

Analisis Pengaruh Pengoperasian Sootblower Terhadap Perubahan Selisih Temperatur Uap dan Kinerja Perpindahan Panas Superheater Menggunakan Uji Paired t-Test pada Boiler Unit 05 di PT. Bintan Alumina Indonesia.

Fran Oloando Lumban Tobing¹, Yusiran², Robi Kurniawan³, Jhon Hericson Purba⁴

^{1,2,3,4} Rekayasa Pembangkit Energi, Fakultas Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam, Indonesia
Email: ¹frantobing25@gmail.com, ²yusiran@polibatam.ac.id, ³jhonhericson@polibatam.ac.id,
⁴robi@polibatam.ac.id



Nomor Handphone : +6281373353251

Abstrak

Akumulasi *fouling* pada permukaan pipa *superheater* selama pengoperasian boiler berbahan bakar batu bara dapat menghambat proses perpindahan panas sehingga menurunkan kinerja *superheater*. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pengoperasian *sootblower* terhadap perubahan selisih temperatur uap dan kinerja perpindahan panas *superheater* berdasarkan laju perpindahan panas, persentase peningkatan perpindahan panas, serta uji *paired t-test* pada Boiler Unit 05 PT. Bintan Alumina Indonesia. Penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan analisis komparatif berdasarkan data operasi aktual *Distributed Control System* (DCS) selama 30 hari pada kondisi operasi boiler yang stabil. Analisis dilakukan melalui perhitungan selisih temperatur uap, laju perpindahan panas, persentase peningkatan perpindahan panas, serta uji *paired t-test*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengoperasian *sootblower* meningkatkan kinerja perpindahan panas *superheater*. Pada *sootblower* pertama, rata-rata selisih temperatur uap meningkat dari 152,37°C menjadi 154,33°C, disertai peningkatan laju perpindahan panas dari 16,910 MW menjadi 17,726 MW dengan rata-rata persentase peningkatan sebesar 4,85%. Pada *sootblower* kedua, rata-rata selisih temperatur uap meningkat dari 148,60°C menjadi 155,27°C, disertai peningkatan laju perpindahan panas dari 16,676 MW menjadi 18,098 MW dengan rata-rata persentase peningkatan sebesar 8,59%. Nilai *t*-hitung masing-masing sebesar 11,363 dan 21,141, lebih besar daripada nilai *t*-tabel (2,045), yang menunjukkan bahwa pengoperasian *sootblower* berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kinerja perpindahan panas *superheater*.

Kata kunci: *paired t-test*, perpindahan panas, *sootblower*, *superheater*, temperatur uap

Abstract

The accumulation of fouling on superheater tube surfaces during the continuous operation of coal-fired boilers can hinder the heat transfer process, thereby reducing superheater performance. This study aims to analyze the effect of sootblower operation on changes in steam temperature difference and superheater heat transfer performance based on the heat transfer rate, percentage increase in heat transfer, and the paired t-test in Boiler Unit 05 at PT Bintan Alumina Indonesia. A quantitative method with a comparative analysis approach was employed using actual operating data obtained from the Distributed Control System (DCS) over a 30-day period under stable boiler operating conditions. The analysis included the calculation of steam temperature difference, heat transfer rate, percentage increase in heat transfer, and the paired t-test. The results showed that sootblower operation improved the superheater heat transfer performance. During the first sootblower operation, the average steam temperature difference increased from 152.37°C to 154.33°C, accompanied by an increase in the heat transfer rate from 16.910 MW to 17.726 MW, with an average heat transfer improvement of 4.85%. During the second sootblower operation, the average steam temperature difference increased from 148.60°C to 155.27°C, accompanied by an increase in the heat transfer rate from 16.676 MW to 18.098 MW, with an average heat transfer improvement of 8.59%. The t-values obtained were 11.363 and 21.141, respectively, exceeding the critical t-value (2.045), indicating that sootblower operation has a significant effect on improving superheater heat transfer performance.

Keywords: heat transfer, paired t-test, sootblower, steam temperature difference, superheater.

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu sistem pembangkit yang memanfaatkan energi panas hasil pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi sebagai penggerak turbin. Pada sistem boiler, *superheater* berfungsi meningkatkan temperatur uap jenuh menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*) sehingga memenuhi kebutuhan operasi turbin. Kinerja *superheater* sangat dipengaruhi oleh efektivitas perpindahan panas antara gas hasil pembakaran dan uap di dalam pipa, sehingga kondisi komponen ini berperan penting terhadap performa boiler secara keseluruhan (Info, 2024)

Selama boiler beroperasi secara kontinu menggunakan bahan bakar batu bara, partikel abu dan jelaga hasil pembakaran dapat menempel pada permukaan pipa *superheater* dan membentuk lapisan *fouling*. Lapisan tersebut meningkatkan hambatan termal sehingga mengurangi laju perpindahan panas dari gas buang ke uap. Akibatnya, temperatur uap keluar mengalami penurunan dan kinerja perpindahan panas *superheater* menjadi kurang optimal. Selain menurunkan efisiensi perpindahan panas, akumulasi *fouling* juga dapat meningkatkan konsumsi energi dan mempercepat penurunan performa boiler apabila tidak segera ditangani (Sumarno et al., 2014)(Hendri et al., 2018)

Salah satu upaya yang dilakukan untuk mengurangi penumpukan *fouling* adalah dengan mengoperasikan sistem *sootblower*. Sistem ini memanfaatkan uap bertekanan untuk membersihkan endapan abu pada permukaan pipa pemanas sehingga proses perpindahan panas dapat kembali berlangsung secara optimal (Chandra Purnama, 2017) Pengoperasian *sootblower* yang efektif mampu meningkatkan penyerapan energi panas oleh *superheater*, sedangkan kegagalan pengoperasian dapat menyebabkan deposit tetap menempel sehingga kinerja perpindahan panas tidak mengalami peningkatan secara signifikan (Chandra Purnama, 2017)(Fajri & Arizona, 2022)

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh *fouling* maupun pengoperasian *sootblower* terhadap performa boiler. Penelitian oleh Hendri et al. (2018) menunjukkan bahwa *fouling* menyebabkan penurunan laju perpindahan panas pada permukaan pemanas boiler. Sementara itu, Fajri dan Arizona (2022) melaporkan bahwa pengoperasian *sootblower* mampu meningkatkan energi panas yang diserap *superheater*. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut umumnya berfokus pada perubahan energi panas atau pengaruh *fouling* secara umum. Kajian yang menganalisis perubahan selisih temperatur uap, laju perpindahan panas, persentase peningkatan perpindahan panas, serta pengujian statistik menggunakan *paired t-test* berdasarkan data operasi aktual *Distributed Control System* (DCS) masih terbatas, khususnya pada Boiler Unit 05 PT. Bintan Alumina Indonesia. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pengoperasian *sootblower* terhadap perubahan selisih temperatur uap dan kinerja perpindahan panas *superheater* menggunakan uji *paired t-test* pada Boiler Unit 05 PT. Bintan Alumina Indonesia. Penelitian dilakukan menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan analisis komparatif berdasarkan data operasi aktual *Distributed Control System* (DCS) selama 30 hari pada kondisi operasi boiler yang stabil. Analisis dilakukan melalui perhitungan selisih temperatur uap, laju perpindahan panas, persentase peningkatan perpindahan panas, serta pengujian statistik untuk mengetahui signifikansi perbedaan sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower* (Penelitian & Pendidikan, 2025)

2. METODE PENELITIAN

2.1. Jenis dan Alur Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan analisis komparatif untuk menganalisis pengaruh pengoperasian *sootblower* terhadap perubahan selisih temperatur uap (ΔT) dan laju perpindahan panas (Q) pada *superheater* Boiler Unit 05 PT. Bintan Alumina Indonesia. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower* berdasarkan data operasi aktual yang diperoleh dari *Distributed Control System* (DCS). Parameter yang dianalisis meliputi selisih temperatur uap (ΔT), laju perpindahan panas (Q), persentase peningkatan perpindahan panas, serta uji *paired t-test* untuk menentukan signifikansi perbedaan sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower*.

2.2. Sumber Data dan Pengumpulan Data

Penelitian dilaksanakan pada Boiler Unit 05 PLTU PT. Bintan Alumina Indonesia. Data yang digunakan merupakan data sekunder berupa data operasi aktual yang diperoleh dari *Distributed Control System (DCS)* selama 30 hari pada periode November 2025 dengan kondisi operasi boiler yang stabil. Parameter yang dikumpulkan meliputi temperatur uap masuk dan keluar, temperatur gas buang masuk dan keluar, laju aliran massa uap, serta kalor jenis uap yang digunakan dalam perhitungan selisih temperatur uap (ΔT), laju perpindahan panas (Q), persentase peningkatan perpindahan panas, dan uji *paired t-test*.

2.3. Teknik Pengolahan Data

Data operasional harian yang terkumpul di olah menggunakan persamaan neraca energi termal dana evaluasi statistik dengan tahapan sebagai berikut :

1. Perhitungan Perubahan Suhu Uap (ΔT).

Selisih temperatur uap dihitung berdasarkan perbedaan antara temperatur keluar dan temperatur masuk superheater menggunakan persamaan 1 :

$$\Delta T = T_{\text{Out}} - T_{\text{In}} \quad (1)$$

2. Perhitungan Laju Perpindahan Panas (*Heat Transfer Rate, Q*).

Besarnya energi panas yang diserap oleh uap di dalam *superheater* dihitung menggunakan persamaan 2 :

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (2)$$

3. Perhitungan Persentase Peningkatan Kinerja.

Untuk mengetahui efektivitas pembersihan sootblower terhadap peningkatan kinerja perpindahan panas yang umum digunakan dalam analisis kinerja sistem termal (Fajri & Arizona, 2022) (Al-behadili & Al-hajjaj, 2025) dihitung persentase kenaikannya dengan persamaan 3 :

$$\% \text{Peningkatan} = \frac{Q_{\text{sesudah}} - Q_{\text{sebelum}}}{Q_{\text{sebelum}}} \times 100\% \quad (3)$$

4. Analisis Statistik (*Paired Sample t-Test*).

Pengujian hipotesis menggunakan uji t berpasangan (*paired t-test*) dilakukan untuk membuktikan apakah terdapat perbedaan yang signifikan secara statistic pada laju perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower dihitung dengan persamaan :

$$t = \frac{\bar{D}}{\left(\frac{sD}{\sqrt{N}} \right)} \quad (4)$$

(Dimana $\bar{D}$ Adalah rata-rata selisih, sD adalah simbang baku selisih dan n^{-1} adalah jumlah sampel data). Pengujian ini menggunakan taraf signifikansi (α) sebesar 5% atau (0,05). dan t-tabel sebesar 2,045.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian diperoleh dari analisis data operasi aktual *Distributed Control System (DCS)* Boiler Unit 05 PT. Bintang Alumina Indonesia selama 30 hari pada kondisi operasi boiler yang stabil. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower* untuk mengevaluasi perubahan selisih temperatur uap, laju perpindahan panas, persentase peningkatan perpindahan panas, serta hasil uji *paired t-test*. Hasil analisis tersebut disajikan dan dibahas pada setiap subbab berikut.

3.1. Perubahan Selisih Temperatur Uap

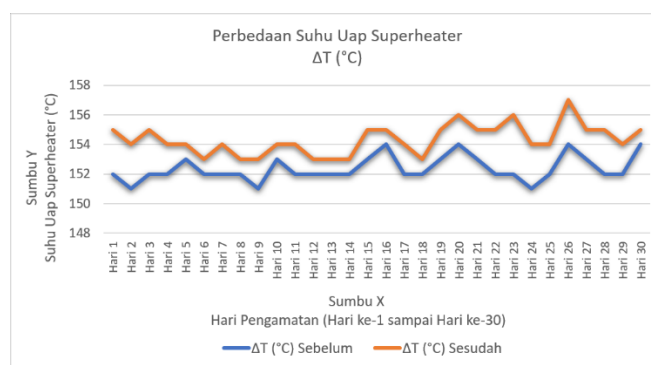
Selisih temperatur uap (ΔT) merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengevaluasi efektivitas perpindahan panas pada *superheater*. Semakin besar selisih temperatur uap, semakin besar potensi energi panas yang diserap uap dari gas hasil pembakaran. Hasil perbandingan rata-rata selisih temperatur uap sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower* pada Boiler Unit 05 PT. Bintang Alumina Indonesia disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perubahan Temperatur Uap dan Peningkatan (°C)

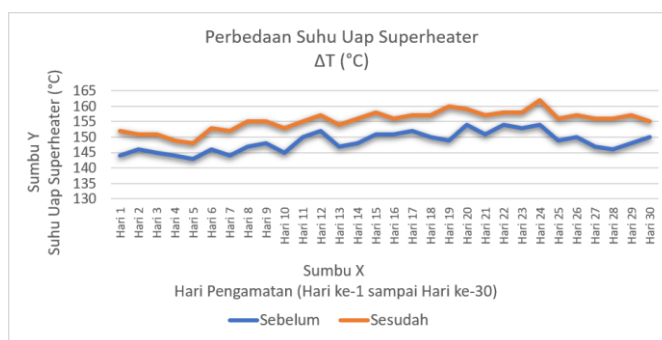
Parameter	Sebelum (°C)	Sesudah (°C)	Peningkatan (°C)
Sootblower ke - 1	152,36	154,33	1,97
Sootblower ke - 2	148,60	155,33	6,73

Berdasarkan Tabel 1, pengoperasian *sootblower* meningkatkan rata-rata selisih temperatur uap pada kedua siklus pembersihan. Pada *sootblower* pertama, rata-rata selisih temperatur uap meningkat dari 152,36°C menjadi 154,33°C, atau mengalami kenaikan sebesar 1,97°C. Sementara itu, pada *sootblower* kedua terjadi peningkatan dari 148,60°C menjadi 155,33°C, atau mengalami kenaikan sebesar 6,73°C.

Peningkatan selisih temperatur uap menunjukkan bahwa proses perpindahan panas pada *superheater* menjadi lebih efektif setelah pengoperasian *sootblower*. Pembersihan deposit *fouling* pada permukaan pipa *superheater* meningkatkan perpindahan panas dari gas hasil pembakaran ke uap, sehingga temperatur uap keluar meningkat. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Sumarno et al., 2014) serta (Fajri & Arizona, 2022) yang menyatakan bahwa pembersihan deposit *fouling* dapat meningkatkan efektivitas perpindahan panas pada *superheater*.



Gambar 1. Perubahan selisih temperatur uap sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke -1



Gambar 2. Perubahan selisih temperatur uap sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke -2

Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan perubahan selisih temperatur uap sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower* selama 30 hari pengamatan. Pada kedua grafik terlihat bahwa kurva selisih temperatur uap setelah pengoperasian *sootblower* cenderung berada di atas kurva sebelum pengoperasian, yang menunjukkan adanya peningkatan selisih temperatur uap setelah proses pembersihan. Hasil tersebut didukung oleh nilai rata-rata selisih temperatur uap yang meningkat dari 152,36°C menjadi 154,33°C pada pengoperasian *sootblower* pertama dan dari 148,60°C menjadi 155,33°C pada pengoperasian *sootblower* kedua. Meskipun terjadi fluktuasi pada beberapa hari pengamatan akibat variasi kondisi operasi boiler, tren peningkatan tetap terlihat pada kedua grafik. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Fajri & Arizona, 2022) serta (Sumarno et al., 2014) yang menyatakan bahwa pengoperasian *sootblower* mampu mengurangi deposit *fouling* pada permukaan *superheater*, sehingga proses perpindahan panas menjadi lebih efektif.

3.2. Laju Perpindahan Panas Superheater

Laju perpindahan panas (*heat transfer rate*) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan *superheater*, laju perpindahan panas merupakan jumlah energi panas yang ditransfer dari gas panas ke fluida kerja dalam satuan waktu (Masrianto et al., 2021). Nilai laju perpindahan panas sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower* dihitung menggunakan persamaan perpindahan panas berdasarkan laju aliran massa uap, kalor jenis uap, dan selisih temperatur uap. Hasil perbandingan rata-rata laju perpindahan panas disajikan pada Tabel 2.

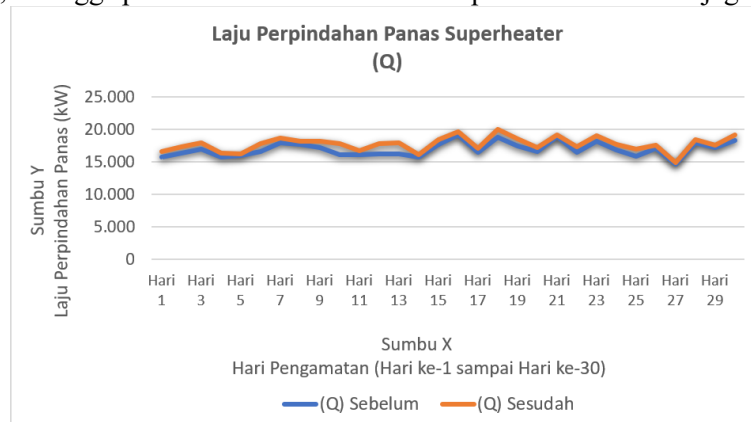
Tabel 2. Laju Perpindahan Panas Superheater dan Peningkatan (MW)

Parameter	Sebelum (MW)	Sesudah (MW)	Peningkatan (MW)
Sootblower ke - 1	16,910	17,726	0,816
Sootblower ke - 2	16,676	18,098	1,422

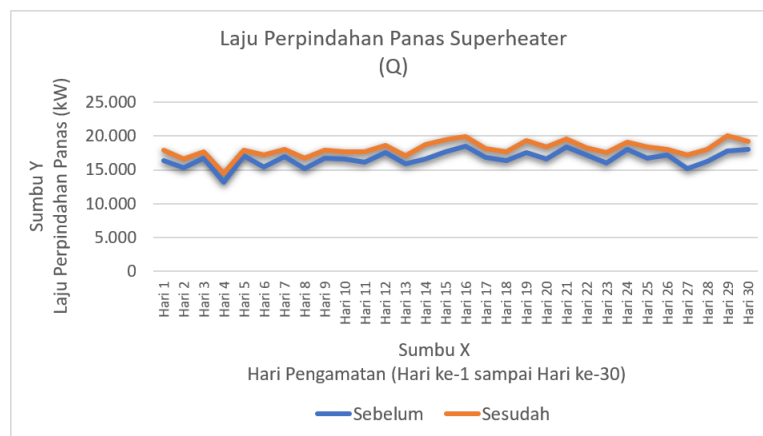
Berdasarkan Tabel 2, pengoperasian *sootblower* meningkatkan rata-rata laju perpindahan panas pada *superheater* Boiler Unit 05. Pada *sootblower* pertama, rata-rata laju perpindahan panas meningkat dari 16,910 MW menjadi 17,726 MW, atau mengalami peningkatan sebesar 0,816 MW. Sementara itu, pada *sootblower* kedua, rata-rata laju perpindahan panas meningkat dari 16,676 MW menjadi 18,098 MW, atau sebesar 1,422 MW. Peningkatan laju perpindahan panas pada kedua pengoperasian *sootblower* menunjukkan bahwa proses perpindahan energi panas dari gas hasil pembakaran ke uap berlangsung lebih efektif setelah pembersihan permukaan pipa *superheater*.

Peningkatan laju perpindahan panas terjadi karena pengoperasian *sootblower* mampu mengurangi deposit *fouling* yang menempel pada permukaan pipa *superheater*. Berkurangnya lapisan *fouling* menyebabkan hambatan perpindahan panas menurun sehingga energi panas dari gas hasil pembakaran dapat diserap uap secara lebih optimal. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Hendri et al., 2018) yang menyatakan bahwa pengoperasian *sootblower* meningkatkan energi panas yang diserap *superheater* melalui pembersihan deposit pada permukaan pipa. Selain itu, (Fajri & Arizona, 2022)

menjelaskan bahwa keberadaan *fouling* meningkatkan tahanan termal yang dapat menurunkan laju perpindahan panas, sehingga pembersihan secara berkala diperlukan untuk menjaga kinerja *superheater*.



Gambar 3. Perubahan laju perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-1



Gambar 4. Perubahan laju perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-2

Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan perubahan laju perpindahan panas *superheater* sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower* selama 30 hari pengamatan. Pada kedua grafik terlihat bahwa kurva laju perpindahan panas setelah pengoperasian *sootblower* cenderung berada di atas kurva sebelum pengoperasian, yang menunjukkan adanya peningkatan kemampuan *superheater* dalam mentransfer energi panas. Hasil tersebut didukung oleh nilai rata-rata laju perpindahan panas yang meningkat dari 16,910 MW menjadi 17,726 MW pada pengoperasian *sootblower* pertama dan dari 16,676 MW menjadi 18,098 MW pada pengoperasian *sootblower* kedua. Meskipun terjadi fluktuasi pada beberapa hari pengamatan akibat perubahan kondisi operasi boiler, tren peningkatan laju perpindahan panas tetap terlihat pada kedua grafik. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Hendri et al., 2018) yang menyatakan bahwa berkurangnya deposit *fouling* dapat meningkatkan efektivitas perpindahan panas, serta didukung oleh penelitian (Fajri & Arizona, 2022) yang menunjukkan bahwa pengoperasian *sootblower* meningkatkan energi panas yang diserap oleh *superheater*.

3.3. Persentase Peningkatan Perpindahan Panas

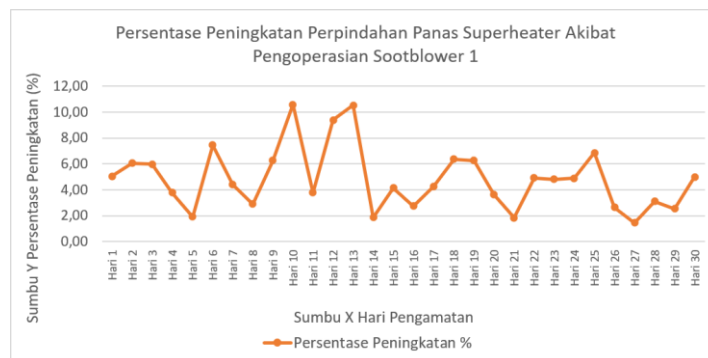
Persentase peningkatan perpindahan panas digunakan untuk menunjukkan besarnya peningkatan kinerja *superheater* setelah pengoperasian *sootblower*. Nilai tersebut dihitung berdasarkan perbandingan selisih antara laju perpindahan panas sebelum dan sesudah pengoperasian (Suralaya et al., 2020). Hasil perhitungan rata-rata persentase peningkatan perpindahan panas disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Persentase Peningkatan Perpindahan Panas (%)

Parameter	Minimum (%)	Maksimum (%)	Rata-rata (%)
Sootblower ke - 1	1,45	10,59	4,85
Sootblower ke - 2	5,22	13,72	8,59

Berdasarkan Tabel 3, persentase peningkatan perpindahan panas setelah pengoperasian *sootblower* menunjukkan peningkatan pada kedua siklus pembersihan. Pada pengoperasian *sootblower* pertama, persentase peningkatan perpindahan panas berkisar antara 1,45% hingga 10,59%, dengan rata-rata sebesar 4,85%. Sementara itu, pada pengoperasian *sootblower* kedua, persentase peningkatan berkisar antara 5,22% hingga 13,72%, dengan rata-rata sebesar 8,59%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada data penelitian ini, pengoperasian *sootblower* kedua menghasilkan peningkatan perpindahan panas yang lebih besar dibandingkan pengoperasian *sootblower* pertama.

Temuan ini sejalan dengan penelitian (Fajri & Arizona, 2022) (Suralaya et al., 2020) yang menunjukkan bahwa pengoperasian *sootblower* mampu meningkatkan energi panas yang diserap *superheater* melalui pembersihan deposit *fouling*. Selain itu, (Info, 2024) menjelaskan bahwa keberadaan *fouling* pada permukaan perpindahan panas meningkatkan tahanan termal sehingga mengurangi efektivitas perpindahan panas. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengoperasian *sootblower* berkontribusi dalam meningkatkan kinerja perpindahan panas *superheater* pada Boiler Unit 05 PT. Bintang Alumina Indonesia.



Gambar 5. Persentase peningkatan perpindahan panas superheater akibat pengoperasian sootblower ke-1



Gambar 6. Persentase peningkatan perpindahan panas superheater akibat pengoperasian sootblower ke-2

Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan persentase peningkatan perpindahan panas *superheater* setelah pengoperasian *sootblower* selama 30 hari pengamatan. Pada kedua grafik terlihat bahwa persentase peningkatan mengalami fluktuasi pada setiap hari pengamatan. Meskipun demikian, nilai persentase peningkatan tetap menunjukkan tren positif dengan rata-rata sebesar 4,85% pada pengoperasian *sootblower* pertama dan 8,59% pada pengoperasian *sootblower* kedua. Selain itu, pengoperasian *sootblower* kedua menghasilkan persentase peningkatan yang lebih tinggi dibandingkan pengoperasian *sootblower* pertama, yang menunjukkan peningkatan kinerja perpindahan panas *superheater* yang lebih besar. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Fajri & Arizona, 2022) yang menyatakan bahwa pengoperasian *sootblower* mampu meningkatkan penyerapan energi panas pada *superheater* melalui pembersihan deposit *fouling*, sehingga kinerja perpindahan panas menjadi lebih optimal

3.4. Hasil Uji Paired t-test

Uji *paired t-test* dilakukan untuk mengetahui signifikansi perbedaan laju perpindahan panas sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower*. Pengujian dilakukan terhadap 30 pasang data dengan taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$). Hasil pengujian *paired t-test* disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Paired t-test

Parameter	t-hitung	t-tabel	Hasil
Sootblower ke - 1	11,363	2,045	Signifikan
Sootblower ke - 2	21,141	2,045	Signifikan

Berdasarkan Tabel 4, nilai *t*-hitung pada pengoperasian *sootblower* pertama sebesar 11,363, sedangkan pada pengoperasian *sootblower* kedua sebesar 21,141. Kedua nilai tersebut lebih besar dibandingkan nilai *t*-tabel sebesar 2,045, sehingga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower*. Dengan demikian, pengoperasian *sootblower* terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kinerja perpindahan panas *superheater* pada Boiler Unit 05 PT. Bintan Alumina Indonesia.

Hasil uji statistik ini mendukung hasil analisis perubahan selisih temperatur uap, laju perpindahan panas, dan persentase peningkatan perpindahan panas yang telah dibahas pada subbab sebelumnya. Penggunaan *paired t-test* sesuai untuk membandingkan dua kelompok data yang saling berpasangan, yaitu data sebelum dan sesudah perlakuan, sehingga dapat diketahui apakah perbedaan yang terjadi bersifat signifikan secara statistik (Penelitian & Pendidikan, 2025). Oleh karena itu, peningkatan kinerja *superheater* setelah pengoperasian *sootblower* tidak hanya terlihat dari hasil perhitungan, tetapi juga terbukti signifikan berdasarkan pengujian statistik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, pengoperasian *sootblower* terbukti meningkatkan kinerja perpindahan panas *superheater* pada Boiler Unit 05 PT. Bintan Alumina Indonesia. Peningkatan tersebut ditunjukkan oleh bertambahnya rata-rata selisih temperatur uap dari 152,36°C menjadi 154,33°C pada pengoperasian *sootblower* pertama dan dari 148,60°C menjadi 155,33°C pada pengoperasian *sootblower* kedua. Selain itu, rata-rata laju perpindahan panas meningkat dari 16,910 MW menjadi 17,726 MW pada pengoperasian *sootblower* pertama serta dari 16,676 MW menjadi 18,098 MW pada pengoperasian *sootblower* kedua, dengan rata-rata persentase peningkatan masing-masing sebesar 4,85% dan 8,59%. Hasil uji *paired t-test* menunjukkan nilai *t*-hitung sebesar 11,363 pada pengoperasian *sootblower* pertama dan 21,141 pada pengoperasian *sootblower* kedua, yang lebih besar daripada nilai *t*-tabel sebesar 2,045. Dengan demikian, pengoperasian *sootblower* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kinerja perpindahan panas *superheater*.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-behadili, M. A., & Al-hajjaj, A. A. (2025). *ASEAN Journal for Science and Engineering in Materials Thermal Enhancement of Ribbed Double Pipe Heat Exchangers Using Titanate Nanofluids for Advanced Heat Transfer Systems*. 4(2), 285–296.
- Chandra Purnama, N. (2017). Analisis_Kegagalan_Sootblower_Terhadap_Perpindahan. *Teknik Mesin*, 06(3), 187–190.
- Fajri, F., & Arizona, R. (2022). Studi pengaruh pengoperasian soot blower terhadap energi panas yang diserap superheater pada unit 2 PLTU tenayan. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 17(2), 30–34.
<https://doi.org/10.36289/jtmi.v17i2.316>
- Hendri, Suhengki, & Lubis, A. F. (2018). Pengaruh Fouling Terhadap Laju Perpindahan Panas. *Jurnal Power Plat*, 6(1), 48–57.
- Info, A. (2024). *Evaluasi perpindahan panas dan efisiensi s uperheater pada unit multi fuel boiler*. 14(1), 54–59.
- Masrianto, Z., Mangalla, L. K., & Gunawan, Y. (2021). *Pengujian Eksperimen Pembuang Panas dan Aliran Udara Pada Berbagai Bentuk Heatsink*. 6(4).
- Penelitian, J., & Pendidikan, I. (2025). *Uji T-Student Dua Sampel Saling Berpasangan/Dependend (Paired Sample t – Test)*. 4, 568–576.
- Sumarno, F. G., Wahyuno, & Aditya, O. I. (2014). Fouling Dan Pengaruhnya Pada Final Secondary Superheater Pltu Tanjung Jati B Unit 2. *Januari*, 10(1), 9–13.
- Suralaya, D. I. P., Dwiaji, Y. C., & Utama, D. M. (2020). *Jurnal simetrik vol.10, no.1, juni 2020*. 10(1), 308–312.