



**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. Bintang Alumina Indonesia**

Tugas Akhir

Oleh:

Fran Oloando Lumban Tobing (4232201034)

**Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi
Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam
2025-2026**

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul : "Analisis Pengaruh Pengoperasian Sootblower Terhadap Perubahan Sellsih Temperatur Uap dan Kinerja Perpindahan Panas Superheater Menggunakan Uji Paired t-Test pada Boiler Unit 05 di PT. Bintang Alumina Indonesia" adalah **hasil karya sendiri**, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan, dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip atau dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Batam, 08 - Juli - 2026



Nama : FRAN OLOANDO LUMBAN TOBING
NIM : 4232201034

Lembar Pengesahan

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T)/Ahli Madya Teknik (AMd.T.)
di
Politeknik Negeri Batam

Oleh:
Fran Oloando Lumban Tobing (4232201034)

Tanggal Sidang: 08 - 07 - 2026
Disetujui oleh :

Dosen Penguji :



1. Robi Kurniawan, S.T.,M.T.
NIK : 125356



Dosen Pembimbing :



- Yusiran, S.Si., M.T
NIK : 123294

2. Ir. Jhon Hericson Purba, S.Pd., M.Pd
NIK : 119230

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. Bintang Alumina Indonesia.

Abstrak

Pengoperasian boiler berbahan bakar batu bara secara terus-menerus menyebabkan terbentuknya fouling pada permukaan pipa superheater yang dapat menghambat proses perpindahan panas, sehingga menurunkan temperatur uap dan 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. Bintang 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. Laju perpindahan panas dihitung menggunakan persamaan neraca energi berdasarkan laju aliran massa uap, kalor jenis uap, dan selisih temperatur uap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengoperasian sootblower mampu meningkatkan kinerja superheater. Pada sootblower pertama, rata-rata temperatur uap meningkat dari 533,50°C menjadi 537,40°C, laju perpindahan panas meningkat sebesar 0,817 MW, dengan rata-rata persentase peningkatan sebesar 4,85%. Pada sootblower kedua, laju perpindahan panas meningkat sebesar 1,421 MW dengan rata-rata persentase peningkatan sebesar 8,59%. Hasil uji *paired t-test* menunjukkan nilai t-hitung sebesar 11,363 pada sootblower pertama dan 21,141 pada sootblower kedua, lebih besar daripada t-tabel sebesar 2,045, sehingga dapat disimpulkan bahwa pengoperasian sootblower memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kinerja perpindahan panas superheater.

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

Analysis of the Effect of Sootblower Operation on Changes in Steam Temperature Difference and Superheater Heat Transfer Performance Using the Paired t-Test on Boiler Unit 05 at PT Bintan Alumina Indonesia.

Abstract

Continuous operation of coal-fired boilers leads to the formation of fouling deposits on the superheater tube surfaces, which reduce heat transfer performance and consequently decrease steam temperature and superheater efficiency. 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, the percentage increase in heat transfer, and the paired t-test on Boiler Unit 05 at PT Bintan Alumina Indonesia. This research employed a quantitative approach using comparative analysis based on actual operational data collected from the Distributed Control System (DCS) over a 30-day period under stable boiler operating conditions. The heat transfer rate was calculated using the energy balance equation based on the steam mass flow rate, specific heat capacity of steam, and steam temperature difference. The results indicate that sootblower operation improved the heat transfer performance of the superheater. After the first sootblower operation, the average steam temperature increased from 533.50°C to 537.40°C, while the heat transfer rate increased by 0.817 MW with an average heat transfer improvement of 4.85%. Following the second sootblower operation, the heat transfer rate increased by 1.421 MW with an average improvement of 8.59%. The paired t-test yielded t-values of 11.363 for the first sootblower and 21.141 for the second sootblower, both exceeding the critical t-value of 2.045. These results indicate that sootblower operation has a statistically significant effect on improving the heat transfer performance of the superheater.

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

Kata Pengantar

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat, kasih dan anugerahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Pengaruh Pengoperasian Sootblower Terhadap Laju Perpindahan Panas Superheater pada Boiler Unit 05 di PT. Bintang Alumina Indonesia”. Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademis untuk menyelesaikan studi Diploma IV pada Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi di Politeknik Negeri Batam. Penulis sangat menyadari bahwa apa yang penulis lakukan dalam penyusunan buku Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Maka dari itu, penulis akan menerima kritik dan saran yang berguna dan membangun dalam menyempurnakan sistem ini dimasa yang akan datang, semoga apa yang telah penulis lakukan ini dapat bermanfaat bagi pembaca. Dalam perencanaan dan pembuatan hingga selesainya tugas akhir ini. Penulis tidak terlepas dari bantuan-bantuan pihak yang sangat membantu. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Tuhan Yesus Kristus atas segala limpahan berkat dan karunia – Nya.
2. Bapak, Mama dan Keluarga tercinta yang memberikan motivasi, do’a, dan semangat selama masa di perkuliahan sampai dengan tahap penyusunan Tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Irwanto Zarma Putra, S.Pd. M.Eng. selaku Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi di Politeknik Negeri Batam.
4. Ibu Hasnira, S.ST., M.Tr.T. selaku Dosen Wali penulis, yang senantiasa dengan sabar memberikan bimbingan, serta motivasi dan nasihat selama masa perkuliahan.

5. Bapak Yusiran, S.Si., M.T. selaku Dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu dan ilmu untuk membimbing penulis selama mengerjakan Tugas Akhir.
6. Seluruh dosen dan staff karyawan Program Studi Teknologi Rekayasa Pemangkit Energi.
7. Abang Kevin Sean Farrel Manurung, S.Tr.T. selaku pembimbing industri di PLTU Divisi *Boiler* PT. Bintan Alumina Indonesia yang telah meluangkan waktu untuk mengajarkan penulis tentang *Boiler* lebih dalam.
8. Seluruh abang senior-senior divisi *boiler* yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu namanya, yang telah banyak memberi ilmu pengetahuan dan praktik lapangan kepada penulis.
9. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata penulis berharap Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan semua pembaca. Penulis ucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan perhatian serta bimbingannya kepada penulis dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini.

Batam, 08 – Juli - 2026

A handwritten signature in black ink on a light yellow background. The signature is stylized and appears to read 'Fran' followed by a long, sweeping horizontal line and a small dot at the end.

FRAN OLOANDO LUMBAN TOBING

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	Error! Bookmark not defined.
Lembar Pengesahan	ii
Abstrak	iii
<i>Abstract</i>	iv
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	x
Bab 1. Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	3
1.4. Manfaat	3
1.5. Batasan	4
Bab 2. Tinjauan Pustaka	5
2.1. Prinsip Kerja PLTU	6
2.2. Katel Uap (<i>Boiler</i>)	8
2.2.1. Komponen – komponen <i>Boiler</i>	9
2.2.2. Komponen – komponen Pendukung <i>Boiler</i>	16
2.3. Superheater	18
2.3.1 Prinsip Kerja <i>Superheater</i>	20
2.4. Sootblower	22
2.4.1 Cara Kerja Sootblower	25
2.5. Perpindahan Panas Pada <i>Superheater</i>	26
2.6. Laju Perpindahan Panas <i>Superheater</i>	27
2.7. Parameter yang Mempengaruhi Kinerja <i>Superheater</i>	28
2.8. Persentase Peningkatan Kinerja Perpindahan Panas <i>Superheater</i>	29
2.9. Fouling pada Superheater	30

2.9.1. Jenis dan Penyebab <i>Fouling</i>	32
Bab 3. Metodologi Penelitian	34
3.1. Gambaran umum	34
3.2. Waktu dan lokasi	36
3.3. Teknik Pengumpulan Data.....	36
3.4. Pengolahan Data	38
3.5. Analisis Data	39
3.5.1. Perhitungan Laju Perpindahan Panas Superheater	39
3.5.2. Perhitungan Persentase Peningkatan Perpindahan Panas <i>Superheater</i>	40
3.5.3. Analisis Statistik Pengaruh Pengoperasian <i>Sootblower</i>	41
Bab 4. Hasil dan Pembahasan	43
4.1. Data Hasil Penelitian	43
4.1.1. Analisis Sootblower ke-1 pada Superheater.....	56
4.1.2. Analisis Statistik Pengaruh Laju Perpindahan Panas superheater Pada <i>Sootblower</i> ke-1.....	58
4.1.3. Analisis Sootblower ke-2 pada Superheater	59
4.1.4. Analisis Statistik Pengaruh Laju Perpindahan Panas superheater Pada <i>Sootblower</i> ke-2.....	61
4.2. Grafik dan Pembahasan	63
4.2.1. Sootblower Ke-1.....	63
4.2.2. Sootblower Ke-2	66
Bab 5. Kesimpulan dan Saran	69
5.1. Kesimpulan	69
5.2. Saran	69
Daftar Pustaka	71
Biodata	1
Lampiran	2

Daftar Gambar

Gambar 1. PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia	5
Gambar 2. Skema Pembangkit Listrik Tenaga Uap	7
Gambar 3. Steam Drum di PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia	10
Gambar 4. Tahapan pada Superheater	11
Gambar 5. Posisi <i>Superheater</i> di PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia	18
Gambar 6. Skema Kerja Superheater	20
Gambar 7. Posisi <i>Superheater</i> di <i>Distributed Control System</i>	22
Gambar 8. Posisi Sootblower di PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia.....	23
Gambar 9. Posisi Sootblower di Distributed Control System	26
Gambar 10. Fouling Sebelum di Sootblower di Distributed Control System	31
Gambar 11. Fouling Sesudah di Sootblower di Distributed Control System	32
Gambar 12. Diagram Alir Tahapan Penelitian	35
Gambar 13. Lokasi Penelitian	36
Gambar 14. Grafik perbedaan selisih temperatur uap superheater (ΔT) sootblower ke-1 sebelum dan sesudah pada bulan November.	63
Gambar 15. Grafik laju perpindahan panas superheater sootblower ke-1 sebelum dan sesudah di bulan november.	64
Gambar 16. Grafik Persentase Peningkatan Perpindahan Panas Superheater Akibat Pengoperasian Sootblower ke-1 di bulan november.	65
Gambar 17. Grafik perbedaan selisih temperatur uap superheater (ΔT) sootblower ke-2 sebelum dan sesudah pada bulan November.	66
Gambar 18. Grafik laju perpindahan panas superheater sootblower ke-2 sebelum dan sesudah di bulan november.	67
Gambar 19. Grafik Persentase Peningkatan Perpindahan Panas Superheater Akibat Pengoperasian Sootblower ke-2 di bulan november.	68

Daftar Tabel

Tabel 1. Spesifikasi Boiler PLTU PT. Bintang Alumina Indonesi	8
Tabel 2. Spesifikasi Steam Drum di PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia.....	10
Tabel 3. Spesifikasi Superheater Low Temperature PLTU PT. BAI.....	21
Tabel 4. Spesifikasi Superheater High Temperature PLTU PT. BAI	21
Tabel 5. Data Parameter Superheater Sebelum dan Sesudah Pengoperasian Sootblower	37
Tabel 6. Data Parameter Sootblower Ke 1 Sebelum, Di Bulan November	43
Tabel 7. Data Parameter Sootblower Ke 1 Sesudah, Di Bulan November	44
Tabel 8. Data Perhitungan Sootblower ke-1 Sebelum Pengoperasian dan Persentase Peningkatan Q pada Bulan November	46
Tabel 9. Data Perhitungan Sootblower ke-1 Sesudah Pengoperasian dan Persentase Peningkatan Q pada Bulan November	47
Tabel 10. Hasil Perhitungan Uji t Berpasangan Sootblower ke-1	48
Tabel 11. Data Parameter Sootblower Ke 2 Sebelum, Di Bulan November	49
Tabel 12. Data Parameter Sootblower Ke 2 Sesudah, Di Bulan November	51
Tabel 13. Data Perhitungan Sootblower ke-1 Sebelum Pengoperasian dan Persentase Peningkatan Q pada Bulan November	52
Tabel 14. Data Perhitungan Sootblower ke-1 Sesudah Pengoperasian dan Persentase Peningkatan Q pada Bulan November	53
Tabel 15. Hasil Perhitungan Uji t Berpasangan Sootblower ke-2	54

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) berperan sebagai sumber utama energi yang digunakan untuk menghasilkan listrik guna memenuhi kebutuhan industri di **PT. Bintan Alumina Indonesia (BAI)**. PLTU merupakan jenis pembangkit yang memanfaatkan air sebagai fluida kerja yang diubah menjadi uap melalui proses pemanasan. Di PT. Bintan Alumina Indonesia, PLTU ini memanfaatkan batu bara sebagai bahan bakar dalam proses pembakaran di *boiler*, yang bertujuan untuk memproduksi uap bertekanan tinggi yang kemudian digunakan untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik. Oleh karena itu, *boiler* memiliki peran yang sangat penting karena berfungsi sebagai tempat pemanasan air yang akan diubah menjadi uap kering pada suhu tertentu. Agar *boiler* dapat berfungsi dengan baik, seluruh bagian di dalamnya harus beroperasi secara maksimal. Salah satu bagian krusial dalam *boiler* adalah ***Superheater***, yang berfungsi menaikkan suhu uap jenuh menjadi uap kering sebelum dialirkan ke turbin [1].

Kinerja *superheater* sangat dipengaruhi oleh kemampuan pipa dalam menyerap panas dari gas buang hasil pembakaran. Dalam proses pembakaran batubara, partikel abu dan jelaga yang terbawa aliran gas buang sering menempel pada permukaan pipa *superheater*. Penumpukan partikel tersebut membentuk lapisan *fouling* yang bersifat sebagai isolator termal. ***Fouling*** menghambat perpindahan panas dari gas buang ke uap di dalam pipa sehingga menyebabkan beberapa gangguan operasional, seperti penurunan suhu uap *outlet*, menurunnya laju perpindahan panas, menurunnya kinerja perpindahan panas, serta meningkatnya kebutuhan energi untuk mencapai suhu operasi yang diinginkan [2], [3].

Jika tidak ditangani, *fouling* dapat menyebabkan ketidakstabilan performa *boiler* dan menurunkan kinerja perpindahan panas keseluruhan, untuk mengatasi

penumpukan *fouling*, *boiler* dilengkapi dengan **sootblower**, yaitu perangkat pembersih yang menggunakan semburan uap bertekanan untuk melepaskan endapan pada permukaan pipa. Operasi *sootblower* dilakukan secara berkala untuk mengembalikan kebersihan permukaan *superheater* sehingga proses **perpindahan panas** menjadi lebih optimal. Namun, efektivitas pembersihan tersebut perlu dianalisis secara kuantitatif menggunakan data aktual operasi boiler agar pengaruhnya terhadap kinerja *superheater* dapat dipastikan. Serta pengoperasian *sootblower* harus dilakukan dengan cermat, penggunaan berlebihan dapat menyebabkan erosi pada pipa *superheater*. Sebaliknya jika terlalu jarang digunakan deposit abu akan menumpuk dan menurunkan kinerja perpindahan panas [3], [4].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perbandingan kinerja perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower pada Boiler Unit 05 di PT. Bintan Alumina Indonesia. Analisis dilakukan melalui pengukuran perubahan temperatur uap, perhitungan laju perpindahan panas (Q), perhitungan persentase peningkatan laju perpindahan panas superheater, serta uji t berpasangan untuk mengetahui signifikansi perbedaan laju perpindahan panas sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower. Hasil penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran nyata mengenai pengaruh sootblower terhadap performa superheater serta menjadi dasar dalam menentukan strategi dan frekuensi pengoperasian sootblower yang lebih efektif dan efisien.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perubahan temperatur uap superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower pada Boiler Unit 05?

2. Bagaimana perubahan laju perpindahan panas (Q) superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower pada Boiler Unit 05?
3. Berapa persentase peningkatan laju perpindahan panas superheater setelah pengoperasian sootblower pada Boiler Unit 05?
4. Apakah terdapat perbedaan yang signifikan pada laju perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower berdasarkan uji t berpasangan?

1.3. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis perubahan temperatur uap superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower pada Boiler Unit 05.
2. Menganalisis perubahan laju perpindahan panas (Q) superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower pada Boiler Unit 05.
3. Menganalisis persentase peningkatan laju perpindahan panas superheater setelah pengoperasian sootblower pada Boiler Unit 05
4. Menguji signifikansi perbedaan laju perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower menggunakan uji t berpasangan..

1.4. Manfaat

1. Memberikan informasi kuantitatif mengenai perubahan peningkatan kinerja perpindahan panas pada *superheater* sebelum dan sesudah operasi *sootblower*. yang dapat digunakan sebagai bahan evaluasi untuk menentukan frekuensi pembersihan yang optimal sehingga peningkatan kinerja *boiler* dapat terjaga dan sistem tetap stabil.
2. Menambah wawasan dan pemahaman mengenai hubungan antara proses pembentukan *fouling*, pelaksanaan *sootblowing*, serta pengaruhnya terhadap

peningkatan kinerja perpindahan panas pada sistem *boiler*, khususnya pada komponen *superheater*.

3. Menjadi bahan evaluasi teknis bagi perusahaan dalam menilai efektivitas pengoperasian *sootblower* terhadap kinerja *superheater*, serta sebagai dasar pertimbangan dalam pengambilan keputusan operasional terkait pengaturan jadwal *sootblowing* guna menjaga kestabilan operasi boiler dan meningkatkan keandalan sistem pembangkit

1.5. Batasan

Agar penelitian lebih terarah dan tidak melebar, maka batasan masalah ditetapkan sebagai berikut :

1. Penelitian hanya difokuskan pada komponen *superheater* pada *Boiler* Unit 05 di PT. Bintan Alumina Indonesia.
2. Data yang digunakan merupakan data historis dari sistem *Distributed Control System (DCS)* yang mencakup parameter suhu, tekanan, dan laju aliran uap.
3. Analisis dilakukan terhadap perbedaan laju perpindahan panas dan peningkatan kinerja perpindahan panas *superheater* sebelum dan sesudah operasi *sootblower*.
4. Penelitian tidak membahas kinerja keseluruhan *boiler* atau aspek ekonomis penggunaan bahan bakar.
5. Data yang diambil berasal dari kondisi operasi stabil (steady-state), sedangkan beban unit digunakan sebagai parameter pendukung dalam analisis.
6. Analisis statistik menggunakan uji *t* berpasangan hanya diterapkan pada data laju perpindahan panas (*Q*) *superheater* sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower*.

Bab 2. Tinjauan Pustaka



Gambar 1. PLTU PT. Bintan Alumina Indonesia

Sumber : Dokumen Pribadi.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan uap hasil pemanasan air di dalam *boiler* untuk menggerakkan turbin dan memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik. Di PT. Bintan Alumina Indonesia, proses pembakaran di dalam boiler menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utama.

Penggunaan batu bara dalam jangka waktu tertentu dapat menimbulkan permasalahan berupa terbentuknya *fouling* atau jelaga yang menempel pada permukaan pipa-pipa *superheater*. Keberadaan *fouling* ini dapat menghambat

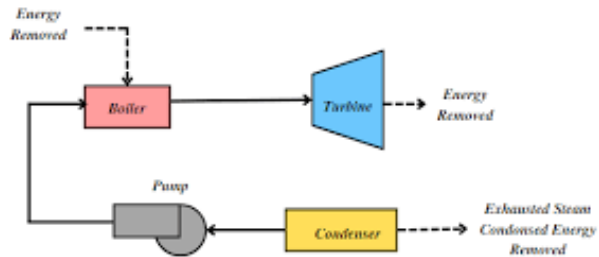
proses perpindahan panas dari gas buang ke uap, sehingga menurunkan kinerja *superheater*.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *fouling* pada *superheater* berpengaruh signifikan terhadap penurunan laju dan peningkatan kinerja perpindahan panas. Sumarno dkk. menjelaskan bahwa penumpukan abu pada permukaan pipa *superheater* bertindak sebagai penghambat perpindahan panas, sehingga panas dari gas buang tidak dapat diserap secara optimal oleh uap. [2] Fajri dan Arizona menyatakan bahwa pengoperasian *sootblower* mampu meningkatkan temperatur uap keluar serta laju perpindahan panas *superheater* melalui pembersihan endapan abu. [1] Purnama menambahkan bahwa pengoperasian *sootblower* yang tidak optimal dapat menyebabkan ketidakstabilan temperatur uap dan menurunnya kinerja *superheater*. [4] Selain itu, Hendri dkk. menyimpulkan bahwa *fouling* merupakan salah satu faktor utama penurunan kinerja perpindahan panas pada *boiler* berbahan bakar batu bara, sehingga pembersihan permukaan pemanas secara rutin sangat diperlukan. [3]

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa *sootblower* memiliki peran penting dalam memulihkan kinerja *superheater*. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada analisis perbandingan laju dan peningkatan kinerja perpindahan panas *superheater* sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower* pada *Boiler* Unit 05 di PT. Bintang Alumina Indonesia.

2.1. Prinsip Kerja PLTU

Secara umum, sistem PLTU terdiri dari empat komponen utama, yaitu *boiler*, turbin uap, *condenser*, dan pompa kondensat. Diagram pembangkit listrik tenaga uap dapat dilihat pada gambar. 2.



Gambar 2. Skema Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Sumber: <https://eprints.untirta.ac.id>.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memanfaatkan uap dan air sebagai media kerja dalam sistem tertutup, dengan penggunaan fluida yang serupa terus-menerus. Secara sederhana, air dimasukkan ke dalam ketel hingga menutupi seluruh permukaan pemanas. Di dalam ketel tersebut, air dipanaskan menggunakan pemanas yang memanfaatkan bahan bakar seperti batu bara, minyak, atau gas, sehingga air berubah menjadi uap dengan tekanan dan suhu yang telah ditetapkan. Uap yang dihasilkan kemudian mengalir ke turbin untuk menghasilkan energi mekanik. Rotasi turbin ini terhubung dengan generator untuk menghasilkan energi listrik. Uap yang tersisa dari turbin didinginkan di kondensor dengan bantuan air pendingin hingga berubah menjadi air kondensat, yang selanjutnya dipompa kembali ke *boiler* untuk menjadi air pengisi. Proses ini berlangsung secara berkelanjutan.

2.2. Katel Uap (*Boiler*)

Boiler (ketel uap) merupakan bejana tertutup yang berfungsi untuk memanaskan air hingga menghasilkan uap, panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar dalam *boiler* dialirkan ke air melalui pipa-pipa pemanas di dalam unit *boiler*, proses penguapan terjadi ketika suhu air mencapai titik tertentu sehingga terbentuk uap panas. [1] *Boiler* juga memanfaatkan berbagai jenis bahan bakar, mulai dari yang umum seperti batubara, listrik (plasma), gas, hingga biomassa.

Uap yang dihasilkan *boiler* adalah uap *superheat* dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran, dan panas pembakaran yang diberikan. *Boiler* yang konstruksinya terdiri dari pipa-pipa berisi air disebut dengan *water tube boiler*.

Ketel atau pembangkit uap adalah salah satu dari sekian banyak peralatan dalam siklus energi thermal yang bertujuan untuk mengubah air menjadi uap bertekanan sehingga dapat digunakan untuk mengoperasikan mesin tenaga uap atau turbin. Jenis *boiler* di PT. Bintan Alumina Indonesia adalah jenis *Pulverized Coal/Combustion*.

Tabel 1. Spesifikasi Boiler PLTU PT. Bintan Alumina Indonesia

Nama	Satuan	Parameter
Model Boiler	HX220/9.8-II 2	
Penguapan Boiler	T/h	220
Tekanan Kerja Drum	Mpa	11.39
Tekanan outlet superheater	Mpa	9.8
Suhu outlet superheater	°C	540
Suhu air umpan masuk economizer	°C	215
Suhu gas buang inlet preheater	°C	392
Suhu knalpot	°C	142
Konsumsi bahan bakar	T/h	35
Koefisien Udara berlebih		1.2
Efisiensi Boiler	%	91.64
Kehilangan asap	%	7.3

Kerugian pembakaran tidak sempurna	%	0
Kerugian pembakaran tidak sempurna	%	1
Kehilangan panas	%	0.57

2.2.1. Komponen – komponen *Boiler*

Komponen-komponen dalam *boiler* yang berkaitan dengan proses transformasi dari cair menjadi uap menggunakan energi panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar. Berikut adalah bagian-bagian dari *boiler* yang terlibat dalam proses perubahan fase tersebut:

1. *Steam Drum*

Steam drum merupakan salah satu bagian penting dari boiler jenis *water tube* yang berperan sebagai media pemisahan antara uap dan air yang dihasilkan dari pemanasan di dalam tabung-tabung air. Biasanya, *steam drum* berada di bagian atas *boiler* dan menjadi pusat sirkulasi antara air dan uap dalam sistem tersebut. *Steam Drum* berfungsi :

- Menampung air yang akan dipanaskan pada pipa-pipa penguap (*wall tube*), dan menampung uap air dari pipa-pipa penguap sebelum dialirkan ke *superheater*.
- Memisahkan uap dan air yang telah dipanaskan di ruang bakar
- Mengatur kualitas air *boiler*, dengan cara membuang kotoran-kotoran yang terlarut di dalam *boiler* melalui *continous blowdown*.
- Mengatur permukaan air sehingga tidak terjadi kekurangan saat *boiler* beroperasi yang dapat menyebabkan *overheating* pada pipa *boiler*.



Gambar 3. Steam Drum di PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia

Sumber : Dokumen Pribadi.

Level air dari drum harus selalu dijaga agar selalu tetap setengah dari tinggi drum. Banyaknya air pengisi yang masuk ke *steam drum* harus sebanding dengan banyaknya uap yang meninggalkan drum, agar level air tetap konstan. Batas maksimum dan minimum level air dalam *steam drum* adalah -800 mm s/d 800 mm dari titik 0 (setengah tinggi drum).

Tabel 2. Spesifikasi Steam Drum di PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia

No	Nama	Item	Satuan	Titik tengah
1	Steam Drum	Diameter	mm	1600
2		Berat	t	52,51
3		Ketebalan	mm	90
4		Merk		P355GH
5		Level air Normal	mm	150
6		Level air tidak Normal	mm	-150
7		Perangkat pemurnian uap	Cyclone separator	

2. Economizer

Economizer adalah salah satu komponen dalam *boiler* yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi *boiler*. Caranya adalah dengan memanfaatkan gas asap yang masih panas untuk memanaskan air sebelum air tersebut dialirkan ke *steam drum*. Kata "*economizer*" berasal dari fungsinya, yaitu menghemat penggunaan bahan bakar dengan menyerap panas dari gas buang sebelum gas tersebut keluar melalui cerobong. Gas sisa pembakaran dari *boiler* akan melewati *superheater*, kemudian diteruskan ke bagian outlet *economizer*, lalu menuju ke bagian inlet *economizer*, dan akhirnya ke *air heater*.

1. Superheater

Superheater merupakan salah satu bagian dari *boiler* yang berperan dalam meningkatkan suhu uap sehingga menghasilkan uap yang sesuai untuk menggerakkan turbin. Berikut adalah alur uap di *Superheater*:

Steam Drum → Superheater Sekunder → Header Superheater Sekunder → Desuperheater (Spray Attenuator) → Superheater Primer → Header Superheater Primer → Main Steam Pipe (Pipa Uap Utama) → Turbin.

Gambar 4. Tahapan pada Superheater

Sumber: Dokumen Pribadi.

a. Superheater Sekunder / Low Temperature Superheater (LTS)

Pada Superheater Tingkat satu, uap dari Steam Drum dipanaskan lebih lanjut, tetapi suhu uap tersebut masih belum cukup untuk menggerakkan sudu-sudu *Turbine*, karena uap tersebut masih dalam kondisi basah (uap yang masih memiliki partikel air). Umumnya, uap yang dihasilkan dari *Superheater* sekunder ini dimanfaatkan untuk menjalankan *Sootblower*.

b. *Superheater Primer / High Temperature Superheater (HTS)*

Di *Superheater* Tingkat Primer atau Utama, uap yang berasal dari *Superheater* Sekunder dipanaskan kembali sampai mencapai suhu yang membuat uap tersebut benar-benar kering (tanpa adanya tetesan air). Uap yang dihasilkan dari *Superheater* Primer inilah yang akan dimanfaatkan untuk menggerakkan sudu-sudu Turbin.

c. *Desuperheater / Spray Water*

Agar suhu uap yang masuk ke Turbine tetap stabil, operator *Boiler* perlu memastikan bahwa suhu uap yang dihasilkan oleh *superheater* tetap memenuhi standar. *Desuperheater* berfungsi untuk mengatur suhu uap di *Superheater* agar tetap optimal (tidak dalam keadaan basah dan juga tidak terlalu panas). *Desuperheater* biasanya diambil dari air pengisi *Boiler*. *Desuperheater* akan terbuka ketika suhu uap terlalu tinggi dan akan menutup atau berkurang ketika suhu uap terlalu rendah.

d. Uap Kering

Uap kering merujuk pada uap yang tidak lagi mengandung tetesan air. Untuk memastikan bahwa uap tersebut benar-benar kering, kita tidak bisa hanya memeriksa suhu uap saja, karena tekanan uap juga memainkan peran penting dalam menentukan keadaan keringnya uap. Oleh karena itu, seorang Operator *Boiler* perlu memiliki Tabel Uap. Dengan menggunakan Tabel Uap, seorang Operator *Boiler* dapat memahami pada suhu berapa uap dapat dianggap kering pada tekanan tertentu.

Sebagai contoh, kita diizinkan untuk menjalankan turbin untuk pertama kalinya ketika suhu uap mencapai 365° Celcius dan tekanan uap berada di 1,96 Mpa karena uap tersebut sudah dalam keadaan kering. Namun, jika tekanan uap naik melebihi 1,96 Mpa sementara suhu tetap di 365° Celcius, maka uap tersebut

tidak lagi kering. Dalam situasi ini, operator turbin harus menghentikan turbin karena uap yang basah tidak diperbolehkan untuk digunakan dalam memutar turbin.

e. *Overheating Superheater*

Overheat atau panas berlebih pada superheater sangat berbahaya. Selain dapat merusak peralatan Turbin akibat melebihi batas maksimal temperatur uap yang diijinkan memutar sudu-sudu Turbin, *superheating* pada *superheater* juga dapat merusak *Superheater Tube* (Pipa *Superheater*).

2. Dinding Air (*Water Wall Tube*)

Water wall tube berfungsi untuk menerima dan menyalurkan air yang dipompa oleh *boiler circulating pump* ke dalam *boiler*. Air tersebut kemudian dipanaskan di dalam pipa hingga mencapai kondisi uap, sebelum dialirkan menuju *steam drum* untuk proses selanjutnya. [5] Dinding pipa *boiler* terdiri dari pipa yang memiliki ulir dalam (*ribbed tube*). Tujuan dari desain ini adalah agar aliran air di dalam dinding pipa bergerak secara berputar (*turbulen*). Hal ini bertujuan untuk meningkatkan dan meratakan penyerapan panas, serta untuk mencegah terjadinya *overheating* akibat penguapan awal air pada dinding pipa yang terkena panas radiasi secara langsung dari ruang pembakaran.

Wall tube memiliki dua header di bagian bawah yang berfungsi untuk mengalirkan air dari *Downcomer*. *Downcomer* adalah pipa yang menghubungkan tangki uap dengan bagian bawah header rendah. Agar dapat menghindari penyebaran panas dari dalam *furnace* ke luar melalui *wall tube*, di bagian luar *wall tube* dipasang dinding isolasi yang terbuat dari serat mineral.

3. Ruang Bakar (*Furnace*)

Ruang bakar adalah bagian dari ketel uap (*Boiler*) yang digunakan untuk membakar bahan bakar. Tugas utama dari tungku *boiler* adalah membakar bahan bakar secara menyeluruh dan seefisien mungkin. Menyisakan bahan yang tidak terbakar akan menurunkan efisiensi termal dan meningkatkan emisi. Proses pembakaran harus dilakukan dengan cara yang ramah terhadap lingkungan.

Ruang bakar terdiri dari dua bagian, yaitu:

a. Ruang Pertama (Ruang Pembakaran / *Radiant Zone*)

Ruang pertama pada *boiler* merupakan zona utama tempat berlangsungnya pembakaran batubara. Pada bagian ini, nyala api dan radiasi panas memiliki intensitas yang sangat tinggi. Energi panas tersebut langsung diserap oleh pipa-pipa *water wall tube* yang berfungsi menyalurkan air dari *steam drum* menuju header di sisi kanan dan kiri *boiler*.

Udara pembakaran dipasok ke ruang ini oleh *Forced Draft Fan* (FDF). Udara masuk melalui celah-celah kecil pada dinding *furnace* serta melalui kisi-kisi di bagian bawah ruang bakar. Jumlah udara yang diperlukan diatur oleh *Air Draft Controller* melalui tujuh katup pengendali yang dioperasikan dari panel kontrol *boiler*. Pengaturan suplai udara yang tepat memastikan proses pembakaran berlangsung stabil, efisien, dan menghasilkan panas sesuai kebutuhan operasi *boiler*.

b. Ruang Kedua (Ruang Konveksi / *Convective Pass*)

Ruang kedua berfungsi sebagai jalur aliran gas panas yang berasal dari proses pembakaran di ruang pertama. Pada bagian ini, perpindahan panas terutama terjadi melalui mekanisme konveksi, di mana gas panas mengalir melewati pipa-pipa penukar panas, termasuk pipa air yang menghubungkan drum atas dan drum bawah.

Pergerakan gas panas di ruang ini dibantu oleh *Induced Draft Fan* (IDF), yang menarik gas buang sehingga menghasilkan aliran gas dari ruang pertama menuju ruang kedua. Untuk meningkatkan efektivitas penyerapan panas, ruang ini dilengkapi dengan sekat-sekat konveksi yang dirancang untuk memperpanjang lintasan gas panas. Dengan adanya sekat tersebut, panas dapat diserap secara lebih merata oleh pipa-pipa air, sebagian permukaan drum atas, serta seluruh bagian luar drum bawah. [6]

4. Coal Feeder

Peralatan utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) bertugas untuk mengontrol aliran batubara dari *coal bunker* atau silo ke *coal mill* agar dihaluskan. Fungsi alat ini adalah untuk mengatur jumlah batubara yang masuk sesuai dengan jumlah yang dibutuhkan sebagai bahan bakar untuk *boiler*.

5. Coal Mill

Perangkat yang digunakan untuk menghaluskan batubara hingga mencapai ukuran serbuk 200 Mesh dan untuk memindahkan serbuk batubara dari penggiling batubara ke tungku menggunakan aliran udara primer.

2.2.2. Komponen – komponen Pendukung *Boiler*

1. *Blower Fan (Forced Draft Fan)*

Perangkat yang berbentuk kipas ini bertujuan untuk secara paksa mengalirkan udara pembakaran ke dalam *furnace*, terpasang di ujung saluran air intake *boiler* dan dioperasikan oleh motor listrik.

2. *Primary Fan*

Kipas ini berfungsi untuk menyediakan udara bertekanan yang akan digunakan untuk mengangkut bahan bakar yang telah dihancurkan dari *pulverizer* menuju *boiler*. Parameter yang terkendali pada udara primer adalah besarnya tekanan kerja, oleh karena itu kipas yang dipakai adalah jenis kipas sentrifugal. Kipas sentrifugal dikenal dapat menghasilkan tekanan udara yang lebih tinggi dibandingkan dengan kipas aksial, meskipun aliran debitnya cukup besar.

3. *Reheater*

Reheater berfungsi untuk menghangatkan kembali uap yang keluar dari Turbin Bertekanan Tinggi dengan memanfaatkan gas sisa pembakaran yang suhunya masih relatif tinggi. Pemanasan ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan, di mana perpindahan panas yang paling utama pada *reheater* adalah perpindahan panas melalui konveksi.

4. *Induce Fan*

Kipas yang menarik udara dari dalam *boiler* ke cerobong menciptakan tekanan negatif di dalam *boiler*, sehingga menjaga sirkulasi udara untuk pembakaran tetap berjalan dengan baik.

5. *Air Preheat Coil*

Perangkat ini berfungsi untuk memanaskan udara sebelum masuk ke *Air Heater*, dengan sumber panas yang berasal dari air *Deaerator*. Udara yang akan

masuk ke dalam *Air Heater* harus dipanaskan terlebih dahulu untuk mencegah terjadinya stres termal akibat perbedaan suhu yang ekstrem.

6. *Air Heater*

Komponen ini adalah perangkat yang berfungsi untuk menghangatkan udara yang kemudian digunakan untuk mengalirkan bahan bakar agar dapat terbakar dengan sempurna. Melalui penggunaan gas buang ini, akan tercipta penghematan dalam biaya bahan bakar yang dapat meningkatkan efisiensi proses pembakaran.

7. *Burner*

Merupakan perangkat yang digunakan untuk menciptakan sumber api bagi *boiler*, yaitu dengan membakar campuran bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar *boiler*, yang dipisahkan dari fluida kerja air yang mengalir melalui pipa-pipa *boiler*.

8. *Oil Gun*

Alat ini digunakan untuk mendukung proses pembakaran pada tahap awal penyalaan *boiler*, berfungsi sebagai pemanas awal dengan memanfaatkan bahan bakar solar, serta menjaga kestabilan proses pembakaran.

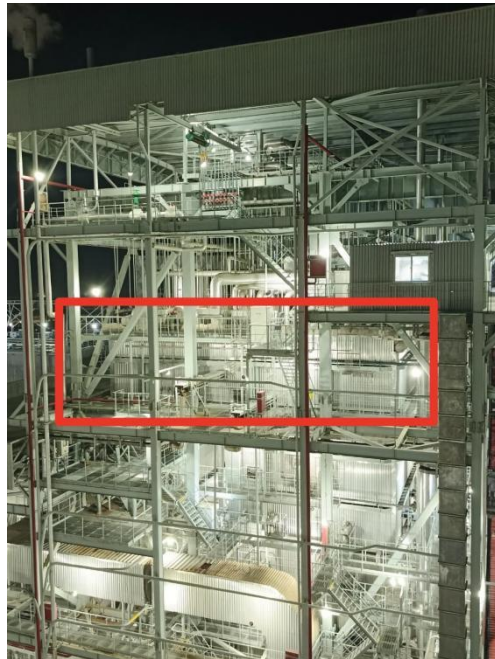
9. *Sootblower*

Adalah perangkat tambahan untuk *boiler* yang berfungsi untuk menghilangkan kotoran yang dihasilkan dari proses pembakaran yang menempel pada pipa-pipa *wall tube*, *superheater*, *reheater*, *economizer*, dan *air heater*. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa perpindahan panas berlangsung dengan baik dan efisien.

10. *Safety Valve*

Berfungsi sebagai alat pengaman saat tekanan uap yang dihasilkan oleh *boiler* melebihi batas yang aman. Tekanan yang berlebihan ini bisa terjadi akibat panas dari *boiler* yang terlalu tinggi atau karena penurunan beban turbin yang mendadak.

2.3. Superheater



Gambar 5. Posisi *Superheater* di PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia

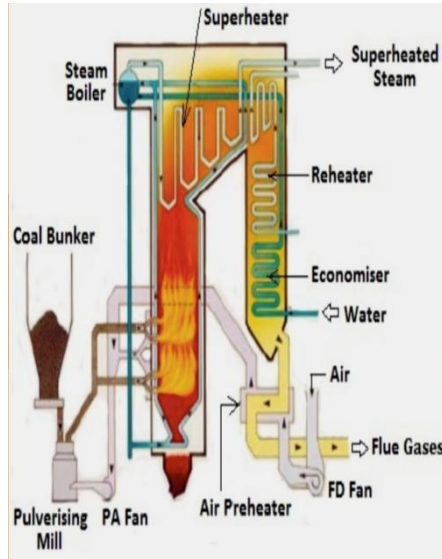
Sumber : Dokumen Pribadi.

Superheater merupakan perangkat yang terdapat dalam sistem *boiler* pabrik, yang berfungsi meningkatkan suhu uap jenuh hingga mencapai tingkat yang lebih tinggi. Peningkatan suhu ini diperlukan untuk memenuhi kebutuhan operasional turbin. Uap yang dihasilkan melalui proses pemanasan di saluran asap, baik berupa uap jenuh maupun uap basah, cenderung mengalami kondensasi dengan cepat ketika diterapkan pada turbin atau ketika diperluas/ekspansi.[1] Kinerja *superheater* dalam *boiler* dipengaruhi oleh suhu gas buang, kebersihan

permukaan pemanas, kecepatan aliran gas buang, kecepatan aliran uap, tekanan uap, rancangan *superheater*, dan kondisi operasional *boiler*.

Koefisien perpindahan panas pada *superheater* menggambarkan seberapa baik *superheater* melakukan proses pemindahan panas ke fluida uap. Nilai koefisien ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti suhu uap masuk dan keluar *superheater*, suhu gas buang yang mengalir melewati pipa-pipa *superheater*, laju aliran uap dan gas buang, serta luas permukaan yang menjadi media perpindahan panas. Semakin optimal parameter-parameter tersebut, semakin baik kinerja perpindahan panas pada *superheater*. [7] Nilai koefisien perpindahan panas yang rendah dapat dipengaruhi oleh kondisi dan efektivitas proses *sootblower*. Jika pembersihan tidak optimal, sisa deposit pada permukaan *superheater* akan menghambat aliran panas sehingga menurunkan kemampuan perpindahan panas.

2.3.1 Prinsip Kerja *Superheater*



Gambar 6. Skema Kerja *Superheater*

Sumber: <https://optimaxx.id/id/simulasi-cfd>.

Prinsip dasar dari *superheater* adalah untuk menaikkan temperatur uap jenuh menjadi uap kering dengan memanfaatkan panas dari gas yang dihasilkan selama proses pembakaran. Uap jenuh dari steam drum mengalir melalui pipa-pipa *superheater* yang berada di jalur aliran gas panas. Panas dari gas tersebut berpindah ke uap dengan cara konveksi, radiasi, dan konduksi, sehingga meningkatkan suhu uap di atas titik jenuh. Uap yang dihasilkan memiliki temperatur tinggi dan tingkat kelembapan yang rendah, sehingga lebih efektif untuk menggerakkan turbin uap dan meningkatkan efisiensi termal dari sistem pembangkit.

Superheater diklasifikasikan menjadi dua tahap berdasarkan temperatur, yaitu:

1. Low Temperature Superheater (LTS)

Uap jenuh yang berasal dari steam drum dialirkan ke primary *superheater* atau *superheater* suhu rendah (LTS). Uap yang keluar dari LTS selanjutnya dipindahkan ke *superheater* bertemperatur tinggi untuk dipanaskan kembali, sehingga menghasilkan steam yang lebih panas. Selain itu, uap dari LTS juga dimanfaatkan untuk proses atomisasi bahan bakar, yang membantu memastikan atomisasi bahan bakar agar pembakaran dapat berlangsung secara sempurna.

Tabel 3. Spesifikasi Superheater Low Temperature PLTU PT. BAI

No	Nama	Item	Satuan	Spesifikasi
1	<i>Superheater Low Temperature</i>	Diameter Luar dan Ketebalan Dinding	mm	42x5
2		Temperatur Uap Outlet	°C	392
3		Jarak Celah	mm	67
4		Bahan		20G/12Cr1MoVG
5		Luas Permukaan Pemanas	m ²	739
6		Laju Aliran Massa	Kg/m ² . s	1125

2. High Temperature Superheater (HTS)

Uap yang dihasilkan dari pemanas suhu rendah (LTS) selanjutnya mengalir menuju *superheater* suhu tinggi (HTS), yang ditempatkan di bagian gas dengan suhu sangat tinggi. Bagian dari HTS ini terletak tepat di atas ruang bakar, sehingga perpindahan panas yang terjadi pada HTS melibatkan mekanisme radiasi dan konveksi. Setelah itu, uap panas yang terkumpul dari HTS dialirkan ke turbin.

Tabel 4. Spesifikasi Superheater High Temperature PLTU PT. BAI

No	Nama	Item	Satuan	Spesifikasi
1	<i>Superheater High Temperature</i>	Diameter Luar dan Ketebalan Dinding	mm	42x5
2		Temperatur Uap Outlet	°C	540

3		Jarak Celah	mm	67
4		Bahan		12Cr1MoVG/SA213-T91
5		Luas Permukaan Pemanas	m ²	739
6		Laju Aliran Massa	Kg/m ² . s	1125



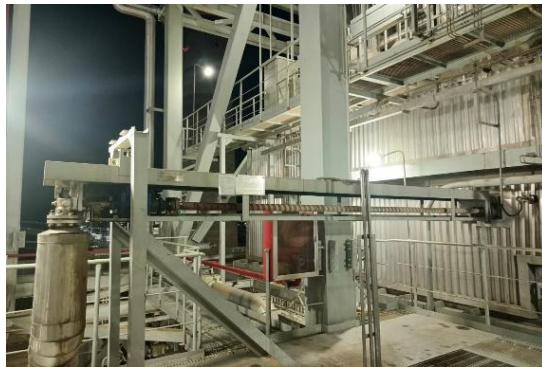
Gambar 7. Posisi Superheater di Distributed Control System

Sumber: Dokumen Pribadi.

2.4. Sootblower

Penerapan *sootblower* merupakan salah satu strategi yang umum digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) untuk menjaga kebersihan permukaan pemanas dan mempertahankan efisiensi proses perpindahan panas. *Sootblower* merupakan salah satu peralatan pendukung pada sistem *boiler* yang berfungsi untuk membersihkan endapan jelaga, kerak, atau abu yang menempel pada permukaan pipa-pipa seperti *wall tube* (dinding ruang bakar), *superheater*, *reheater*, *economizer*, dan *air heater*. Keberadaan lapisan jelaga pada permukaan pipa dapat menghambat proses perpindahan panas, sehingga kinerja *boiler* menjadi kurang efisien. Oleh karena itu, fungsi *sootblower* sangat vital dalam

menjaga kinerja perpindahan panas dan kinerja keseluruhan *boiler*. [4] Operasi *sootblower* dilaksanakan secara periodik berdasarkan kondisi operasi dan tingkat penumpukan abu pada permukaan pemanas. Penerapan sistem ini bertujuan untuk mempertahankan peningkatan kinerja perpindahan panas, menjaga kestabilan temperatur uap *superheat*, serta memastikan kinerja *boiler* tetap berada pada kondisi operasi yang optimal.



Gambar 8. Posisi Sootblower di PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia

Sumber : Dokumen Pribadi.

Setiap unit *sootblower* dilengkapi dengan *adjusttable sootblower valve* yang berfungsi mengatur aliran uap sesuai kebutuhan selama proses pembersihan. Katup ini akan terbuka ketika *sootblower* mulai beroperasi untuk menyalurkan uap pembersih, dan secara otomatis menutup kembali saat lance tube bergerak mundur menuju posisi berhenti (*stop position*). Pengoperasian *sootblower* juga berpengaruh terhadap pemanfaatan energi panas pada *boiler*. Dalam praktiknya, sering ditemukan perbedaan antara tekanan uap yang seharusnya dicapai dan tekanan uap yang terjadi saat *sootblower* dioperasikan. Ketidaksesuaian ini

umumnya disebabkan oleh kinerja *pneumatic control valve* (PCV) yang tidak bekerja optimal.

PCV tersebut berfungsi mengatur tekanan uap dengan sistem penggerak *pneumatik*, sehingga ketika mekanismenya tidak normal, tekanan uap yang dialirkan ke *sootblower* tidak stabil dan dapat memengaruhi efektivitas proses pembersihan serta kinerja perpindahan panas pada *superheater*. [8] Uap yang digunakan sebagai media pembersih pada *sootblower* berasal dari aliran uap *Superheater* Sekunder / *Low Temperature Superheater* (LTS) dengan tekanan operasi sebesar 0.9 Mpa sesuai standar di PT. Bintang Alumina Indonesia. Kinerja *sootblower* yang tidak optimal dapat menyebabkan penurunan efektivitas kerja *superheater*, karena masih terdapat endapan *fouling* yang menempel pada permukaannya. Kondisi ini dapat semakin memburuk seiring waktu, sebab *fouling* yang tidak terlepas berpotensi mengeras akibat lamanya waktu operasi boiler, sehingga menghambat proses perpindahan panas.

Peningkatan kinerja perpindahan panas pada *superheater* sangat bergantung pada tingkat kebersihan permukaan pipanya. Selama proses pembakaran, partikel abu dan jelaga yang terbawa oleh gas buang dapat menempel pada permukaan *superheater* dan membentuk lapisan *fouling*. Lapisan ini bersifat seperti isolator termal, sehingga menambah hambatan perpindahan panas dan mengurangi kemampuan pipa untuk menyerap panas dari aliran gas buang.

Penumpukan *fouling* menimbulkan beberapa dampak langsung pada kinerja *superheater*, yaitu :

1. Terjadinya penurunan suhu uap keluar (T_{out}) karena jumlah panas yang dapat diserap oleh uap menjadi lebih sedikit.
2. Menurunnya laju perpindahan panas (Q) akibat berkurangnya perbedaan temperatur efektif antara gas buang dan uap.

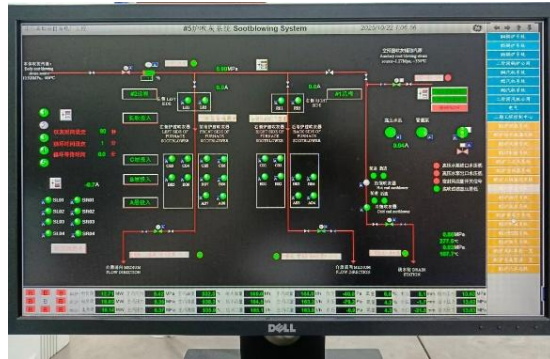
3. Penurunan kinerja perpindahan panas *superheater* (%) karena sebagian energi panas dari gas buang tidak dapat dimanfaatkan dan akhirnya terbuang melalui cerobong.

Untuk mengembalikan kinerja tersebut, dilakukan proses pembersihan menggunakan ***sootblower***.

2.4.1 Cara Kerja Sootblower

Prinsip kerja *sootblower* dilakukan dengan menyemprotkan udara bertekanan atau uap panas yang digunakan untuk membersihkan kerak atau jelaga yang menempel pada permukaan pipa-pipa sebelum *superheater* di dalam *boiler*.

1. Uap bertekanan tinggi dari sistem boiler dialirkan menuju *sootblower* melalui katup pengatur yang berfungsi mengatur aliran uap selama proses pembersihan.
2. Uap tersebut kemudian masuk ke dalam *lance tube*, yaitu pipa semprot yang digunakan untuk menyalurkan uap ke permukaan pemanas.
3. Selanjutnya, *lance tube* bergerak maju dan berputar agar semburan uap dapat menjangkau seluruh bagian permukaan tabung pemanas secara merata.
4. Uap bertekanan tinggi keluar melalui *nozzle*, menumbuk dan melepaskan endapan abu atau jelaga yang menempel pada permukaan tabung pemanas.
5. Endapan abu yang terlepas akan jatuh ke bagian bawah *boiler* dan dikeluarkan melalui sistem pembuangan abu.
6. Setelah proses pembersihan selesai, *lance tube* ditarik kembali ke posisi semula di luar area panas.
7. Terakhir, katup uap menutup secara otomatis untuk menghentikan aliran uap ke *sootblower* dan menandakan proses pembersihan telah berakhir.



Gambar 9. Posisi Sootblower di Distributed Control System

Sumber: Dokumen Pribadi.

2.5. Perpindahan Panas Pada *Superheater*

Perpindahan panas merupakan proses berpindahnya energi termal akibat adanya perbedaan temperatur antara dua medium. Dalam sistem *boiler*, khususnya pada *superheater*, perpindahan panas terjadi ketika energi panas dari gas buang hasil pembakaran batu bara ditransfer ke uap yang mengalir di dalam pipa-pipa *superheater*. Proses ini berperan penting dalam meningkatkan temperatur uap sebelum digunakan untuk memutar turbin uap. [2] Secara umum, perpindahan panas dapat berlangsung melalui tiga mekanisme utama, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Konduksi merupakan proses perpindahan panas yang terjadi akibat interaksi antarpartikel dalam suatu zat, di mana energi panas mengalir dari daerah bertemperatur tinggi ke daerah bertemperatur lebih rendah melalui medium padat, seperti dinding pipa *superheater*. [9]

Konveksi merupakan proses perpindahan panas antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya, yang dapat terjadi secara alami maupun paksa. Pada *superheater*, mekanisme konveksi yang dominan adalah konveksi paksa karena gas buang mengalir dengan kecepatan tinggi melewati permukaan

pipa pemanas.[10] Selain konduksi dan konveksi, perpindahan panas pada superheater juga terjadi melalui mekanisme radiasi. Radiasi merupakan perpindahan panas dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang tidak memerlukan medium perantara dan menjadi signifikan pada temperatur gas buang yang tinggi. Ketiga mekanisme perpindahan panas tersebut berlangsung secara bersamaan dalam proses pemanasan uap pada *superheater*.

Dalam pengoperasian *boiler* jangka panjang, permukaan pipa *superheater* dapat mengalami penumpukan abu pembakaran (*fouling*) yang menyebabkan peningkatan tahanan termal dan menurunkan efektivitas perpindahan panas. Penurunan kinerja ini dapat mengakibatkan berkurangnya energi panas yang diserap oleh uap. Oleh karena itu, pengoperasian *sootblower* diperlukan untuk membersihkan permukaan pipa *superheater* sehingga proses perpindahan panas dapat kembali berlangsung secara optimal. [2] [3]

2.6. Laju Perpindahan Panas *Superheater*

Laju perpindahan panas *superheater* merupakan besarnya energi panas yang diserap oleh uap per satuan waktu selama proses pemanasan di dalam superheater. Parameter ini digunakan untuk menggambarkan kemampuan *superheater* dalam mentransfer energi panas dari gas buang hasil pembakaran batu bara ke uap yang mengalir di dalam pipa *superheater* [1].

Dalam analisis kinerja *superheater*, laju perpindahan panas dapat ditentukan berdasarkan perubahan temperatur uap antara sisi inlet dan outlet *superheater*. Pendekatan ini didasarkan pada neraca energi uap dan banyak digunakan dalam penelitian yang membahas pengaruh pengoperasian *sootblower* terhadap energi panas yang diserap *superheater* pada PLTU [7].

Perubahan temperatur uap pada superheater dinyatakan sebagai selisih antara temperatur uap keluar dan temperatur uap masuk superheater. Besarnya perbedaan temperatur ini menunjukkan tingkat pemanasan uap yang terjadi selama proses perpindahan panas di dalam *superheater*. Perubahan temperatur uap pada *superheater* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 1 [1].

$$\Delta T = T_{\text{Out}} - T_{\text{In}} \dots\dots\dots 1$$

[1]

Dimana:

ΔT = Perubahan temperatur uap *superheater* (°C)

T_{out} = Temperatur uap keluar *superheater* (°C)

T_{in} = Temperatur uap masuk *superheater* (°C)

Untuk menghitung, laju perpindahan panas *superheater* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 2. [1]

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

[1]

Dimana :

Q = laju perpindahan panas *superheater* (kW)

$\dot{m}$ = laju aliran massa uap (kg/s)

c_p = kalor jenis uap (kJ/kg·K)

T_{out} = temperatur uap keluar *superheater* (°C)

T_{in} = temperatur uap masuk *superheater* (°C)

Perhitungan laju perpindahan panas pada penelitian ini dilakukan pada kondisi operasi boiler yang relatif stabil (*steady-state*), sehingga perubahan nilai laju perpindahan panas yang terjadi dapat dikaitkan dengan pengaruh pengoperasian *sootblower*.

2.7.Parameter yang Mempengaruhi Kinerja *Superheater*

Kinerja *superheater* dipengaruhi oleh berbagai parameter operasi *boiler*, antara lain laju aliran massa uap, temperatur uap inlet dan outlet *superheater*, tekanan uap, serta kondisi aliran dan temperatur gas buang. Parameter-

parameter tersebut menentukan besarnya energi panas yang dapat diserap oleh uap selama proses pemanasan di dalam *superheater*. [2]

Laju aliran massa uap memengaruhi jumlah energi panas yang diserap oleh uap, sedangkan perbedaan temperatur uap inlet dan outlet menunjukkan tingkat pemanasan uap selama melewati *superheater*. Tekanan uap juga berpengaruh terhadap sifat termofisika uap, seperti nilai kalor jenis (c_p), yang digunakan dalam perhitungan laju perpindahan panas. Selain itu, kondisi kebersihan permukaan pipa *superheater* berperan penting dalam menentukan efektivitas perpindahan panas. [4]

Pada penelitian ini, data parameter operasi diperoleh dari sistem *Distributed Control System* (DCS) di *Boiler Unit 05*. Untuk meminimalkan pengaruh variabel lain, kondisi operasi *boiler* dijaga relatif stabil sehingga analisis dapat difokuskan pada pengaruh pengoperasian *sootblower* terhadap kinerja *superheater*.

2.8. Persentase Peningkatan Kinerja Perpindahan Panas *Superheater*

Persentase peningkatan perpindahan panas *superheater* merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui perubahan kinerja perpindahan panas setelah dilakukannya pengoperasian *sootblower*. Parameter ini menunjukkan besarnya peningkatan kemampuan *superheater* dalam mentransfer energi panas dari gas hasil pembakaran menuju uap yang mengalir di dalam pipa *superheater*. Analisis tersebut dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas *sootblower* dalam mengurangi fouling yang menempel pada permukaan pipa *superheater* [7].

Dalam kondisi operasi *boiler* secara terus-menerus, permukaan pipa *superheater* dapat mengalami penumpukan abu dan jelaga hasil pembakaran batu bara. Endapan tersebut membentuk lapisan fouling yang bersifat sebagai hambatan termal sehingga proses perpindahan panas menjadi kurang maksimal. Setelah pengoperasian *sootblower* dilakukan, lapisan fouling pada permukaan pipa dapat berkurang sehingga proses perpindahan panas dari gas buang ke uap menjadi lebih efektif. Kondisi ini ditunjukkan dengan meningkatnya temperatur uap keluar *superheater* serta bertambahnya nilai laju perpindahan panas *superheater*.

Persentase peningkatan perpindahan panas *superheater* dinyatakan berdasarkan selisih antara laju perpindahan panas sesudah dan sebelum pengoperasian *sootblower* dibandingkan terhadap laju perpindahan panas sebelum *sootblower*. Pendekatan ini digunakan untuk mengetahui seberapa besar peningkatan kinerja perpindahan panas berdasarkan data aktual operasi *boiler*. Persentase peningkatan perpindahan panas dapat dihitung menggunakan persamaan 3 [11].

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

[12]

Dimana :

% Peningkatan = Persentase peningkatan perpindahan panas superheater (%)

Q_{sesudah} = Laju perpindahan panas superheater sesudah pengoperasian
sootblower (kW)

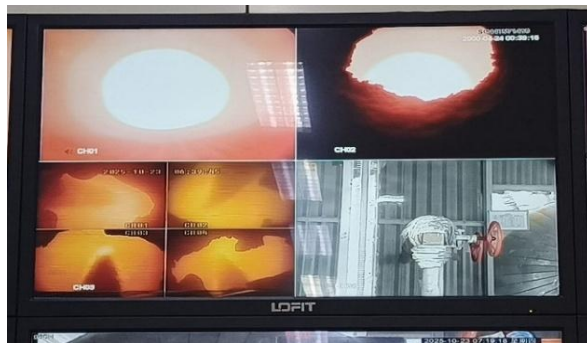
Q_{sebelum} = Laju perpindahan panas superheater sebelum pengoperasian
sootblower (kW)

Semakin tinggi nilai persentase peningkatan perpindahan panas yang diperoleh, maka menunjukkan bahwa pengoperasian sootblower semakin efektif dalam meningkatkan kinerja perpindahan panas pada superheater. Oleh karena itu, parameter ini dapat digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi keberhasilan pengoperasian sootblower dalam menjaga performa superheater serta kestabilan operasi boiler.

2.9. Fouling pada Superheater

Fouling merupakan fenomena terbentuknya lapisan abu batu bara yang menempel dan menumpuk pada permukaan pipa penghantar panas (*heat exchanger tube*) maupun pada dinding bagian dalam *boiler*. [3] Biasanya berada pada pipa *boiler*, *superheater*, *economizer*, maupun kondensor. Endapan ini

umumnya berasal dari debu, jelaga, kerak mineral, garam terlarut, atau hasil korosi yang menumpuk selama proses operasi berlangsung. Keberadaan *fouling* menyebabkan hambatan dalam proses perpindahan panas karena lapisan tersebut berfungsi sebagai isolator termal yang menghalangi aliran panas antara fluida panas dan fluida dingin. Akibatnya, peningkatan kinerja perpindahan panas menurun, suhu operasi meningkat, serta konsumsi energi menjadi lebih besar. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat menyebabkan terjadinya *overheating* pada pipa, mempercepat kerusakan material, dan menurunkan kestabilan sistem secara keseluruhan.



Gambar 10. Fouling Sebelum di Sootblower di Distributed Control System

Sumber : Dokumen Pribadi.

Pada gambar ini menjelaskan bahwa kondisi *fouling* atau jelaga yang menempel sebelum di *sootblower*.



Gambar 11. Fouling Sesudah di Sootblower di Distributed Control System

Sumber : Dokumen Pribadi.

Pada gambar ini menjelaskan bahwa kondisi *fouling* atau jelaga yang menempel sebelum di *sootblower*.

2.9.1. Jenis dan Penyebab *Fouling*

Jenis - jenis *fouling* dapat dibedakan berdasarkan penyebab terbentuknya:

1. *Fouling* akibat pengendapan zat padat (*precipitation fouling*) terjadi ketika fluida mengandung garam-garam terlarut yang mengendap pada suhu tinggi, seperti garam kalsium sulfat dan senyawa mineral lainnya.
2. *Fouling* akibat partikel padat (*particulate fouling*) muncul karena adanya partikel padat seperti debu atau pasir yang terbawa aliran fluida dan menempel pada permukaan perpindahan panas.
3. *Fouling* akibat reaksi kimia (*chemical reaction fouling*) terjadi karena adanya reaksi kimia di dalam fluida pada permukaan perpindahan panas tanpa melibatkan material permukaannya, misalnya reaksi polimerisasi.
4. *Fouling* akibat korosi (*corrosion fouling*) disebabkan oleh reaksi kimia antara fluida kerja dengan material permukaan perpindahan panas, sehingga menghasilkan produk korosi yang menempel di permukaan.

5. *Fouling* akibat aktivitas biologi (*biological fouling*) berkaitan dengan pertumbuhan atau aktivitas organisme biologis seperti lumut, jamur, atau mikroorganisme lain yang terbawa aliran fluida dan menempel pada permukaan perpindahan panas.

Pada *boiler* dengan sistem pembakaran batu bara, abu hasil pembakaran umumnya terbawa bersama gas buang (*flue gas*) menuju ruang bakar (*furnace*). Partikel-partikel abu yang ikut terbawa aliran gas tersebut dapat menimbulkan masalah seperti erosi dan korosi pada permukaan area perpindahan panas secara konveksi. Namun, permasalahan utama yang ditimbulkan oleh abu adalah terjadinya endapan pada permukaan pipa, yang kemudian menjadi penyebab terbentuknya *fouling* di dalam *boiler*. Unsur yang paling berperan dalam proses penempelan abu adalah senyawa bersifat basa, khususnya natrium (Na) yang terdapat dalam bentuk Na_2O . Apabila kandungan abu pada batubara tinggi dan disertai dengan kadar unsur basa serta Na_2O yang besar, maka potensi terjadinya *fouling* pada permukaan perpindahan panas akan semakin meningkat. [3]

Bab 3. Metodologi Penelitian

3.1. Gambaran umum

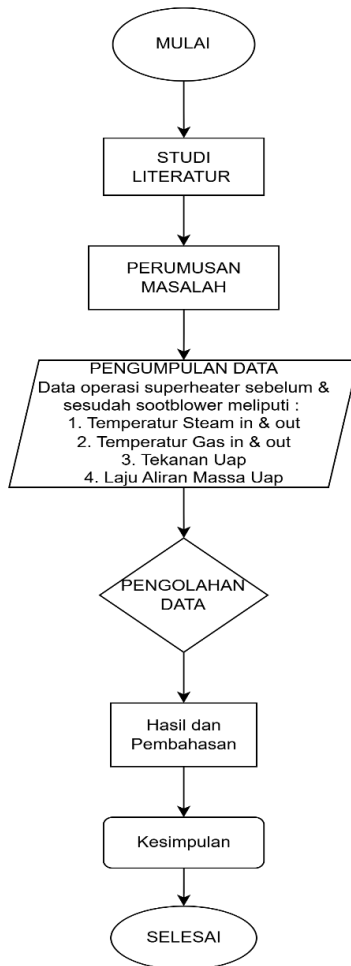
Penelitian ini dilaksanakan di PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia dengan fokus kajian pada *superheater Boiler* Unit 05. *Superheater* merupakan salah satu komponen utama *boiler* yang berfungsi meningkatkan suhu uap jenuh menjadi uap kering sebelum dialirkan ke turbin. Kinerja *superheater* ditentukan oleh efektivitas perpindahan panas antara gas buang hasil pembakaran batubara dan uap yang mengalir di dalam pipa *superheater*.

Dalam pengoperasian *boiler*, partikel abu dan jelaga hasil pembakaran batubara dapat menempel pada permukaan pipa *superheater* dan membentuk lapisan *fouling*. Keberadaan *fouling* ini dapat menghambat proses perpindahan panas. Untuk mengatasi penumpukan tersebut, *Boiler* Unit 05 dilengkapi dengan sistem *sootblower* yang berfungsi membersihkan permukaan pipa *superheater* melalui semburan uap bertekanan.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif dengan pendekatan analisis perbandingan. Analisis dilakukan dengan membandingkan kinerja perpindahan panas *superheater* pada kondisi sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower*. Data yang digunakan merupakan data operasi aktual *boiler* yang diperoleh dari sistem pemantauan operasional PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia.

Parameter yang dianalisis meliputi suhu uap, suhu gas buang, laju perpindahan panas, serta persentase peningkatan perpindahan panas *superheater*. Hasil analisis tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh

pengoperasian *sootblower* terhadap kinerja perpindahan panas *superheater* pada *Boiler Unit 05*.

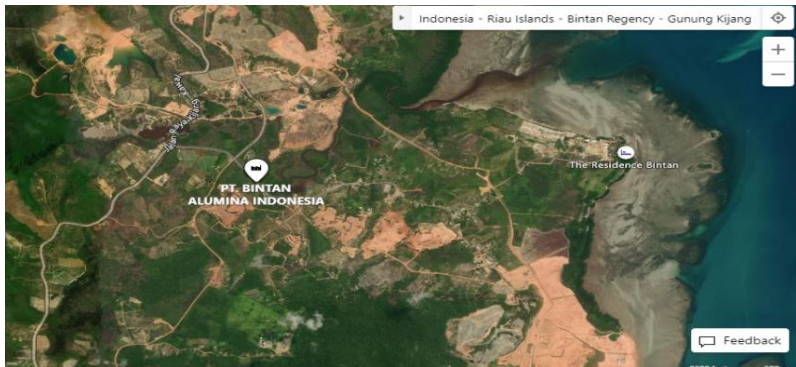


Gambar 12. Diagram Alir Tahapan Penelitian

Sumber : Dokumen Pribadi.

3.2. Waktu dan lokasi.

Penulis menjalankan penelitian yang ada ini pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) unit 5 di PT. Bintan Alumina Indonesia yang terletak di gunung Kijang, Kabupaten Bintan. Waktu pelaksanaan penelitian ini dimulai pada tanggal 2 September 2025. Lokasi penelitian dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 13. Lokasi Penelitian

Sumber : Google Earth

3.3. Teknik Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, beberapa teknik digunakan untuk mendukung proses pengumpulan data agar hasil yang diperoleh akurat dan sesuai dengan tujuan penelitian :

1. Studi Literatur

Tahap ini dilakukan dengan mengumpulkan berbagai referensi yang relevan mengenai *boiler pulverized*, *superheater*, dan *sootblower*. Penulis mempelajari teori-teori yang berkaitan dengan proses perpindahan panas serta prinsip kerja

sootblower dari berbagai sumber, seperti buku teknis, standar operasional *boiler* milik PT. Bintang Alumina Indonesia, serta jurnal-jurnal ilmiah yang mendukung analisis data dalam penelitian ini.

2. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan secara langsung melalui sistem *Distributed Control System* (DCS) pada *Boiler* Unit 05 di Control Room PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia. Data yang diambil meliputi suhu gas masuk dan keluar *superheater*, suhu uap masuk dan keluar, tekanan uap, serta laju aliran uap pada kondisi sebelum dan sesudah operasi *sootblower*. Data ini digunakan sebagai dasar untuk menghitung dan menganalisis perubahan kinerja perpindahan panas pada *superheater*.

Tabel 5. Data Parameter Superheater Sebelum dan Sesudah Pengoperasian Sootblower

NO	Parameter	Notasi	Tanggal/Bulan/Tahun		Satuan
			Sebelum Pengoperasian	Sesudah Pengoperasian	
1.	Laju aliran uap <i>superheater</i>	($\dot{m}_{\text{steam}}$)			(kg/s)
2.	Temperature uap inlet <i>superheater</i>	($T_{\text{steam,in}}$)			(°C)
3.	Temperature uap outlet <i>superheater</i>	($T_{\text{steam,out}}$)			(°C)
4.	Temperature gas buang inlet	($T_{\text{gas,in}}$)			(°C)
5.	Temperature gas buang outlet	($T_{\text{gas,out}}$)			(°C)
6.	Tekanan uap <i>superheater</i>	(P_{steam})			(MPa)

3.4. Pengolahan Data

Dalam pengolahan data penulis akan menghitung perbedaan suhu *superheater*, laju perpindahan panas dan persentase peningkatan perpindahan panas *superheater* dengan menggunakan persamaan berikut :

a. Persamaan perbedaan suhu uap *superheater*

$$\Delta T = T_{\text{Out}} - T_{\text{In}} \dots\dots\dots 1$$

[1]

Dimana :

ΔT = Perbedaan suhu (°C)

T_{out} = Suhu keluar *superhater* (°C)

T_{in} = Suhu masuk *superheater* (°C)

b. Persamaan Laju Perpindahan Panas *Superheater*.

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

[1]

Dimana :

Q = Laju perpindahan panas (kW)

$\dot{m}$ = Laju aliran massa uap (kg/s)

c_p = Kalor jenis uap (kJ/kg)

$(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$ = Perubahan suhu uap melewati *superheater* (°C)

c. Persamaan persentase peningkatan perpindahan panas *superheater*.

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

[12]

Dimana :

% Peningkatan = Persentase peningkatan perpindahan panas *superheater* (%)

Q_{sesudah} = Laju perpindahan panas *superheater* setelah di *sootblower* (kW)

Q_{sebelum} = Laju perpindahan panas *superheater* sebelum di *sootblower* (kW)

3.5. Analisis Data

Setelah seluruh data yang diperlukan diperoleh dari *Control Room*, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis data untuk mengevaluasi *kinerja superheater* sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower*. Analisis ini dilakukan dengan menghitung laju perpindahan panas dan persentase peningkatan perpindahan panas *superheater*, serta dilengkapi dengan analisis statistik guna mengetahui signifikansi pengaruh pengoperasian *sootblower* terhadap kinerja *superheater* secara ilmiah.

3.5.1. Perhitungan Laju Perpindahan Panas Superheater

Laju perpindahan panas pada *superheater* ditentukan berdasarkan perubahan energi termal yang diserap oleh uap. Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan 2 :

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

Dimana :

Q = laju perpindahan panas *superheater* (kW)

$\dot{m}$ = laju aliran massa uap (kg/s)

c_p = kalor jenis uap (kJ/kg·K)

T_{out} = temperatur uap keluar *superheater* (°C)

T_{in} = temperatur uap masuk *superheater* (°C)

Nilai Q yang diperoleh digunakan untuk mengevaluasi kinerja *superheater* sebelum dan sesudah pengoperasian *sootblower*.

3.5.2. Perhitungan Persentase Peningkatan Perpindahan Panas *Superheater*

Persentase peningkatan perpindahan panas *superheater* digunakan untuk mengetahui perubahan kinerja perpindahan panas setelah pengoperasian *sootblower* berdasarkan kondisi sebelum dan sesudah pembersihan permukaan pemanas, persentase peningkatan ini dapat di hitung dengan persamaan 3.

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

Dimana :

% Peningkatan = Persentase peningkatan perpindahan panas *superheater* (%)

Q_{sesudah} = Laju perpindahan panas *superheater* setelah di *sootblower* (kW)

Q_{sebelum} = Laju perpindahan panas *superheater* sebelum di *sootblower* (kW)

Semakin tinggi nilai persentase peningkatan perpindahan panas yang diperoleh, maka menunjukkan bahwa pengoperasian *sootblower* semakin efektif dalam meningkatkan kinerja perpindahan panas pada *superheater*. Oleh karena itu, parameter ini dapat digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi keberhasilan pengoperasian *sootblower* dalam menjaga performa *superheater* serta kestabilan operasi boiler.

3.5.3. Analisis Statistik Pengaruh Pengoperasian *Sootblower*

Untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan laju perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower yang signifikan secara statistik, digunakan metode uji t berpasangan (paired sample t-test). Metode ini dipilih karena data yang dibandingkan berasal dari dua kondisi yang saling berpasangan pada sistem yang sama, yaitu kondisi sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower pada hari yang sama.

Selisih setiap pasangan dihitung dari

$$[D] : Q \{\text{sesudah}\} - Q \{\text{sebelum}\}$$

Selanjutnya, nilai t hitung diperoleh menggunakan persamaan:

$$t = \frac{\bar{D}}{\left(\frac{SD}{\sqrt{N}}\right)} \dots\dots\dots [13]$$

Keterangan :

t = nilai statistik t

$\bar{d}$ = rata-rata selisih laju perpindahan panas sebelum dan sesudah sootblower

Sd = simpang baku selisih laju perpindahan panas

n = jumlah pasangan data

Hipotesis yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

H_0 : Tidak terdapat perbedaan rata-rata laju perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower.

H_1 : Terdapat perbedaan rata-rata laju perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower.

Kriteria pengambilan keputusan pada uji t berpasangan adalah sebagai berikut :

1. Jika nilai t hitung > t tabel, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Artinya, terdapat perbedaan laju perpindahan panas yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower.
2. Jika nilai t hitung $\leq$ t tabel, maka H_0 diterima dan H_1 ditolak. Artinya, tidak terdapat perbedaan laju perpindahan panas yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower.

Pada penelitian ini, taraf signifikansi yang digunakan adalah 5% atau $\alpha = 0,05$. Jumlah pasangan data yang digunakan sebanyak 30 hari, sehingga derajat kebebasan diperoleh sebesar (df) adalah $n - 1 = 30 - 1 = 29$. Berdasarkan derajat kebebasan $df = 29$ pada taraf signifikansi 5%, untuk uji dua arah, diperoleh nilai t tabel sebesar 2,045. Analisis statistik dilakukan terhadap nilai laju perpindahan panas superheater (Q) sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower.

Dengan metode ini, penelitian dapat menentukan apakah perbedaan laju perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower bersifat signifikan secara statistik.

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Data Hasil Penelitian

Data yang digunakan dalam Tugas Akhir ini merupakan data operasional PLTU PT. Bintang Alumina Indonesia. Pengambilan data dilakukan selama satu bulan, yaitu pada bulan November 2025. Data yang dikumpulkan meliputi kondisi sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower. Untuk menghitung laju perpindahan panas dan peningkatan kinerja perpindahan panas pada superheater, digunakan satu contoh data perhitungan pada tanggal 1 - 30 November 2025. Perhitungan tersebut bertujuan untuk mengetahui nilai laju perpindahan panas dan efisiensi sebelum dan sesudah dilakukan sootblower pada superheater.

Tabel 6. Data Parameter Sootblower Ke 1 Sebelum, Di Bulan November

Hari	Msteam	Tsteam,In	Tsteam,Out	Tgas,In	Tgas,Out	Psteam	Load (Mw)
Hari 1	171	383	535	363	155	9.2	25,2
Hari 2	178	384	535	364	161	9.2	24,6
Hari 3	183	385	537	370	161	9.3	29,1
Hari 4	171	384	536	359	155	9.0	26,4
Hari 5	172	380	533	343	157	9.2	24,2
Hari 6	179	384	536	359	159	9.2	26,9
Hari 7	194	382	534	366	158	9.3	26,9
Hari 8	192	383	535	370	162	9.2	27,2
Hari 9	187	381	532	366	159	9.4	29,9
Hari 10	174	379	532	368	158	9.3	28
Hari 11	174	381	533	371	162	9.0	26,4
Hari 12	176	382	534	366	160	9.2	29,4
Hari 13	176	382	534	365	161	9.0	25,6
Hari 14	171	380	532	362	159	9.1	25,9

Hari 15	191	382	535	372	162	9.0	33,4
Hari 16	205	381	535	381	164	9.3	31,3
Hari 17	178	380	532	371	161	9.1	28,7
Hari 18	204	382	534	380	165	8.9	32,8
Hari 19	188	378	531	371	164	9.2	28,2
Hari 20	177	379	533	375	161	9.2	24,8
Hari 21	203	381	534	368	157	9.3	28,4
Hari 22	179	381	533	368	159	9.1	30,4
Hari 23	197	380	532	378	163	9.1	26,2
Hari 24	184	379	530	376	160	9.1	27,3
Hari 25	172	383	535	372	158	8.6	28,8
Hari 26	183	380	534	374	161	9.1	31,1
Hari 27	158	383	536	369	159	9.2	24,2
Hari 28	194	379	531	393	166	9.3	28,4
Hari 29	186	380	532	382	165	8.9	28,8
Hari 30	196	376	530	365	156	8.9	28

Tabel 7. Data Parameter Sootblower Ke 1 Sesudah, Di Bulan November

Hari	Msteam	Tsteam,In	Tsteam,Out	Tgas,In	Tgas,Out	Psteam	Load (Mw)
Hari 1	176	383	538	351	154	9.2	26,8
Hari 2	185	382	536	349	159	9.2	26,5
Hari 3	190	384	539	355	160	9.4	29,8
Hari 4	175	384	538	350	155	9.3	25,1
Hari 5	174	382	536	342	157	9.3	26,7
Hari 6	191	386	539	340	158	9.1	25,9

Hari 7	200	381	535	346	157	9.0	27,7
Hari 8	196	387	540	346	158	9.4	28,1
Hari 9	196	381	534	353	159	9.4	32,7
Hari 10	191	382	536	349	156	9.4	29,4
Hari 11	178	382	536	347	159	9.3	26,7
Hari 12	191	385	538	356	159	9.2	31,6
Hari 13	193	386	539	351	159	9.2	25,8
Hari 14	173	381	534	347	159	9.2	27,1
Hari 15	196	386	541	363	161	9.2	35,1
Hari 16	209	385	540	365	163	9.2	31,1
Hari 17	183	382	536	357	160	9.1	28,3
Hari 18	215	389	542	373	159	9.1	33,3
Hari 19	197	380	535	356	159	9.3	28,9
Hari 20	181	380	536	352	158	9.1	25,9
Hari 21	204	383	538	360	155	9.1	28,9
Hari 22	184	382	537	358	155	9.2	30,3
Hari 23	201	379	535	352	161	9.3	26,1
Hari 24	189	381	535	373	155	9.1	28
Hari 25	181	386	540	366	154	9.2	26,9
Hari 26	184	382	539	362	160	9.0	34
Hari 27	158	387	542	361	156	9.2	24,8
Hari 28	196	380	535	359	157	9.1	27,3
Hari 29	188	382	536	361	164	9.0	29,6
Hari 30	204	382	537	363	157	9.1	28,2

Tabel 6 dan Tabel 7 menyajikan data parameter operasi superheater sebelum jam 08.00 wib dan sesudah jam 09.00 wib pengoperasian sootblower ke-1 pada bulan

November. Parameter yang diamati meliputi laju aliran massa uap, temperatur uap masuk dan keluar superheater, temperatur gas, tekanan uap, serta beban pembangkit. Tabel 6 digunakan sebagai kondisi awal, sedangkan Tabel 7 digunakan sebagai data pembandingan setelah sootblower dioperasikan. Sebelum sootblower ke-1 dioperasikan, temperatur uap keluar superheater berada pada kisaran 530–537°C. Setelah sootblower dioperasikan, temperatur uap keluar cenderung meningkat. Sebagai contoh, pada hari ke-1 temperatur uap keluar meningkat dari 535°C menjadi 538°C, sedangkan pada hari ke-15 meningkat dari 535°C menjadi 541°C. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penyerapan panas oleh uap pada superheater cenderung meningkat setelah dilakukan pembersihan deposit. Namun, laju aliran massa uap, temperatur gas, tekanan uap, dan beban pembangkit juga mengalami variasi antara kondisi sebelum dan sesudah sootblower. Oleh karena itu, pengaruh sootblower ke-1 selanjutnya dianalisis melalui perhitungan selisih temperatur uap (ΔT), laju perpindahan panas (Q), dan persentase peningkatan kinerja perpindahan panas pada tabel berikutnya.

Tabel 8. Data Perhitungan Sootblower ke-1 Sebelum Pengoperasian dan Persentase Peningkatan Q pada Bulan November

Hari	Msteam (kg/s)	Cp (kJ/kg·K)	ΔT (°C)	Q (kW)	Peningkatan Q (%)
Hari 1	47,50	2.183	152	15.761	5,05
Hari 2	49,44	2.183	151	16.299	6,05
Hari 3	50,83	2.184	152	16.875	5,97
Hari 4	47,50	2.183	152	15.761	3,78
Hari 5	47,78	2.182	153	15.950	1,92
Hari 6	49,72	2.184	152	16.506	7,46
Hari 7	53,89	2.183	152	17.881	4,40
Hari 8	53,33	2.183	152	17.697	2,90
Hari 9	51,94	2.182	151	17.115	6,25
Hari 10	48,33	2.182	153	16.136	10,59
Hari 11	48,33	2.181	152	16.023	3,79
Hari 12	48,89	2.182	152	16.215	9,39
Hari 13	48,89	2.182	152	16.215	10,53
Hari 14	47,50	2.181	152	15.747	1,88
Hari 15	53,06	2.182	153	17.712	4,15
Hari 16	56,94	2.183	154	19.144	2,75
Hari 17	49,44	2.181	152	16.391	4,26
Hari 18	56,67	2.181	152	18.786	6,38
Hari 19	52,22	2.181	153	17.426	6,25
Hari 20	49,17	2.182	154	16.521	3,64
Hari 21	56,39	2.183	153	18.834	1,85
Hari 22	49,72	2.182	152	16.491	4,92
Hari 23	54,72	2.181	152	18.141	4,81
Hari 24	51,11	2.180	151	16.825	4,90
Hari 25	47,78	2.181	152	15.839	6,86

Hari 26	50,83	2.182	154	17.081	2,65
Hari 27	43,89	2.184	153	14.666	1,45
Hari 28	53,89	2.181	152	17.865	3,12
Hari 29	51,67	2.180	152	17.120	2,55
Hari 30	54,44	2.179	154	18.270	5,00

Tabel 9. Data Perhitungan Sootblower ke-1 Sesudah Pengoperasian dan Persentase Peningkatan Q pada Bulan November

Hari	Msteam (kg/s)	Cp (kJ/kg·K)	ΔT (°C)	Q (kW)	Peningkatan Q (%)
Hari 1	48,89	2.185	155	16.557	5,05
Hari 2	51,39	2.184	154	17.284	6,05
Hari 3	52,78	2.186	155	17.883	5,97
Hari 4	48,61	2.185	154	16.357	3,78
Hari 5	48,33	2.184	154	16.256	1,92
Hari 6	53,06	2.185	153	17.737	7,46
Hari 7	55,56	2.182	154	18.668	4,40
Hari 8	54,44	2.186	153	18.209	2,90
Hari 9	54,44	2.183	153	18.184	6,25
Hari 10	53,06	2.184	154	17.844	10,59
Hari 11	49,44	2.184	154	16.630	3,79
Hari 12	53,06	2.185	153	17.737	9,39
Hari 13	53,61	2.185	153	17.922	10,53
Hari 14	48,06	2.182	153	16.043	1,88
Hari 15	54,44	2.186	155	18.447	4,15
Hari 16	58,06	2.186	155	19.671	2,75
Hari 17	50,83	2.183	154	17.089	4,26
Hari 18	59,72	2.187	153	19.984	6,38
Hari 19	54,72	2.183	155	18.516	6,25
Hari 20	50,28	2.183	156	17.122	3,64
Hari 21	56,67	2.184	155	19.183	1,85
Hari 22	51,11	2.184	155	17.302	4,92
Hari 23	55,83	2.183	156	19.014	4,81
Hari 24	52,50	2.183	154	17.650	4,90
Hari 25	50,28	2.186	154	16.926	6,86
Hari 26	51,11	2.185	157	17.533	2,65
Hari 27	43,89	2.187	155	14.878	1,45
Hari 28	54,44	2.183	155	18.422	3,12
Hari 29	52,22	2.183	154	17.556	2,55
Hari 30	56,67	2.184	155	19.183	5,00
Nilai Minimum Perhitungan Persentase Peningkatan				1,45	
Nilai Maksimum Perhitungan Persentase Peningkatan				10,59	
Rata - Rata Perhitungan Persentase Peningkatan				4,85	

Tabel 8 dan Tabel 9 menunjukkan hasil perhitungan kinerja perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-1 pada bulan November. Perhitungan dilakukan menggunakan laju aliran massa uap, kalor jenis

uap, serta selisih temperatur uap superheater (ΔT) untuk memperoleh nilai laju perpindahan panas (Q). Sebelum sootblower ke-1 dioperasikan, nilai ΔT pada Tabel 8 berada pada kisaran 151–154 °C dengan nilai Q sebesar 14.666–19.144 kW. Setelah sootblower dioperasikan, nilai ΔT pada Tabel 9 berada pada kisaran 153–157 °C, sedangkan nilai Q berada pada rentang 14.878–19.984 kW. Nilai ΔT dan Q setelah pengoperasian sootblower ke-1 secara umum lebih tinggi dibandingkan kondisi sebelum sootblower pada hari yang sama. Peningkatan Q dihitung berdasarkan perbandingan nilai Q sesudah dan sebelum pengoperasian sootblower pada hari yang sama. Hasil perhitungan menunjukkan peningkatan minimum sebesar 1,45% pada hari ke-27, peningkatan maksimum sebesar 10,59% pada hari ke-10, serta rata-rata peningkatan sebesar 4,85%. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa pengoperasian sootblower ke-1 membantu meningkatkan penyerapan panas oleh uap pada superheater. Namun, besarnya peningkatan pada setiap hari berbeda-beda karena kondisi operasi,

Tabel 10. Hasil Perhitungan Uji t Berpasangan Sootblower ke-1

Hari	Selisih (D) KW	Selisih (D) MW
Hari 1	796	0,796
Hari 2	985	0,985
Hari 3	1.008	1,008
Hari 4	596	0,596
Hari 5	306	0,306
Hari 6	1.231	1,231
Hari 7	787	0,787
Hari 8	513	0,513
Hari 9	1.070	1,070
Hari 10	1.709	1,709
Hari 11	607	0,607
Hari 12	1.522	1,522
Hari 13	1.708	1,708
Hari 14	296	0,296
Hari 15	735	0,735
Hari 16	527	0,527
Hari 17	698	0,698
Hari 18	1.198	1,198
Hari 19	1.090	1,090
Hari 20	601	0,601
Hari 21	349	0,349
Hari 22	811	0,811
Hari 23	873	0,873
Hari 24	825	0,825
Hari 25	1.087	1,087
Hari 26	452	0,452
Hari 27	212	0,212
Hari 28	557	0,557

Hari 29	436	0,436
Hari 30	913	0,913
Rata - Rata Selisih ($\bar{D}$) (MW)		0,817
Simpang Baku (sd)		0,394
t hitung		11,363

Tabel 10 menunjukkan hasil perhitungan selisih laju perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-1. Nilai selisih (D) diperoleh dari pengurangan nilai laju perpindahan panas sesudah sootblower terhadap nilai sebelum sootblower pada hari yang sama. Berdasarkan tabel, seluruh nilai selisih (D) bernilai positif dengan rentang 0,212–1,709 MW. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai laju perpindahan panas setelah pengoperasian sootblower lebih tinggi dibandingkan sebelum sootblower. Rata-rata selisih laju perpindahan panas diperoleh sebesar 0,817 MW dengan simpang baku sebesar 0,394 MW. Nilai rata-rata selisih dan simpang baku tersebut selanjutnya digunakan dalam uji t berpasangan. Hasil perhitungan menghasilkan nilai t hitung sebesar 11,363. Berdasarkan kriteria pengujian pada taraf signifikansi 5% dengan derajat kebebasan 29, diperoleh nilai t tabel sebesar 2,045. Nilai t hitung sebesar 11,363 lebih besar daripada nilai t tabel sebesar 2,045. Dengan demikian, H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hasil tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan laju perpindahan panas superheater yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-1.

Tabel 11. Data Parameter Sootblower Ke 2 Sebelum, Di Bulan November

Hari	Msteam	Tsteam,In	Tsteam,Out	Tgas,In	Tgas,Out	Psteam	Load (Mw)
Hari 1	188	392	536	362	157	9.4	27,8
Hari 2	173	389	535	360	159	9.3	25,2
Hari 3	190	387	532	363	156	9.2	27,9
Hari 4	151	387	531	351	151	9.2	24,6
Hari 5	197	388	531	357	154	9.4	27,2
Hari 6	175	385	531	358	160	9.3	26,6
Hari 7	194	390	534	361	159	9.2	26,3
Hari 8	171	389	536	360	158	9.1	26,3
Hari 9	186	386	534	363	157	9.0	31,5

Hari 10	189	392	537	361	156	9.3	27,6
Hari 11	177	389	539	363	157	9.2	27,4
Hari 12	191	385	537	360	158	9.1	30,5
Hari 13	179	386	533	365	159	9.1	26,3
Hari 14	185	384	532	355	158	9.2	25,9
Hari 15	193	385	536	369	161	9.2	31
Hari 16	202	382	533	372	165	9.0	30,1
Hari 17	183	386	538	370	163	9.3	28,4
Hari 18	180	385	535	371	166	8.9	29,7
Hari 19	194	388	537	363	157	9.1	29,1
Hari 20	178	382	536	367	156	9.3	26
Hari 21	201	388	539	370	160	9.0	28
Hari 22	184	383	537	361	154	9.2	30,1
Hari 23	173	385	538	364	159	9.0	25,2
Hari 24	193	385	539	377	163	9.0	28,4
Hari 25	185	386	535	376	159	9.3	26,7
Hari 26	189	384	534	368	160	9.1	32
Hari 27	170	389	536	373	162	9.1	25,4
Hari 28	184	388	534	391	166	9.1	28,4
Hari 29	198	386	534	365	162	9.2	28,9
Hari 30	198	387	537	365	156	8.9	28,1

Tabel 12. Data Parameter Sootblower Ke 2 Sesudah, Di Bulan November

Hari	Msteam	Tsteam,In	Tsteam,Out	Tgas,In	Tgas,Out	Psteam	Load (Mw)
Hari 1	194	387	539	350	154	9.2	28,9
Hari 2	182	386	537	355	158	9.3	27,2
Hari 3	193	384	535	352	156	9.2	28,5
Hari 4	160	387	536	347	151	9.2	25,1
Hari 5	200	390	538	350	153	9.0	27,6
Hari 6	185	382	535	353	155	9.2	26,4
Hari 7	196	385	537	353	157	8.9	26
Hari 8	178	383	538	351	156	9.2	27,9
Hari 9	191	383	538	356	154	9.2	30
Hari 10	191	387	540	355	155	9.1	28,2
Hari 11	188	386	541	358	157	9.3	28,5
Hari 12	196	382	539	350	156	9.2	28,1
Hari 13	183	382	536	349	151	9.2	27,1
Hari 14	198	379	535	349	157	9.3	26,6
Hari 15	203	380	538	356	158	9.1	31
Hari 16	210	380	536	361	160	9.4	30,6
Hari 17	190	383	540	351	158	9.0	28,3
Hari 18	186	381	538	354	161	9.1	30
Hari 19	199	382	542	360	156	9.3	27,5
Hari 20	191	379	538	360	151	9.1	26,5
Hari 21	205	383	540	365	157	9.2	28,2
Hari 22	191	381	539	352	153	9.1	30,1
Hari 23	183	382	540	359	155	9.1	27,8

Hari 24	194	379	541	357	157	9.2	27,9
Hari 25	194	382	538	357	154	9.4	25,7
Hari 26	190	380	537	362	158	9.0	31,3
Hari 27	182	381	537	361	159	9.4	25,1
Hari 28	191	383	539	359	157	9.2	27,6
Hari 29	210	381	538	362	162	9.0	28,2
Hari 30	204	385	540	360	156	9.1	28,1

Tabel 11 dan Tabel 12 menyajikan data parameter operasi superheater sebelum jam 08.00 wib dan sesudah 09.00 wib pengoperasian sootblower ke-2 pada bulan November. Parameter yang diamati meliputi laju aliran massa uap, temperatur uap masuk dan keluar superheater, temperatur gas, tekanan uap, serta beban pembangkit. Tabel 11 digunakan sebagai kondisi awal, sedangkan Tabel 12 digunakan sebagai data pembandingan setelah sootblower dioperasikan. Sebelum sootblower ke-2 dioperasikan, temperatur uap keluar superheater berada pada kisaran 531–539°C. Setelah sootblower dioperasikan, temperatur uap keluar berada pada kisaran 535–542°C. Sebagai contoh, pada hari ke-1 temperatur uap keluar meningkat dari 536°C menjadi 539°C, sedangkan pada hari ke-19 meningkat dari 537°C menjadi 542°C. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penyerapan panas oleh uap pada superheater cenderung meningkat setelah pembersihan deposit dilakukan. Namun, laju aliran massa uap, temperatur gas, tekanan uap, dan beban pembangkit juga mengalami variasi antara kondisi sebelum dan sesudah sootblower. Oleh karena itu, pengaruh sootblower ke-2 tidak hanya dinilai berdasarkan temperatur uap keluar, tetapi dilanjutkan melalui perhitungan selisih temperatur uap (ΔT), laju perpindahan panas (Q), dan persentase peningkatan kinerja perpindahan panas pada tabel berikutnya.

Tabel 13. Data Perhitungan Sootblower ke-2 Sebelum Pengoperasian dan Persentase Peningkatan Q pada Bulan November

Hari	Msteam (kg/s)	Cp (kJ/kg·K)	ΔT (°C)	Q (kW)	Peningkatan Q (%)
Hari 1	52,22	2.184	144	16.424	8,97
Hari 2	48,06	2.183	146	15.316	8,85
Hari 3	52,78	2.181	145	16.691	5,88
Hari 4	41,94	2.181	144	13.173	9,79
Hari 5	54,72	2.181	143	17.067	5,22

Hari 6	48,61	2.181	146	15.479	10,88
Hari 7	53,89	2.182	144	16.932	6,69
Hari 8	47,50	2.183	147	15.243	9,86
Hari 9	51,67	2.182	148	16.685	7,69
Hari 10	52,50	2.184	145	16.626	6,68
Hari 11	49,17	2.185	150	16.114	9,86
Hari 12	53,06	2.184	152	17.613	6,04
Hari 13	49,72	2.182	147	15.949	7,20
Hari 14	51,39	2.181	148	16.588	12,92
Hari 15	53,61	2.184	151	17.680	10,06
Hari 16	56,11	2.181	151	18.479	7,55
Hari 17	50,83	2.185	152	16.883	7,24
Hari 18	50,00	2.182	150	16.365	8,25
Hari 19	53,89	2.184	149	17.536	10,30
Hari 20	49,44	2.184	154	16.630	10,79
Hari 21	55,83	2.185	151	18.421	6,09
Hari 22	51,11	2.184	154	17.191	6,55
Hari 23	48,06	2.184	153	16.058	9,29
Hari 24	53,61	2.185	154	18.040	5,79
Hari 25	51,39	2.183	149	16.715	9,89
Hari 26	52,50	2.182	150	17.183	5,27
Hari 27	47,22	2.183	147	15.154	13,72
Hari 28	51,11	2.182	146	16.283	11,07
Hari 29	55,00	2.182	148	17.761	12,61
Hari 30	55,00	2.183	150	18.010	6,56

Tabel 14. Data Perhitungan Sootblower ke-2 Sesudah Pengoperasian dan Persentase Peningkatan Q pada Bulan November

Hari	Msteam (kg/s)	Cp (kJ/kg·K)	ΔT (°C)	Q (kW)	Peningkatan Q (%)
Hari 1	53,89	2.185	152	17.898	8,97
Hari 2	50,56	2.184	151	16.672	8,85
Hari 3	53,61	2.183	151	17.672	5,88
Hari 4	44,44	2.184	149	14.463	9,79
Hari 5	55,56	2.184	148	17.957	5,22
Hari 6	51,39	2.183	153	17.164	10,88
Hari 7	54,44	2.183	152	18.066	6,69
Hari 8	49,44	2.185	155	16.746	9,86
Hari 9	53,06	2.185	155	17.969	7,69
Hari 10	53,06	2.185	153	17.737	6,68
Hari 11	52,22	2.187	155	17.703	9,86
Hari 12	54,44	2.185	157	18.677	6,04
Hari 13	50,83	2.184	154	17.097	7,20
Hari 14	55,00	2.183	156	18.730	12,92
Hari 15	56,39	2.184	158	19.458	10,06
Hari 16	58,33	2.184	156	19.874	7,55
Hari 17	52,78	2.185	157	18.105	7,24
Hari 18	51,67	2.184	157	17.716	8,25

Hari 19	55,28	2.187	160	19.343	10,30
Hari 20	53,06	2.184	159	18.424	10,79
Hari 21	56,94	2.186	157	19.543	6,09
Hari 22	53,06	2.185	158	18.316	6,55
Hari 23	50,83	2.185	158	17.549	9,29
Hari 24	53,89	2.186	162	19.084	5,79
Hari 25	53,89	2.185	156	18.369	9,89
Hari 26	52,78	2.183	157	18.089	5,27
Hari 27	50,56	2.185	156	17.232	13,72
Hari 28	53,06	2.185	156	18.085	11,07
Hari 29	58,33	2.184	157	20.002	12,61
Hari 30	56,67	2.185	155	19.192	6,56
Nilai Minimum Perhitungan Persentase Peningkatan				5,22	
Nilai Maksimum Perhitungan Persentase Peningkatan				13,72	
Rata - Rata Perhitungan Persentase Peningkatan				8,59	

Tabel 13 dan Tabel 14 menunjukkan hasil perhitungan kinerja perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-2 pada bulan November. Perhitungan dilakukan menggunakan laju aliran massa uap, kalor jenis uap, serta selisih temperatur uap superheater (ΔT) untuk memperoleh nilai laju perpindahan panas (Q). Sebelum sootblower ke-2 dioperasikan, nilai ΔT pada Tabel 13 berada pada kisaran 143–154 °C dengan nilai Q sebesar 13.173–18.479 kW. Setelah sootblower dioperasikan, nilai ΔT pada Tabel 14 berada pada kisaran 148–162 °C, sedangkan nilai Q berada pada rentang 14.463–20.002 kW. Nilai ΔT dan Q setelah pengoperasian sootblower ke-2 secara umum lebih tinggi dibandingkan kondisi sebelum sootblower pada hari yang sama. Peningkatan Q dihitung berdasarkan perbandingan nilai Q sesudah dan sebelum pengoperasian sootblower pada hari yang sama. Hasil perhitungan menunjukkan peningkatan minimum sebesar 5,22% pada hari ke-5, peningkatan maksimum sebesar 13,72% pada hari ke-27, serta rata-rata peningkatan sebesar 8,59%. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa pengoperasian sootblower ke-2 membantu meningkatkan penyerapan panas oleh uap pada superheater. Namun, besarnya peningkatan pada setiap hari berbeda-beda karena kondisi operasi, seperti laju aliran uap, temperatur, tekanan, dan beban pembangkit, juga mengalami variasi.

Tabel 15. Hasil Perhitungan Uji t Berpasangan Sootblower ke-2

Hari	Selisih (D) KW	Selisih (D) MW
Hari 1	1.474	1,474
Hari 2	1.356	1,356
Hari 3	981	0,981
Hari 4	1.290	1,290
Hari 5	890	0,890

Hari 6	1.685	1,685
Hari 7	1.133	1,133
Hari 8	1.503	1,503
Hari 9	1.284	1,284
Hari 10	1.111	1,111
Hari 11	1.588	1,588
Hari 12	1.064	1,064
Hari 13	1.148	1,148
Hari 14	2.142	2,142
Hari 15	1.778	1,778
Hari 16	1.395	1,395
Hari 17	1.222	1,222
Hari 18	1.351	1,351
Hari 19	1.806	1,806
Hari 20	1.794	1,794
Hari 21	1.122	1,122
Hari 22	1.126	1,126
Hari 23	1.491	1,491
Hari 24	1.044	1,044
Hari 25	1.653	1,653
Hari 26	905	0,905
Hari 27	2.079	2,079
Hari 28	1.802	1,802
Hari 29	2.240	2,240
Hari 30	1.182	1,182
Rata - Rata Selisih ($\bar{D}$) (MW)		1,421
Simpang Baku (so)		0,368
t hitung		21,141

Tabel 15 menunjukkan hasil perhitungan selisih laju perpindahan panas superheater sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-2. Nilai selisih (D) diperoleh dari pengurangan nilai laju perpindahan panas sesudah sootblower terhadap nilai sebelum sootblower pada hari yang sama. Berdasarkan tabel, seluruh nilai selisih (D) bernilai positif dengan rentang 0,890–2,240 MW. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai laju perpindahan panas setelah pengoperasian sootblower ke-2 lebih tinggi dibandingkan sebelum sootblower. Rata-rata selisih laju perpindahan panas diperoleh sebesar 1,421 MW dengan simpang baku sebesar 0,368 MW. Nilai rata-rata selisih dan simpang baku tersebut selanjutnya digunakan dalam uji t berpasangan. Hasil perhitungan menghasilkan nilai t hitung sebesar 21,141. Berdasarkan kriteria pengujian pada taraf signifikansi 5% dengan derajat kebebasan 29, diperoleh nilai t tabel sebesar 2,045. Nilai t hitung sebesar 21,141 lebih besar daripada nilai t tabel sebesar 2,045. Dengan demikian, H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hasil tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan laju perpindahan panas superheater yang signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-2.

4.1.1. Analisis Sootblower ke-1 pada Superheater

Berdasarkan tabel 6 dan tabel 7 yang berisi data parameter sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-1 pada superheater, perhitungan dilakukan menggunakan rumus yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini, diambil satu contoh perhitungan pada tanggal 24 November 2025, baik sebelum maupun sesudah dilakukan pengoperasian sootblower pada superheater.

1. Data sebelum sootblower pada superheater (24/11/2025).

- laju aliran massa uap (kg/s) : 184 (t/h) – 51,11 (kg/s).
- Temperatur uap masuk *superheater* (°C) : 379 (°C)
- Temperatur uap keluar *superheater* (°C) : 530 (°C)
- Temperatur gas masuk (°C) : 376 (°C)
- Temperatur gas keluar (°C) : 160 (°C)
- Tekanan Steam (Mpa) : 9.1 (Mpa)
- Load / Beban Unit (Mw) : 27,3 (Mw)
- Perbedaan suhu uap / ΔT (°C) : 530 °C - 379 °C = 151 °C
- Heat capacity at constant pressure (kJ/(kg/°C)) : 2.180 (kJ/(kg/°C))

Heat capacity at constant pressure (Cp) di dapatkan dari table steam dengan menggunakan parameter Temperatur uap keluar *superheater* (°C) dan Tekanan Steam (Mpa).

a) Menghitung Laju Perpindahan Panas Superheater

Perhitungan berikut menggunakan persamaan 2. Sebagai berikut :

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

$$Q = 51,11 \text{ kg/s} \times 2.180 \text{ kJ/(kg}^\circ\text{C)} \times (530^\circ\text{C} - 379^\circ\text{C})$$

$$Q = 51,11 \text{ kg/s} \times 2.180 \text{ kJ/(kg}^\circ\text{C)} \times 151^\circ\text{C}$$

$$Q = 16.825,38 \text{ kJ/s}$$

$$Q = 16.825 \text{ Mw}$$

2. Data sesudah sootblower pada superheater (24/11/2025).

- laju aliran massa uap (kg/s) : 189 (t/h) – 52,50 (kg/s).
- Temperatur uap masuk *superheater* (°C) : 381 (°C)
- Temperatur uap keluar *superheater* (°C) : 535 (°C)
- Temperatur gas masuk (°C) : 373 (°C)
- Temperatur gas keluar (°C) : 155 (°C)
- Tekanan Steam (Mpa) : 9.1 (Mpa)
- Load / Beban Unit (Mw) : 28 (Mw)
- Perbedaan suhu uap / ΔT (°C) : 535 °C - 381 °C = 154 °C
- Heat capacity at constant pressure (kJ/(kg/°C)) : 2.183 (kJ/(kg/°C))

Heat capacity at constant pressure (Cp) di dapatkan dari table steam dengan menggunakan parameter Temperatur uap keluar *superheater* (°C) dan Tekanan Steam (Mpa).

a) Menghitung Laju Perpindahan Panas Superheater

Perhitungan berikut menggunakan persamaan 2. Sebagai berikut :

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

$$Q = 52,50 \text{ kg/s} \times 2.183 \text{ kJ/(kg}^\circ\text{C)} \times (535^\circ\text{C} - 381^\circ\text{C})$$

$$Q = 52,50 \text{ kg/s} \times 2.183 \text{ kJ/(kg}^\circ\text{C)} \times 154^\circ\text{C}$$

$$Q = 17.650,55 \text{ kJ/s}$$

$$Q = 17.650 \text{ Mw}$$

b) Menghitung peningkatan kinerja Perpindahan Panas Superheater

Perhitungan berikut menggunakan persamaan 3. Sebagai berikut :

$$\% \text{ Peningkatan} = \frac{Q \text{ Sesudah} - Q \text{ Sebelum}}{Q \text{ Sebelum}} \times 100\%$$

$$= \frac{17.650 - 16.825}{16.825} \times 100\%$$

$$= 4,90 \%$$

4.1.2. Analisis Statistik Pengaruh Laju Perpindahan Panas superheater Pada Sootblower ke-1

Untuk menganalisis pengaruh pengoperasian sootblower ke-1 terhadap laju perpindahan panas pada superheater selama satu bulan, dilakukan analisis statistik menggunakan metode uji t berpasangan (paired sample t-test). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan pada nilai laju perpindahan panas sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-1. Metode ini digunakan karena data yang dibandingkan berasal dari dua kondisi pada sistem yang sama, yaitu sebelum dan sesudah sootblower. Perhitungan uji t dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

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

1. Data perhitungan statistik laju perpindahan panas superheater (1-30/11/2025).

- Rata – rata selisih $\bar{D}$ selama 1 bulan (Mw) : 0,817 Mw
- Simpang baku (sD) (Mw) : 0,394 Mw

Penjelasan :

- Untuk memperoleh nilai rata-rata selisih ($\bar{D}$), terlebih dahulu dihitung selisih laju perpindahan panas antara kondisi sesudah dan sebelum sootblower (Q sesudah – Q sebelum). Nilai yang semula dalam satuan kW kemudian dikonversi ke MW dengan membagi 1000. Setelah seluruh selisih selama satu bulan diperoleh, nilai tersebut dijumlahkan dan dibagi dengan jumlah data pengamatan (n) untuk mendapatkan rata-rata selisih.
- Nilai simpang baku (sD) diperoleh dari perhitungan selisih laju perpindahan panas antara kondisi sesudah dan sebelum sootblower pada setiap data. Setiap selisih dikurangi dengan rata-rata selisih ($\bar{D}$), kemudian dikuadratkan, dijumlahkan, dibagi ($n-1$), dan diakarkan. Nilai sD ini menunjukkan tingkat penyebaran perbedaan data dan digunakan dalam perhitungan nilai t hitung pada uji t berpasangan.

- a) Menghitung Statistik Laju Perpindahan Panas Superheater
Perhitungan berikut menggunakan persamaan sebagai berikut :

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

$$t = \frac{0,817}{\left(\frac{0,394}{\sqrt{30}}\right)}$$

$$t = \frac{0,817}{(0,0719)}$$

$$t = 11,363$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai t hitung sebesar 11,363. Dengan jumlah data sebanyak 30, maka derajat kebebasan (df) adalah 29. Pada taraf signifikan 5%, diperoleh nilai t tabel sebesar 2,045. Karena nilai t hitung lebih besar dari t tabel ($11,363 > 2,045$), maka H_0 ditolak dan H_1 diterima.

Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan pada laju perpindahan panas sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-1. Dengan demikian, pengoperasian sootblower ke-1 memberikan pengaruh yang nyata terhadap peningkatan laju perpindahan panas pada superheater.

4.1.3. Analisis Sootblower ke-2 pada Superheater

Pada tabel 11 dan tabel 12 yang berisi data parameter sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-2 pada superheater, perhitungan dilakukan menggunakan rumus yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini, diambil satu contoh perhitungan pada tanggal 13 November 2025, baik sebelum maupun sesudah dilakukan pengoperasian sootblower pada superheater.

1. Data sebelum sootblower pada superheater (13/11/2025).

- laju aliran massa uap (kg/s) : 179 (t/h) – 49,72 (kg/s).
- Temperatur uap masuk *superheater* (°C) : 386 (°C)
- Temperatur uap keluar *superheater* (°C) : 533 (°C)

- Temperatur gas masuk (°C) : 365 (°C)
- Temperatur gas keluar (°C) : 159 (°C)
- Tekanan Steam (Mpa) : 9.1 (Mpa)
- Load / Beban Unit (Mw) : 26,3 (Mw)
- Perbedaan suhu uap / ΔT (°C) : 533 °C - 386 °C = 147 °C
- Heat capacity at constant pressure (kJ/(kg/°C)) : 2.182 (kJ/(kg/°C))

Heat capacity at constant pressure (Cp) di dapatkan dari table steam dengan menggunakan parameter Temperatur uap keluar *superheater* (°C) dan Tekanan Steam (Mpa).

a) Menghitung Laju Perpindahan Panas Superheater

Perhitungan berikut menggunakan persamaan 2. Sebagai berikut :

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

$$Q = 49,72 \text{ kg/s} \times 2.182 \text{ kJ/(kg/°C)} \times (533 \text{ °C} - 386 \text{ °C})$$

$$Q = 49,72 \text{ kg/s} \times 2.182 \text{ kJ/(kg/°C)} \times 147 \text{ °C}$$

$$Q = 15.949,88 \text{ kJ/s}$$

$$Q = 15.949 \text{ Mw}$$

2. Data sesudah sootblower pada superheater (13/11/2025).

- laju aliran massa uap (kg/s) : 183 (t/h) – 50,83 (kg/s).
- Temperatur uap masuk *superheater* (°C) : 382 (°C)
- Temperatur uap keluar *superheater* (°C) : 536 (°C)
- Temperatur gas masuk (°C) : 349 (°C)
- Temperatur gas keluar (°C) : 151 (°C)
- Tekanan Steam (Mpa) : 9.2 (Mpa)
- Load / Beban Unit (Mw) : 27,1 (Mw)
- Perbedaan suhu uap / ΔT (°C) : 536 °C - 382 °C = 154 °C
- Heat capacity at constant pressure (kJ/(kg/°C)) : 2.184 (kJ/(kg/°C))

Heat capacity at constant pressure (Cp) di dapatkan dari table steam dengan menggunakan parameter Temperatur uap keluar *superheater* (°C) dan Tekanan Steam (Mpa).

a) Menghitung Laju Perpindahan Panas Superheater

Perhitungan berikut menggunakan persamaan 2. Sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q &= \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \\ Q &= 50,83 \text{ kg/s} \times 2.184 \text{ kJ}/(\text{kg}/^\circ\text{C}) \times (536^\circ\text{C} - 382^\circ\text{C}) \\ Q &= 50,83 \text{ kg/s} \times 2.184 \text{ kJ}/(\text{kg}/^\circ\text{C}) \times 154^\circ\text{C} \\ Q &= 17.097,95 \text{ kJ/s} \\ Q &= 17.097 \text{ Mw} \end{aligned}$$

b) Menghitung peningkatan kinerja Perpindahan Panas Superheater

Perhitungan berikut menggunakan persamaan 3. Sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \% \text{Peningkatan} &= \frac{Q_{\text{sesudah}} - Q_{\text{sebelum}}}{Q_{\text{sebelum}}} \times 100\% \\ &= \frac{17.097 - 15.949}{15.949} \times 100\% \\ &= 7,20 \% \end{aligned}$$

4.1.4. Analisis Statistik Pengaruh Laju Perpindahan Panas superheater Pada Sootblower ke-2

Untuk mengetahui pengaruh laju perpindahan panas superheater pada pengoperasian sootblower ke-2 selama periode pengamatan, dilakukan analisis statistik menggunakan metode uji t berpasangan (paired sample t-test). Analisis ini bertujuan untuk menilai apakah perbedaan nilai laju perpindahan panas sebelum dan sesudah sootblower ke-2 menunjukkan perubahan yang signifikan secara statistik. Metode ini digunakan karena data yang dibandingkan berasal dari dua kondisi pada sistem yang sama, yaitu sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-2. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

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

**1. Data perhitungan statistik laju perpindahan panas superheater
(1-30/11/2025).**

- Rata – rata selisih $\bar{D}$ selama 1 bulan (Mw) : 1,421 Mw
- Simpang baku (sd) (Mw) : 0,368 Mw

a) Menghitung Statistik Laju Perpindahan Panas Superheater
Perhitungan berikut menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$t = \frac{\bar{D}}{\left(\frac{SD}{\sqrt{N}}\right)}$$

$$t = \frac{1,421}{\left(\frac{0,368}{\sqrt{30}}\right)}$$

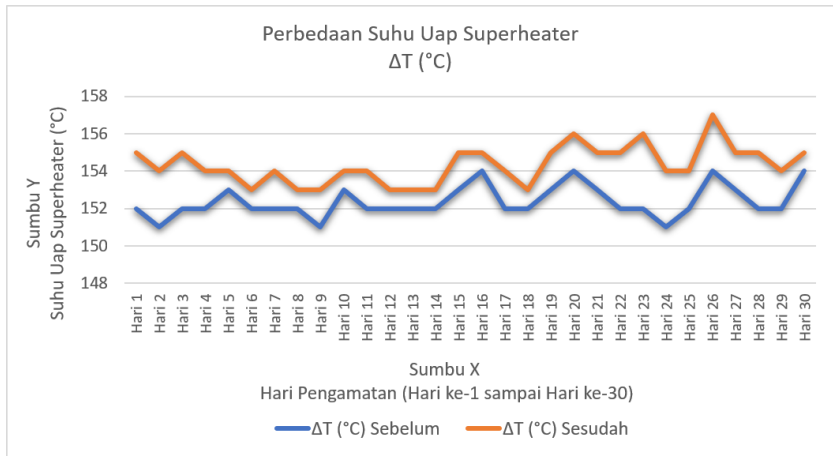
$$t = \frac{1,421}{(0,0671)}$$

$$t = 21,141$$

Dari hasil perhitungan uji t berpasangan diperoleh nilai t hitung sebesar 21,141. Dengan jumlah data sebanyak 30, maka derajat kebebasan (df) adalah 29. Pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$), diperoleh nilai t tabel sebesar 2,045. Karena nilai t hitung lebih besar daripada t tabel, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan laju perpindahan panas sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower bersifat signifikan secara statistik. Dengan demikian, pengoperasian sootblower terbukti memberikan pengaruh terhadap peningkatan kinerja perpindahan panas pada superheater.

4.2. Grafik dan Pembahasan

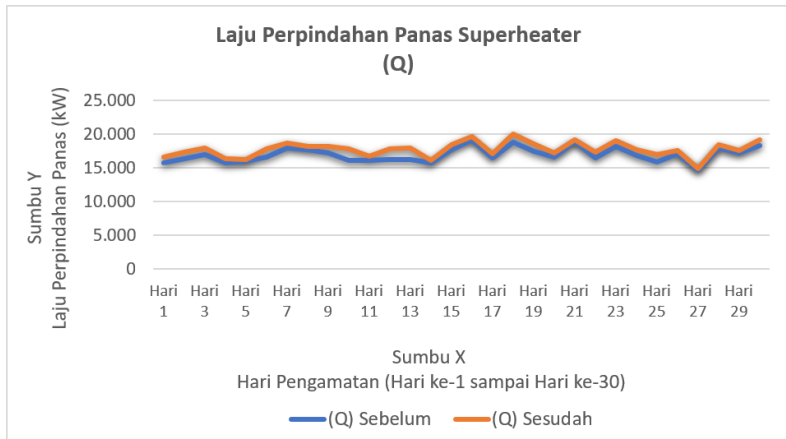
4.2.1. Sootblower Ke-1



Gambar 14. Grafik perbedaan selisih temperatur uap superheater (ΔT) sootblower ke-1 sebelum dan sesudah pada bulan November.

Pada Gambar 14 terlihat perbedaan selisih temperatur uap superheater (ΔT) pada sootblower ke-1 antara kondisi sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower selama bulan November. Berdasarkan data pengamatan, rata-rata selisih temperatur uap sebelum pengoperasian sootblower sebesar $152,37^{\circ}\text{C}$, sedangkan setelah pengoperasian sootblower meningkat menjadi $154,33^{\circ}\text{C}$. Dengan demikian, terjadi peningkatan rata-rata selisih temperatur uap sebesar $1,97^{\circ}\text{C}$. Peningkatan ΔT tersebut menunjukkan bahwa pengoperasian sootblower ke-1 membantu mengurangi endapan fouling pada permukaan pipa superheater. Sebelum sootblower dioperasikan, keberadaan fouling menghambat perpindahan panas dari gas buang menuju uap sehingga penyerapan panas belum berlangsung secara optimal. Setelah sootblower bekerja, sebagian deposit pada permukaan pipa berkurang sehingga perpindahan panas menjadi lebih efektif dan selisih temperatur uap meningkat. Namun, nilai ΔT pada setiap hari pengamatan masih mengalami fluktuasi. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh temperatur gas buang, laju aliran massa uap, beban operasi boiler, serta tingkat fouling yang berbeda pada permukaan pipa superheater. Secara keseluruhan, hasil pada Gambar 14 menunjukkan bahwa pengoperasian sootblower ke-1 memberikan

pengaruh positif terhadap peningkatan selisih temperatur uap dan kinerja perpindahan panas pada superheater.



Gambar 15. Grafik laju perpindahan panas superheater sootblower ke-1 sebelum dan sesudah di bulan november.

Gambar 15 menunjukkan perbandingan laju perpindahan panas superheater (Q) sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-1 selama periode pengamatan pada bulan November 2025. Berdasarkan hasil perhitungan, rata-rata laju perpindahan panas sebelum pengoperasian sootblower sebesar 16,910 MW, sedangkan setelah pengoperasian sootblower meningkat menjadi 17,726 MW. Dengan demikian, terjadi peningkatan rata-rata laju perpindahan panas sebesar 0,817 MW. Grafik menunjukkan bahwa pada sebagian besar hari pengamatan, nilai Q setelah pengoperasian sootblower berada di atas nilai Q sebelum sootblower. Kenaikan tersebut mengindikasikan bahwa proses perpindahan panas pada superheater menjadi lebih baik setelah pembersihan dilakukan. Sebelum sootblower dioperasikan, deposit abu dan jelaga atau fouling yang menempel pada permukaan pipa superheater dapat meningkatkan hambatan termal, sehingga panas dari gas buang belum dapat berpindah secara optimal ke uap. Setelah sootblower dioperasikan, sebagian deposit fouling berkurang sehingga hambatan perpindahan panas menurun dan panas yang diserap oleh uap meningkat. Hasil tersebut juga didukung oleh uji t berpasangan dengan nilai t hitung sebesar 11,363 pada derajat kebebasan 29. Nilai t hitung tersebut lebih besar daripada t tabel sebesar 2,045 pada taraf signifikansi 5%. Oleh karena itu, H_0 ditolak, sehingga peningkatan laju perpindahan panas setelah

pengoperasian sootblower ke-1 dinyatakan signifikan secara statistik. Secara keseluruhan, hasil grafik, perhitungan rata-rata, dan uji statistik menunjukkan bahwa pengoperasian sootblower ke-1 memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan kinerja perpindahan panas superheater.

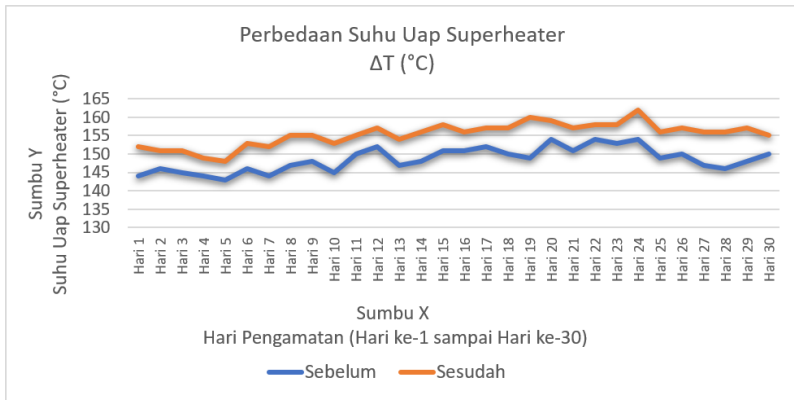


Gambar 16. Grafik Persentase Peningkatan Perpindahan Panas Superheater Akibat Pengoperasian Sootblower ke-1 di bulan november.

Berdasarkan Gambar 16, persentase peningkatan perpindahan panas superheater setelah pengoperasian sootblower 1 menunjukkan nilai yang berfluktuasi selama periode pengamatan. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh pengoperasian sootblower terhadap peningkatan perpindahan panas tidak selalu sama pada setiap hari pengamatan. Nilai persentase peningkatan tertinggi terjadi pada Hari ke-10 sebesar 10,59%, sedangkan nilai terendah terjadi pada Hari ke-27 sebesar 1,45%. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata persentase peningkatan perpindahan panas yang diperoleh selama 30 hari pengamatan adalah sebesar 4,85%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pengoperasian sootblower 1 mampu meningkatkan perpindahan panas pada superheater dibandingkan kondisi sebelum sootblower dioperasikan. Perbedaan nilai persentase peningkatan yang diperoleh pada setiap hari pengamatan mengindikasikan bahwa kondisi operasi boiler selama pengambilan data tidak selalu sama. Variasi tersebut dapat dipengaruhi oleh perubahan parameter operasi seperti temperatur, laju aliran steam, serta kondisi permukaan pipa superheater. Oleh karena itu, besarnya peningkatan perpindahan panas yang diperoleh setelah pengoperasian sootblower dapat berbeda pada setiap hari pengamatan. Secara keseluruhan, seluruh nilai persentase peningkatan yang diperoleh bernilai positif dengan rata-rata sebesar 4,85%. Hasil ini menunjukkan bahwa pengoperasian sootblower 1

memberikan pengaruh yang baik terhadap peningkatan perpindahan panas pada superheater sehingga dapat membantu menjaga kinerja boiler selama proses operasi.

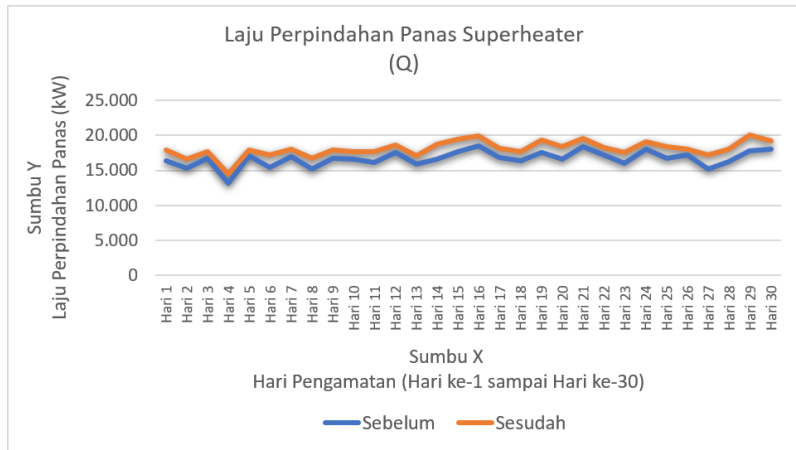
4.2.2. Sootblower Ke-2



Gambar 17. Grafik perbedaan selisih temperatur uap superheater (ΔT) sootblower ke-2 sebelum dan sesudah pada bulan November.

Gambar 17 menunjukkan perbedaan selisih temperatur uap superheater (ΔT) sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-2 selama bulan November. Secara umum, nilai ΔT setelah pengoperasian sootblower berada di atas kondisi sebelum sootblower pada seluruh hari pengamatan. Rata-rata ΔT sebelum sootblower ke-2 sebesar 148,60°C, sedangkan setelah sootblower meningkat menjadi 155,33°C. Dengan demikian, terjadi peningkatan rata-rata ΔT sebesar 6,73°C. Peningkatan ΔT tersebut mengindikasikan bahwa setelah pembersihan deposit dilakukan, uap mampu menyerap panas lebih besar saat melewati superheater. Sebelum sootblower dioperasikan, fouling pada permukaan pipa dapat menambah hambatan termal sehingga penyerapan panas oleh uap menjadi kurang optimal. Setelah deposit berkurang, hambatan perpindahan panas cenderung menurun dan selisih temperatur uap menjadi lebih tinggi. Walaupun nilai ΔT pada setiap hari mengalami fluktuasi akibat perubahan kondisi operasi boiler, seperti laju aliran uap, temperatur gas, tekanan, dan beban pembangkit, grafik menunjukkan kecenderungan peningkatan setelah sootblower ke-2 dioperasikan. Hasil ini selanjutnya didukung oleh perhitungan laju perpindahan

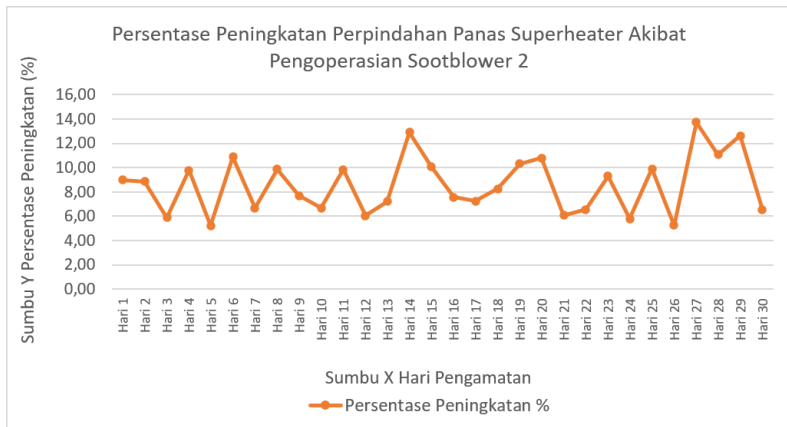
panas (Q) pada Gambar 18 untuk menilai peningkatan kinerja perpindahan panas superheater secara lebih menyeluruh.



Gambar 18. Grafik laju perpindahan panas superheater sootblower ke-2 sebelum dan sesudah di bulan november.

Gambar 18 menunjukkan perbandingan laju perpindahan panas superheater (Q) sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower ke-2 selama periode pengamatan pada bulan November 2025. Berdasarkan hasil perhitungan, rata-rata laju perpindahan panas sebelum pengoperasian sootblower sebesar 16,676 MW, sedangkan setelah pengoperasian sootblower meningkat menjadi 18,098 MW. Dengan demikian, terjadi peningkatan rata-rata laju perpindahan panas sebesar 1,421 MW. Grafik menunjukkan bahwa nilai Q setelah pengoperasian sootblower ke-2 secara umum lebih tinggi dibandingkan kondisi sebelum sootblower. Kenaikan tersebut mengindikasikan bahwa proses perpindahan panas pada superheater menjadi lebih optimal setelah pembersihan dilakukan. Sebelum sootblower dioperasikan, deposit abu dan jelaga atau fouling yang menempel pada permukaan pipa superheater dapat meningkatkan hambatan termal, sehingga panas dari gas buang belum dapat berpindah secara maksimal ke uap. Setelah sootblower dioperasikan, sebagian deposit fouling berkurang sehingga hambatan perpindahan panas menurun dan panas yang diserap oleh uap meningkat. Hasil tersebut juga didukung oleh uji t berpasangan dengan nilai t hitung sebesar 21,141 pada derajat kebebasan 29. Nilai t hitung tersebut lebih besar daripada t tabel sebesar 2,045 pada taraf signifikansi 5%. Oleh karena itu, H_0 ditolak, sehingga peningkatan laju perpindahan panas setelah pengoperasian

sootblower ke-2 dinyatakan signifikan secara statistik. Secara keseluruhan, hasil grafik, perhitungan rata-rata, dan uji statistik menunjukkan bahwa pengoperasian sootblower ke-2 memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan kinerja perpindahan panas superheater.



Gambar 19. Grafik Persentase Peningkatan Perpindahan Panas Superheater Akibat Pengoperasian Sootblower ke-2 di bulan november.

Berdasarkan Gambar 19, persentase peningkatan perpindahan panas superheater setelah pengoperasian sootblower 2 terlihat mengalami naik turun selama periode pengamatan. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh sootblower terhadap peningkatan perpindahan panas tidak selalu sama setiap harinya. Nilai peningkatan tertinggi terjadi pada Hari ke-27 sebesar 13,72%, sedangkan nilai terendah terjadi pada Hari ke-5 sebesar 5,22%. Rata-rata persentase peningkatan perpindahan panas selama 30 hari pengamatan adalah sebesar 8,59%. Nilai ini menunjukkan bahwa sootblower 2 mampu meningkatkan perpindahan panas pada superheater dibandingkan sebelum dioperasikan. Perbedaan nilai peningkatan pada setiap hari menunjukkan bahwa kondisi operasi boiler tidak selalu sama saat pengambilan data. Hal ini dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti temperatur, laju aliran steam, serta kondisi permukaan pipa superheater. Oleh karena itu, hasil peningkatan perpindahan panas setelah pengoperasian sootblower bisa berbeda setiap harinya. Secara keseluruhan, semua nilai peningkatan yang diperoleh bernilai positif dengan rata-rata sebesar 8,59%. Hal ini menunjukkan bahwa sootblower 2 bekerja dengan baik dalam meningkatkan perpindahan panas pada superheater dan membantu menjaga kinerja boiler tetap optimal selama proses operasi.

Bab 5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data mengenai pengaruh pengoperasian sootblower terhadap laju perpindahan panas superheater pada Boiler Unit 05 di PT Bintang Alumina Indonesia, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengoperasian sootblower meningkatkan selisih temperatur uap superheater (ΔT). Pada sootblower ke-1, rata-rata ΔT meningkat dari 152,37 °C sebelum pengoperasian sootblower menjadi 154,33 °C setelah pengoperasian sootblower, sehingga terjadi peningkatan sebesar 1,97 °C. Pada sootblower ke-2, rata-rata ΔT meningkat dari 148,60 °C menjadi 155,27 °C, sehingga terjadi peningkatan sebesar 6,67 °C. Peningkatan ΔT tersebut menunjukkan bahwa penyerapan panas oleh uap pada superheater menjadi lebih baik setelah pembersihan deposit fouling.
2. Pengoperasian sootblower meningkatkan laju perpindahan panas superheater (Q). Pada sootblower ke-1, rata-rata laju perpindahan panas meningkat dari 16,910 MW sebelum sootblower menjadi 17,726 MW setelah sootblower, atau meningkat sebesar 0,817 MW. Pada sootblower ke-2, rata-rata laju perpindahan panas meningkat dari 16,676 MW menjadi 18,098 MW, atau meningkat sebesar 1,421 MW.
3. Persentase peningkatan laju perpindahan panas superheater setelah pengoperasian sootblower bernilai positif. Pada sootblower ke-1, rata-rata persentase peningkatan sebesar 4,85%, dengan nilai tertinggi sebesar 10,59% pada hari ke-10 dan nilai terendah sebesar 1,45% pada hari ke-27. Pada sootblower ke-2, rata-rata persentase peningkatan sebesar 8,59%, dengan nilai tertinggi sebesar 13,72% pada hari ke-27 dan nilai terendah sebesar 5,22% pada hari ke-5. Perbedaan nilai peningkatan tersebut dipengaruhi oleh kondisi fouling awal dan variasi kondisi operasi boiler.
4. Hasil uji t berpasangan menunjukkan bahwa terdapat perbedaan laju perpindahan panas superheater yang signifikan sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower. Pada sootblower ke-1, nilai t hitung sebesar 11,363 lebih besar daripada t tabel sebesar 2,045. Pada sootblower ke-2, nilai t hitung sebesar 21,141 lebih besar daripada t tabel sebesar 2,045, pada taraf signifikansi 5% dengan derajat kebebasan 29. Dengan demikian, H_0 ditolak dan H_1 diterima. Dengan demikian, terdapat

perbedaan laju perpindahan panas superheater yang signifikan sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh pengoperasian sootblower terhadap laju perpindahan panas superheater pada Boiler Unit 05 di PT. Bintang Alumina Indonesia, maka beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Pengoperasian sootblower pada superheater sebaiknya dilakukan secara berkala dan disesuaikan dengan kondisi aktual operasi boiler. Penentuan waktu pengoperasian perlu memperhatikan perubahan temperatur uap keluar, laju perpindahan panas, serta indikasi penumpukan fouling agar proses pembersihan dapat berjalan efektif tanpa dilakukan secara berlebihan.
2. Pemantauan terhadap parameter operasi superheater perlu dilakukan secara rutin melalui sistem Distributed Control System (DCS), terutama pada temperatur uap masuk dan keluar, temperatur gas buang, tekanan uap, laju aliran massa uap, serta beban boiler. Pemantauan ini penting untuk mengetahui perubahan kinerja perpindahan panas sebelum dan sesudah pengoperasian sootblower.
3. Perusahaan disarankan melakukan evaluasi berkala terhadap efektivitas sootblower ke-1 dan sootblower ke-2. Evaluasi ini dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan strategi pengoperasian sootblower yang lebih optimal, sehingga kinerja perpindahan panas superheater dapat tetap terjaga selama boiler beroperasi.
4. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menggunakan periode pengamatan yang lebih panjang serta menambahkan variabel pendukung lainnya, seperti beban boiler, kualitas batubara, tekanan uap, dan kondisi gas buang. Dengan penambahan variabel tersebut, analisis pengaruh sootblower terhadap kinerja perpindahan panas superheater dapat dilakukan secara lebih lengkap dan mendalam.
5. Penelitian selanjutnya juga dapat membandingkan efektivitas pengoperasian sootblower pada komponen boiler lainnya, seperti reheater, economizer, atau air heater. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh sootblower terhadap kinerja perpindahan panas pada sistem boiler secara lebih luas.

Daftar Pustaka

- [1] F. Fajri and R. Arizona, "Studi pengaruh pengoperasian soot blower terhadap energi panas yang diserap superheater pada unit 2 PLTU tenayan," *J. Tek. Mesin Indones.*, vol. 17, no. 2, pp. 30–34, 2022, doi: 10.36289/jtmi.v17i2.316.
- [2] F. G. Sumarno, Wahyuno, and O. I. Aditya, "Fouling Dan Pengaruhnya Pada Final Secondary Superheater Pltu Tanjung Jati B Unit 2," *Januari*, vol. 10, no. 1, pp. 9–13, 2014.
- [3] Hendri, Suhengki, and A. F. Lubis, "Pengaruh Fouling Terhadap Laju Perpindahan Panas," *J. Power Plat*, vol. 6, no. 1, pp. 48–57, 2018.
- [4] N. Chandra Purnama, "Analisis_Kegagalan_Sootblower_Terhadap_Perpindahan," *Tek. Mesin*, vol. 06, no. 3, pp. 187–190, 2017.
- [5] H. Al Rosyid and J. Firmansyah, "Analisis Kegagalan Material Waterwall Tube Boiler PLTU Ubon Banten 3 Lontar Unit 3," *J. Power Plant*, vol. lim, no. 2356–1513, pp. 34–41, 2019.
- [6] U. M. Area, "ANALISIS KINERJA PADA RUANG BAKAR BOILER PIPA API SKALA MODEL DENGAN TEKanan UAP 700 kPa DENGAN MENGGUNAKAN BAHAN BAKAR CANGKANG SKRIPSI OLEH : IRFAN PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS MEDAN AREA MEDAN ANALISIS KINERJA PADA RUANG BAKAR BOILER PIPA API SKALA MODEL DENGAN TEKanan UAP 700 kPa Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana di Fakultas Teknik Universitas Medan Area Oleh ;," 2024.
- [7] A. Info, "Evaluasi perpindahan panas dan efisiensi s uperheater pada unit multi fuel boiler," vol. 14, no. 1, pp. 54–59, 2024.
- [8] A. P. Pengoperasian, S. Terhadap, L. Energi, P. Ratu, and J. T. Mesin,

“Politeknik negeri jakarta,” 2024.

- [9] P. S. Fisika, F. Matematika, D. A. N. Ilmu, P. Alam, and U. N. Yogyakarta, “Infrared Infrared,” 2020.
- [10] Z. Masrianto, L. K. Mangalla, and Y. Gunawan, “Pengujian Eksperimen Pembuang Panas dan Aliran Udara Pada Berbagai Bentuk Heatsink,” vol. 6, no. 4, 2021.
- [11] D. I. P. Suralaya, Y. C. Dwiaji, and D. M. Utama, “Jurnal simetrik vol.10, no.1, juni 2020,” vol. 10, no. 1, pp. 308–312, 2020.
- [12] M. A. Al-behadili and A. A. Al-hajjaj, “ASEAN Journal for Science and Engineering in Materials Thermal Enhancement of Ribbed Double Pipe Heat Exchangers Using Titanate Nanofluids for Advanced Heat Transfer Systems,” vol. 4, no. 2, pp. 285–296, 2025.
- [13] J. Penelitian and I. Pendidikan, “Uji T-Student Dua Sampel Saling Berpasangan/Dependend (Paired Sample t – Test),” vol. 4, pp. 568–576, 2025.

Biodata

Pas Foto
2 x 3

Nama : Fran Oloando Lumban Tobing
TTL : Batam, 25 Januari 2004
Agama : Kristen
Alamat : Kav. Sagulung Baru Blok T/23

Email : frantobing25@gmail.com
Riwayat SMA/SMK : SMK N 5 Batam
Pendidikan SMP : SMP N 36 Batam

Lampiran

Silakan masukkan lampiran yang diperlukan. Jika diperlukan, lampiran dapat dipisah menjadi Lampiran A, Lampiran B, dan seterusnya.

**FORMULIR LOOGBOOK BIMBINGAN DAN PENGAJUAN
SEMINAR PROPOSAL/~~SIDANG TUGAS AKHIR~~***

Nama : Fran Oloando Lumban Tobing
 NIM : 4232201034
 Pembimbing : Yusiran S.Si, M.T
 Judul : Analisis Pengaruh Pengoperasian Sootblower Terhadap Laju Energi Panas Yang Diserap Superheater Pada Unit 05 di PT. Bintang Alumina Indonesi

No	Hari/Tgl	Rincian Kegiatan	TTD Pembimbing
1	23/09/2025	Perkenalan awal dan persiapan untuk membuat TA	
2	09/10/2025	Sharing rumusan masalah dan cara mencari judul	
3	23/10/2025	Presentasi judul dan rumusan masalah	
4	02/11/2025	Bimbingan progres bab 1 dan revisi	
5	11/11/2025	Bimbingan progres bab 1 dan lanjut bab 2	
6	27/11/2025	Bimbingan progres bab 2 dan revisi	
7	09/12/2025	Bimbingan progres bab 2 dan revisi serta lanjut bab 3	
8	17/12/2025	Bimbingan progres bab 3 dan revisi	
9	22/12/2025	Bimbingan progres bab 3 dan Review final TA	
10	04/01/2026	Persiapan Sempro	

Berdasarkan hasil bimbingan yang telah dilaksanakan selama 4 bulan dan telah disetujui oleh dosen pembimbing, maka dengan ini saya mengajukan diri sebagai peserta Seminar Proposal

Dosen Pembimbing



Yusiran S.Si, M.T
 NIP : 123294

Batam, 05 – Januari - 2026
 Mahasiswa



Fran Oloando L.T
 NIM: 4232201034

**Hapus yang tidak perlu.*

Jumlah bimbingan minimal 10 kali. Dalam satu minggu maksimal bimbingan yang dihitung adalah 2 kali.

**FORMULIR LOGBOOK BIMBINGAN DAN
PENGAJUAN ~~SEMINAR PROPOSAL~~/SIDANG
TUGAS AKHIR**

Nama : Fran Oloando Lumban Tobing
 NIM : 4232201034
 Pembimbing I : Yussiran, S.Si., M.T
 Judul : Analisis Pengaruh Pengoperasian Sootblower Terhadap Laju
 Perpindahan Panas Superheater pada Boiler Unit 05 di PT. Bintang Alumina Indonesia

No	Hari/Tgl	Rincian Kegiatan	TTD Pembimbing I
1	01/11/2025	Konsultasi pengambilan data.	
2	04/12/2025	Konsultasi perhitungan dan pengolahan data.	
3	11/02/2026	Konsultasi perhitungan dan pengolahan data.	
4	31/02/2026	Review dan revisi perhitungan dan pengolahan data.	
5	13/03/2026	Dospem mereview Kembali bab 4, dan memberi arahan yang harus di revisi lagi di bab 4.	
6	07/04/2026	Review hasil revisi bab 4.	
7	15/04/2026	Review bab 4 dan merevisi bab 5	
8	02/05/2026	Review hasil bab 5.	
9	22/06/2026	Dospem mereview hasil revisi yang sudah dikerjakan, dan sudah menyetujui keseluruhan hasilnya.	
10	27/06/2026	Membahas power point dan berkas administrasi untuk lanjut ke Sidang Tugas Akhir.	

Berdasarkan hasil bimbingan yang telah dilaksanakan selama 5 bulan dan telah disetujui oleh dosen pembimbing, maka dengan ini saya mengajukan diri sebagai peserta ~~Seminar Proposal~~ /Sidang Tugas Akhir.

Dosen Pembimbing



Yussiran, S.Si., M.T
 NIP: 123294

Batam, 29 Juni 2026
 Mahasiswa



Fran Oloando Lumban Tobing
 NIM: 4232201034

FORMULIR PENGAJUAN JUDUL DAN PEMBIMBING TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fran Oloando Lumban Tobing

NIM : 4232201034

Telah melaksanakan proses pra bimbingan dengan calon dosen pembimbing dalam perumusan judul Tugas Akhir/Proyek Akhir (TA/PA). Hasil proses pra bimbingan tersebut memutuskan :

Judul TA/PA : 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. Bintang Alumina Indonesia

Dosen Pembimbing 1 : Yusiran S.Si, M.T

()

Judul tersebut telah diverifikasi dan disetujui oleh dosen pembimbing.

.

Batam, 05 Januari 2026

Mahasiswa,



Fran Oloando Lumban
Tobing

NIM: 4232201034