan tetap lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa isolator pada setiap variasi *band heater*. Hal ini menunjukkan bahwa *Ceramic Fiber* mampu meningkatkan hambatan termal sehingga perpindahan panas menuju lingkungan dapat dikurangi.

Persentase penurunan *heat loss* akibat penggunaan isolator *Ceramic Fiber* pada setiap variasi *band heater* ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Perbandingan Persentase Heat Loss

Jumlah Band Heater	Penurunan Heat Loss (%)
2	60,9
3	59,4
4	60,9
5	61,5

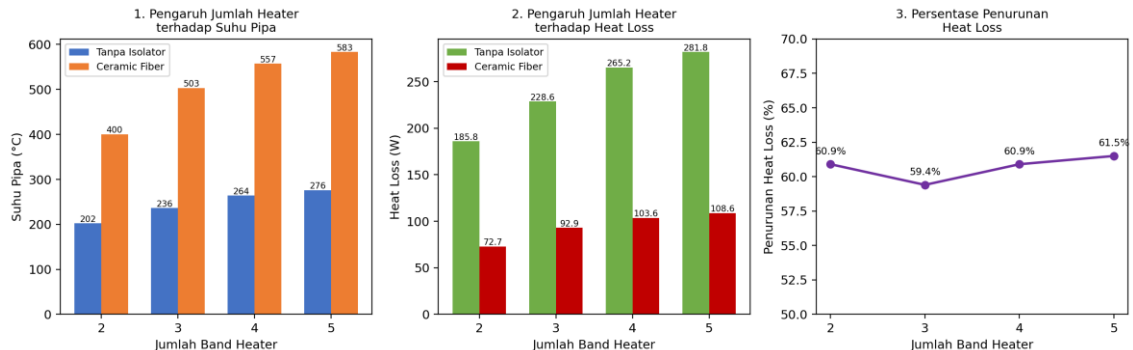
Berdasarkan Tabel 5, penggunaan isolator *Ceramic Fiber* mampu menurunkan *heat loss* lebih dari 59% pada seluruh variasi jumlah *band heater*, dengan penurunan terbesar sebesar 61,5% pada penggunaan 5 *band heater*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan isolator *Ceramic Fiber* efektif dalam mengurangi kehilangan panas ke lingkungan sehingga energi panas yang dihasilkan *band heater* lebih banyak dipertahankan di dalam sistem untuk memanaskan uap.

Persentase penurunan *heat loss* yang relatif stabil pada rentang 59,4%-61,5% mengindikasikan bahwa efektivitas isolator *Ceramic Fiber* tidak terlalu sensitif terhadap jumlah *band heater* yang digunakan, karena resistansi konduksi isolator bernilai tetap (ketebalan dan material sama) sedangkan resistansi konveksi luar hanya berubah kecil terhadap peningkatan suhu permukaan. Fenomena ini selaras dengan temuan Li dkk. [9], yang melaporkan bahwa penggabungan material isolator berserat secara konsisten menekan *heat loss* pada berbagai kondisi operasi sistem perpipaan uap. Sementara itu, penurunan sedikit temperatur *outlet steam* pada penggunaan 5 *band heater* dibandingkan 4 *band heater* (Tabel 2) sejalan dengan meningkatnya laju *heat loss* pada konfigurasi tersebut (Tabel 4): semakin tinggi temperatur permukaan pipa, semakin besar pula selisih suhu terhadap lingkungan sehingga laju konveksi bebas ke udara luar turut meningkat. Ketika penambahan daya pemanasan tidak sepenuhnya diimbangi oleh kapasitas isolator dalam menahan panas tambahan tersebut, sebagian energi yang seharusnya menaikkan suhu uap justru terdisipasi ke lingkungan, sehingga kenaikan temperatur *outlet steam* tidak lagi berbanding lurus dengan penambahan jumlah *band heater*. Dibandingkan dengan standar efisiensi termal pada sistem isolasi perpipaan industri, penurunan *heat loss* di atas 59% pada penelitian ini tergolong efektif, sehingga konfigurasi *band heater* yang lebih sedikit namun tetap berisolator berpotensi menjadi pilihan yang lebih efisien secara konsumsi energi dibandingkan menambah jumlah *band heater* secara berlebihan. Pola ini relevan dengan studi Moraveji dan Toghräie [10], yang menunjukkan bahwa

Syalif Fadhilah Rohman, et al/Prosiding A/B Semnas Mesin PNJ (2026)

peningkatan intensitas turbulensi lebih efektif menaikkan laju perpindahan panas konvektif dibandingkan sekadar menambah daya pemanasan, serta sejalan dengan temuan Eang dan Tippayawong [11] bahwa parameter operasi yang paling optimal justru dicapai pada kondisi pemanasan menengah, bukan maksimal. Konsistensi antara hasil perhitungan teoritis dan simulasi/eksperimen pada penelitian superheater sejenis juga telah dibuktikan oleh Thombare dan Bhosale [12], yang memperkuat keandalan pendekatan resistansi termal yang digunakan pada penelitian ini.

Untuk memperjelas kecenderungan hubungan antara jumlah *band heater* dengan suhu pipa, *heat loss*, dan persentase penurunannya, ketiga data tersebut divisualisasikan dalam bentuk grafik pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh Jumlah Band Heater terhadap Suhu Pipa, Heat Loss, dan Persentase Penurunan Heat Loss

Grafik pertama pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa suhu pipa pada kondisi berisolator selalu jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa isolator pada jumlah *band heater* yang sama, karena panas yang terhambat oleh isolator terakumulasi di permukaan pipa. Grafik kedua menunjukkan tren kenaikan *heat loss* yang konsisten pada kedua kondisi seiring bertambahnya jumlah *band heater*, dengan selisih antar kedua kurva yang merepresentasikan besarnya energi yang berhasil diselamatkan oleh isolator. Grafik ketiga menegaskan bahwa persentase penurunan *heat loss* relatif stabil di kisaran 59-62% pada seluruh variasi, mengonfirmasi bahwa efektivitas isolator *Ceramic Fiber* tidak banyak dipengaruhi oleh jumlah elemen pemanas yang digunakan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, variasi jumlah *band heater* dan penggunaan isolator *Ceramic Fiber* berpengaruh terhadap karakteristik termal *electric superheater*. Penggunaan isolator *Ceramic Fiber* menghasilkan temperatur permukaan luar yang lebih rendah, temperatur *outlet steam* yang lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa isolator, serta mampu menurunkan *heat loss* lebih dari 59% pada seluruh variasi jumlah *band heater*. Penurunan *heat loss* terbesar mencapai 61,5% pada penggunaan 5 *band heater*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemasangan isolator *Ceramic Fiber* efektif dalam meningkatkan hambatan termal sehingga kehilangan panas ke lingkungan berkurang dan panas lebih banyak dipertahankan di dalam sistem untuk memanaskan uap.

Penelitian ini masih memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu menjadi perhatian pada penelitian selanjutnya. Perhitungan *heat loss* pada penelitian ini masih bersifat teoritis berbasis resistansi termal dan belum disertai analisis konsumsi energi listrik aktual pada *band heater*, belum mengkaji pengaruh variasi ketebalan isolator lain selain 25 mm, serta belum divalidasi menggunakan simulasi numerik/*Computational Fluid Dynamics* (CFD). Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengukur konsumsi daya listrik aktual pada setiap variasi, mengevaluasi pengaruh variasi ketebalan isolator, serta memvalidasi hasil perhitungan analitik dengan simulasi CFD guna memperkuat keandalan rekomendasi konfigurasi optimal *electric superheater*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim pengajar Politeknik Negeri Jakarta atas dukungan pendanaan melalui hibah PBL dengan Nomor: 184/DST/PL3.14/B/PT.00.03/2026, tanggal 6 April 2026. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas kolaborasi strategis serta dukungan fasilitas yang diberikan selama proses fabrikasi purwarupa dan pelaksanaan pengujian dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Y. A. Cengel, *Engineering thermodynamics - 9th*, 9th ed. 2017.
- [2] H. Iyota, N. Nishimura, M. Yoshida, dan T. Nomura, "Simulation of superheated steam drying considering initial steam condensation," *Dry. Technol.*, vol. 19, no. 7, hal. 1425–1440, 2001, doi: 10.1081/DRT-100105298.

Syalif Fadhilah Rohman, et al/Prosiding A/B Semnas Mesin PNJ (2026)

- [3] Mujumbar, *Handbook of Industrial Drying (3rd ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420017618>, 3rd ed. Singapore, 2006.
- [4] J. A. Lienhard, *A Heat Transfer Textbook - 6th*, 6th ed. Phlogiston Press, 2024.
- [5] J. W. WURDOCK, *Fluid Mechanics and Its Applications*. 1976. doi: 10.1016/0300-9467(86)85009-2.
- [6] B. Theodore, *Fundamental of Heat and Mass Transfer*, 8th ed. 2017.
- [7] M. Trojan, "Computer modeling of a convective steam superheater," *Arch. Thermodyn.*, vol. 36, no. 1, hal. 125-137, 2015, doi: 10.1515/aoter-2015-0009.
- [8] M. Granda, M. Trojan, dan D. Taler, "CFD analysis of steam superheater operation in steady and transient state," *Energy*, 2020.
- [9] L. Li, C. Zhai, Y. Shang, C. Lou, X. Li, dan D. Li, "Life cycle cost approach involving steam transport model for insulation thickness optimization of steam pipes," *Energy*, vol. 312, hal. 133658, 2024, doi: 10.1016/J.ENERGY.2024.133658.
- [10] A. Moraveji dan D. Toghraie, "Computational Fluid Dynamics simulation of heat transfer and fluid flow characteristics in a vortex tube by considering the various parameters," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 113, hal. 432-443, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.095.
- [11] R. Eang dan N. Tippayawong, "Optimization of process variables for drying of cashew nuts by superheated steam," *Cogent Eng.*, vol. 5, no. 1, hal. 1-13, 2018, doi: 10.1080/23311916.2018.1531457.
- [12] R. Thombare dan S. Y. Bhosale, "Experimental & CFD Analysis of Super Heater in Bagasse Fired Water Tube Boiler," vol. 3, no. October, hal. 31-35, 2015.