



Pengaruh Tekanan Sealing Turbin Terhadap Kevakuman Kondensor Pada Turbin Uap Unit 4 PT Bintang Alumina Indonesia

Tugas Akhir

**Oleh:
Fajar Masdiantoro (4232201010)**

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

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul: "**Pengaruh Tekanan Sealing Turbin Terhadap Kevakuman Kondensor Pada Turbin Uap Unit 4 PLTU PT Bintan 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, 26 Juni 2026



Fajar Masdiantoro
NIM: 4232201010

Lembar Pengesahan Industri

Lembar Pengesahan Industri

Data Tugas Akhir ini bebas dari plagiasi dan mendapat izin untuk disimpan, dikelola dan dipublikasikan untuk kepentingan Akademik.

Disusun oleh: Fajar Masdiantoro

Program Studi: Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi (TRPE)
Jurusan: Teknik Elektro (Politeknik Negeri Batam)

Judul Tugas Akhir: Pengaruh Tekanan Sealing Turbin Terhadap

Kevakuman Kondensor Pada Turbin Uap Unit 4

PT Bintan Alumina Indonesia

Perusahaan: PT Bintan Alumina Indonesia

Disetujui oleh :

Dosen Pembimbing:



Nama: Dr. Ir. Didi Istardi, S.T., M.Sc

NIK: 102022

Pembimbing Industri:



Nama: Rianda Fikri

NIK: I21100053

HRD/Manager



Nama: Seprianto

NIK: I2007003

Lembar Pengesahan

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

Disusun oleh:
Fajar Masdiantoro (4232201010)

Tanggal Sidang Akhir : 06 Juli 2026

Disetujui oleh :

1. Penguji I

Handri Toar S.ST., M.Tr. T
NIK:113114



1. Pembimbing I

Dr. Ir. Didi Istardi, S.T., M.Sc.
NIK: 102022



2. Penguji II

Afif Nuril Musthofa, S.Tr.T.,M.Tr.T
NIK: 125340



Pengaruh Tekanan Sealing Turbin Terhadap Kevakuman Kondensor Pada Turbin Uap Unit 4 PT Bintan Alumina Indonesia

Abstrak

PLTU PT Bintan Alumina Indonesia Unit 4 mengalami fluktuasi kevakuman kondensor yang dipengaruhi oleh tekanan sealing turbin uap. Berbeda dari unit lain, Unit 4 membutuhkan tekanan sealing lebih tinggi dari standar umum untuk menjaga kestabilan vakum kondensor. Penelitian ini bertujuan menganalisis korelasi antara tekanan sealing dengan kevakuman kondensor, menentukan nilai tekanan sealing optimal untuk mempertahankan vakum pada rentang -94 hingga -95 kPa, serta memetakan pola fluktuasi operasional periode Agustus–November 2025. Metode kuantitatif digunakan dengan pengumpulan data dari Distributed Control System (DCS) dan logsheet pada beban turbin 14–15 MW, mencakup 32 titik data mingguan yang dibagi menjadi nilai tertinggi dan terendah. Data diolah menggunakan Microsoft Excel melalui perhitungan rata-rata, korelasi Pearson, regresi linear sederhana, dan koefisien determinasi. Hasil analisis menunjukkan korelasi Pearson $r = -0,8395$ yang tergolong sangat kuat dan berpola negatif, dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,7048$, artinya 70,48% variasi vakum kondensor dijelaskan oleh variasi tekanan sealing. Persamaan regresi yang diperoleh adalah $\hat{y} = -0,3853x - 79,8294$. Berdasarkan persamaan tersebut, rentang tekanan sealing optimal adalah $36,77 \text{ kPa} \leq x \leq 39,37 \text{ kPa}$, dengan nilai rata-rata aktual sebesar 37,16 kPa yang berada dalam rentang tersebut. Penelitian ini menyimpulkan bahwa tekanan sealing berpengaruh signifikan terhadap kevakuman kondensor, sehingga pengaturan setpoint pada rentang 36,77–39,37 kPa direkomendasikan untuk menjaga efisiensi operasional PLTU Unit 4.

Kata Kunci: tekanan sealing, kevakuman kondensor, turbin uap, korelasi Pearson, regresi linear, DCS

The Effect of Steam Turbine Sealing Pressure on Condenser Vacuum Performance in Unit 4 Steam Turbine at PT Bintan Alumina Indonesia

Abstract

The Steam Power Plant (PLTU) Unit 4 at PT Bintan Alumina Indonesia experiences condenser vacuum fluctuations influenced by steam turbine sealing pressure. Unlike other units, Unit 4 requires a higher sealing pressure than the general standard to maintain condenser vacuum stability. This study aims to analyze the correlation between sealing pressure and condenser vacuum, determine the optimal sealing pressure to maintain vacuum within -94 to -95 kPa, and map operational fluctuation patterns over the August–November 2025 period. A quantitative method was employed, collecting data from the Distributed Control System (DCS) and operational logsheets at turbine loads of 14–15 MW, comprising 32 weekly data points categorized into maximum and minimum values. Data were processed using Microsoft Excel through mean calculation, Pearson correlation, simple linear regression, and coefficient of determination. The analysis yielded a Pearson correlation of $r = -0.8395$, indicating a very strong negative correlation, with $R^2 = 0.7048$, meaning 70.48% of condenser vacuum variation is explained by sealing pressure variation. The regression equation obtained is $\hat{y} = -0.3853x - 79.8294$. The optimal sealing pressure range to maintain condenser vacuum within the target is $36.77 \text{ kPa} \leq x \leq 39.37 \text{ kPa}$, with an actual average of 37.16 kPa falling within this range. This study concludes that sealing pressure significantly affects condenser vacuum, and maintaining the setpoint within 36.77–39.37 kPa is strongly recommended to sustain operational efficiency of Unit 4.

Keywords: sealing pressure, condenser vacuum, steam turbine, Pearson correlation, linear regression, DCS

Kata Pengantar

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan berkat dan kasih karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Pengaruh Tekanan Sealing Turbin Terhadap Kevakuman Kondensor Pada Turbin Uap Unit 4 PLTU PT Bintang Alumina Indonesia”. Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan Pendidikan Tingkat Diploma IV pada Jurusan Teknik Elektro Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi Politeknik Negeri Batam.

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis memperoleh banyak bantuan, dukungan, bimbingan, serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua dan keluarga yang sudah memberikan dukungan, doa, dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Didi Istardi, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah bersedia memberikan arahan dan saran untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
4. Bapak Ir. Muhammad Syafei Gozali, S.T.,M.T selaku wali dosen yang sudah memberikan arahan dan pembelajaran selama perkuliahan.
5. Bapak Irwanto Zarma Putra, S.Pd., M.Eng. selaku Kepala Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi.
6. Bapak Jhon Hericson Purba, S.Pd.,M.,Pd. selaku dosen pengampu Tugas Akhir.
7. Abang Faiz Naufal Nurqoys selaku Foreman Tim A yang telah membimbing penulis dalam proses magang dan menyusun tugas akhir di PT Bintang Alumina Indonesia.
8. Abang Muhamad Seno Probo Waskito,S.T selaku Engineer Divisi Turbin PT Bintang Alumina Indonesia.
9. Bapak Edi Susanto selaku supervisor departemen PLTU PT Bintang Alumina Indonesia.
10. Seluruh staff dan karyawan PT Bintang Alumina Indonesia khususnya pada departemen PLTU divisi turbin shift a yang telah mengajari dan memberikan ilmu pengetahuan.
11. Rekan-rekan magang di PT Bintang Alumina Indonesia yang telah kebersamaan penulis dalam menyusun tugas akhir.
12. Adelia Puji Astuti 4212301033 Sebagai kekasih penulis yang senantiasa memberikan dukungan, semangat, motivasi kepada penulis, serta telah membantu dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
13. Rekan-rekan kelas RPE A yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.

14. Semua pihak yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu yang telah membantu, mendukung, dan memberikan semangat serta doa kepada penulis untuk dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan tepat waktu.
15. Kepada diri sendiri, Fajar Masdiantoro yang sudah berjuang dan bertanggung jawab untuk menyelesaikan apa yang sudah dimulai.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan, baik dari segi penulisan maupun isi. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan Tugas Akhir ini di masa yang akan datang.

Akhir kata, penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta dapat menjadi referensi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Demikian kata pengantar ini Penulis sampaikan. Atas perhatian, dukungan, dan Kerjasama dari semua pihak, Penulis ucapkan terimakasih.

Batam, 26 Juni 2026

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Fajar', with several horizontal strokes underneath.

Fajar Masdiantoro

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	i
Lembar Pengesahan Industri.....	ii
Lembar Pengesahan.....	iii
Abstrak	iv
<i>Abstract</i>	v
Kata Pengantar	vi
Daftar Isi	viii
Daftar Gambar	xi
Daftar Tabel.....	xii
Bab 1. Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Manfaat	2
1.5. Batasan.....	3
Bab 2. Tinjauan Pustaka	4
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)	4
2.1.1. Prinsip Kerja PLTU.....	5
2.1.2. Komponen Utama PLTU	5
2.2 Tekanan Sealing.....	11
2.2.1. Pengertian Tekanan Sealing	11
2.2.2. Sistem Pengaturan Tekanan Sealing.....	11
2.2.3. Kondisi Tekanan Sealing Normal dan Tidak Normal	11
2.3. Sistem <i>Sealing</i> Turbin Uap Unit 4 PT Bintang Alumina Indonesia	12
2.3.1. Pengertian Sistem Sealing	12
2.3.2. Fungsi Sistem Sealing pada PLTU.....	13

2.3.3. Prinsip Kerja Sistem Sealing.....	13
2.3.4. Pengaruh Kegagalan Sistem Sealing	15
2.4. Pengaruh Tekanan Sealing terhadap Kevakuman Kondensor	15
2.4.1. Hubungan Tekanan Sealing dan Kebocoran Udara.....	15
2.4.2. Pengaruh Kebocoran Udara terhadap Kevakuman Kondensor ..	16
2.5. Sistem Kevakuman Kondensor Turbin Uap Unit 4 PT Bintang Alumina Indonesia	16
2.5.1. Pengertian Kevakuman Kondensor	17
2.5.2. Fungsi Kevakuman pada Kondensor	17
2.5.3. Prinsip Kerja Kevakuman Kondensor	18
2.5.4. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kevakuman Kondensor	19
2.5.5. Dampak Penurunan Kevakuman Kondensor terhadap Kinerja PLTU	20
2.5.6. Pompa Vakum Pada Kevakuman Kondensor	20
2.5.7. Standar Tekanan Vakum Kondensor Berdasarkan Spesifikasi Teknis Turbin Uap Unit 4	25
2.6. <i>Distributed Control System</i> (DCS)	26
2.7. Penelitian Terdahulu	28
Bab 3. Metodologi Penelitian (*D4)	30
3.1. Desain Penelitian	30
3.1.1. Metode Penelitian	30
3.1.2. Lokasi dan Waktu Penelitian	30
3.2. Metode Pengumpulan Data	31
3.2.1 Studi Literatur	31
3.2.3 Pengumpulan Data	31
3.1.3 Diagram Alir	35
3.3. Variabel Penelitian	36
3.4. Metode Analisis Data	36
3.4.1. Pengolahan Data Awal.....	36
3.4.2. Analisis Statistik	37

3.4.3. Penggunaan Software	37
3.5. Metode Pengolahan data	37
3.5.1 . Perhitungan Rata-Rata (Mean)	37
3.5.2. Koefisien Korelasi Pearson (r)	38
3.5.2. Persamaan Regresi Linear Sederhana	38
3.5.3. Koefisien Determinasi (R^2)	38
3.5.4. Interpretasi Data	39
Bab 4. Hasil dan Pembahasan	42
4.1. Data Hasil Penelitian	42
4.2. Pembahasan	44
4.2.1. Pengolahan Data Penelitian Menggunakan Microsoft Excel	44
4.3. Hasil Analisis	46
4.3.1. Hubungan Tekanan Sealing Turbin terhadap Kevakuman Kondensor	46
4.3.2 Nilai Tekanan Sealing Optimal untuk Mempertahankan Vakum 94– 95 kPa	49
4.3.3. Pola Grafik Hubungan Tekanan Sealing terhadap Fluktuasi Vakum Kondensor	50
BAB 5. Kesimpulan dan Saran	53
5.1. Kesimpulan	53
5.2. Saran	54
Daftar Pustaka	56

Daftar Gambar

Gambar 1. PLTU PT Bintan Alumina Indonesia.....	4
Gambar 2. Siklus PLTU.....	5
Gambar 3. Boiler PLTU PT Bintan Alumina Indonesia	6
Gambar 4. Turbin uap unit 4 PLTU PT Bintan Alumina Indonesia	7
Gambar 5. Siklus Turbin Uap Kondensasi	8
Gambar 6. Generator PT PLTU BAI	9
Gambar 7. Kondensor PLTU PT BAI	10
Gambar 8. Sistem Sealing Turbin Unit 4 PT BAI.....	12
Gambar 9. Sistem Vakum Kondensor Unit 4	16
Gambar 10. Pompa Vakum Tipe Root PT BAI	21
Gambar 11. Bagian-bagian Pompa Vakum Tipe Root.....	21
Gambar 12. Pompa Vakum Tipe Cincin Air	23
Gambar 13. Bagian-bagian Pompa Vakum Tipe Cincin Air	24
Gambar 14. Prosedur Pengoperasian Unit Utama PT.BAI	25
Gambar 15. <i>Distributed Control System</i> (DCS).....	26
Gambar 16. Map PLTU PT BAI	30
Gambar 17. Diagram Alir	35
Gambar 18. Grafik Hubungan Tekanan Sealing terhadap Fluktuasi Vakum Kondensor	51
Gambar 19. Pola Tren Waktu	52

Daftar Tabel

Tabel 1. Penelitian Terdahulu.....	28
Tabel 2. Data Nilai Rata-rata Tertinggi	31
Tabel 3. Data Nilai Rata-rata Terendah	32
Tabel 4. Spesifikasi Turbin Uap Unit 4.....	33
Tabel 5. Spesifikasi Kondensor Unit 4.....	33
Tabel 6. Spesifikasi Pompa Vakum	33
Tabel 7. Interpretasi Data.....	39
Tabel 8. Pengolahan Data Nilai Tertinggi di Microsoft Excel	40
Tabel 9. Pengolahan Data Nilai Terendah di Microsoft Excel	41
Tabel 10. Data Tertinggi	42
Tabel 11. Data Terendah	43
Tabel 12. Hasil Data Tertinggi.....	44
Tabel 13. Hasil Data Terendah.....	45
Tabel 14. Nilai Perhitungan	46
Tabel 15. Hasil Observasi Tren	52

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas uap untuk menghasilkan energi listrik. Dalam sistem ini, turbin uap berperan sebagai komponen utama yang mengubah energi panas uap menjadi energi mekanik untuk menggerakkan generator. Salah satu aspek penting dalam pengoperasian turbin uap adalah pengaturan tekanan sealing, yang berfungsi menjaga integritas sistem uap di sekitar turbin dan mencegah kebocoran yang dapat menurunkan efisiensi pembangkit. [1]

Tekanan sealing memiliki peranan signifikan terhadap kondisi vakum di kondensor. Kondensor pada PLTU berfungsi mengubah uap keluaran turbin menjadi air dengan menjaga tekanan di dalamnya tetap rendah (vakum). Kondisi vakum yang optimal pada kondensor akan meningkatkan efisiensi konversi energi pada turbin, sedangkan penurunan vakum dapat mengganggu proses kondensasi dan mengurangi daya keluaran turbin. [2]

Secara umum, sistem tekanan sealing pada turbin berfungsi memisahkan sisi depan turbin (bertekanan tinggi) dengan sisi belakang turbin (bertekanan rendah) menggunakan media uap, sehingga mencegah kebocoran gas bertekanan tinggi ke luar dan masuknya udara dari luar ke dalam sistem. Jika tekanan sealing tidak berada pada nilai standarnya, maka dapat menyebabkan tekanan sealing menjadi rendah. Kondisi ini memungkinkan udara dari sekitar turbin masuk ke dalam kondensor melalui jalur belakang turbin, sehingga menurunkan tekanan vakum dan menyebabkan ketidakstabilan di kondensor.

Masuknya udara ke dalam sistem membuat pompa vakum harus bekerja lebih keras untuk menstabilkan tekanan kondensor. Akibatnya, arus listrik pada pompa dapat meningkat hingga berlebihan (overcurrent), karena pompa harus segera membuang udara ke atmosfer melalui sistem blower. Pada umumnya, tekanan sealing normal berada di kisaran ± 17 kPa hingga 37 kPa, dan dalam kondisi stabil dijaga pada 34–37 kPa. Namun, pada unit 4 PLTU PT Bintang Alumina Indonesia, tekanan sealing sebesar 35 kPa justru menyebabkan penurunan tekanan vakum. Berbeda dengan unit 1, di mana nilai tersebut masih tergolong normal, sistem pada unit 4 memerlukan tekanan sealing yang lebih tinggi, yaitu sekitar 38–40 kPa. Hal ini menyebabkan sistem sealing di unit 4 harus dipantau secara intensif agar tidak berdampak negatif terhadap kevakuman kondensor.

Belum terdapat penelitian yang secara khusus menganalisis pengaruh variasi tekanan sealing terhadap besar kecilnya tekanan vakum di kondensor pada PT BAI. Penelitian yang ada umumnya hanya membahas performa

kondensor secara umum tanpa mengkuantifikasi bagaimana perubahan tekanan sealing berpengaruh terhadap tingkat vakum dan efisiensi turbin uap. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengisi kekosongan tersebut dengan mengukur dan mengevaluasi hubungan antara tekanan sealing dan kondisi vakum kondensor sebagai dasar rekomendasi pengoperasian yang lebih optimal.

Penelitian mengenai pengaruh tekanan sealing turbin terhadap kevakuman kondensor pada turbin uap unit 4 PT Bintang Alumina Indonesia menjadi penting untuk memahami sejauh mana variabilitas tekanan sealing memengaruhi performa sistem kondensasi dan efisiensi turbin. Tekanan vakum kondensor yang rendah dapat menghambat proses penarikan uap dari turbin, berpotensi menimbulkan kerusakan pada sudu-sudu turbin, serta menurunkan efisiensi keseluruhan sistem. Dengan memahami hubungan ini, strategi pengaturan tekanan sealing dapat dioptimalkan untuk menjaga kestabilan vakum kondensor, meningkatkan efisiensi turbin, dan mendukung produktivitas pembangkit listrik secara keseluruhan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana korelasi antara tekanan sealing (34-37 kPa) dengan tekanan vakum kondensor pada turbin uap unit 4?
2. Berapakah nilai tekanan sealing optimal untuk mempertahankan vakum kondensor pada rentang (-94 hingga -95 kPa).
3. Bagaimana pola grafik hubungan tekanan sealing terhadap fluktuasi vakum kondensor berdasarkan data operasional periode mingguan?

1.3. Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui korelasi antara tekanan sealing turbin dengan tekanan vakum kondensor pada turbin uap unit
2. Menentukan nilai tekanan sealing optimal untuk mempertahankan vakum kondensor pada rentang (-94 hingga -95 kPa)
3. Mengevaluasi pola perubahan tekanan sealing terhadap fluktuasi vakum kondensor berdasarkan data operasional periode mingguan.

1.4. Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang, sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman tentang bagaimana tekanan sealing pada turbin uap memengaruhi kevakuman kondensor, yang penting untuk menjaga efisiensi dan performa turbin.
2. Membantu mengidentifikasi kondisi operasi optimal tekanan sealing agar vakum kondensor tetap stabil dan turbin beroperasi efisien.
3. Menyediakan data operasional untuk evaluasi dan perbaikan sistem sealing dan vakum kondensor di unit turbin uap, khususnya pada Unit 4 PT Bintang Alumina Indonesia.
4. Mendukung pengambilan keputusan teknis dalam pemeliharaan dan pengoperasian PLTU agar dapat meningkatkan keandalan dan *output* listrik.
5. Memberikan kontribusi ilmiah dan teknis yang berguna untuk pengembangan teknologi turbin uap dan efisiensi pembangkit listrik

1.5. Batasan

Agar tidak melebarnya suatu pembahasan, maka diperlukan adanya batasan masalah, Sebagai berikut:

1. Pengambilan data dan analisis pada Tugas Akhir ini berdasarkan data di control room dan logsheets turbin uap kondenser unit 04 PLTU PT Bintang Alumina Indonesia.
2. Penelitian ini hanya menganalisa variasi tekanan sealing terhadap nilai vakum pada turbin unit 04 PLTU Bintang Alumina Indonesia.
3. Penelitian dilakukan pada kondisi beban turbin di rentang 14-15 MW.
4. Penelitian ini hanya menghitung rata-rata tekanan sealing dan tekanan vakum, tertinggi dan terendah pada periode tertentu.
5. Penelitian ini tidak membahas aspek ekonomi, musim, biaya perawatan, operasional, serta perbaikan.
6. Penelitian ini tidak membahas adanya pengaruh lain terhadap variabel .
7. Penelitian ini hanya membahas parameter, tekanan sealing, tekanan vakum, beban, dan pompa vakum.
8. Penelitian ini hanya bertujuan untuk membuktikan bahwa tekanan sealing ini termasuk salah satu factor yang berpengaruh pada kevakuman kondensor yang bisa mengganggu efisiensi turbin.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

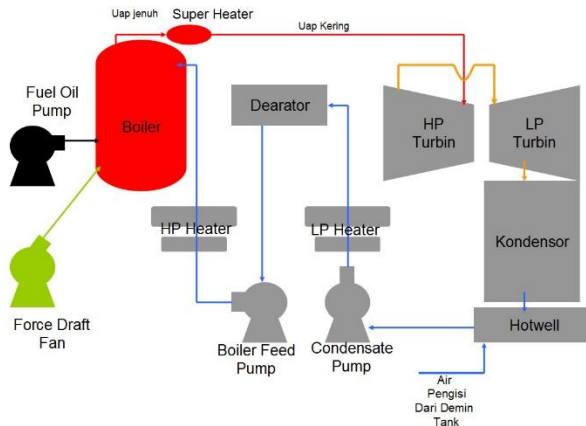


Gambar 1. PLTU PT Bintan Alumina Indonesia

(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

PLTU merupakan sistem pembangkitan listrik yang menggunakan uap air sebagai media kerja utama. Proses konversi energi dimulai dengan pemanfaatan panas dari pembakaran bahan bakar untuk memanaskan air hingga menjadi uap. Energi kinetik dari uap ini dimanfaatkan untuk memutar sudu-sudu turbin, sehingga energi panas berubah menjadi energi mekanis berupa gerakan rotasi. Karena poros turbin dikopel langsung dengan poros generator, energi mekanis tersebut dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui putaran generator. Secara umum, dalam satu siklus PLTU terdapat empat komponen inti: boiler sebagai penghasil uap, turbin untuk mengubah energi uap menjadi energi mekanis, kondensor untuk mengubah uap bekas menjadi air kembali, dan pompa yang berfungsi memompa air hasil kondensasi kembali ke boiler.[3]

2.1.1. Prinsip Kerja PLTU



Gambar 2. Siklus PLTU

(Sumber : <https://www.slideshare.net/slideshow/pembangkit-listrik-tenaga-uap/17764466>)

Pada siklus PLTU, air awalnya dipanaskan di dalam boiler (ketel uap) menggunakan energi panas dari pembakaran bahan bakar. Proses ini menghasilkan uap air yang memiliki tekanan dan temperatur tinggi. Uap ini kemudian dialirkan ke turbin uap, di mana tekanan dan energi kinetiknya dimanfaatkan untuk memutar poros turbin, mengubah energi uap menjadi energi mekanik.

Poros turbin tersebut terhubung langsung atau melalui roda gigi reduksi ke generator listrik yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik yang siap didistribusikan. Setelah melewati turbin, uap dengan tekanan rendah dialirkan ke kondensor, yang berperan untuk mendinginkan dan mengubah uap kembali menjadi air (kondensat).

Air kondensat kemudian ditampung di *hotwell* dan dipompa menggunakan pompa kondensat ke deaerator, yang berfungsi menghilangkan oksigen dalam air demi mencegah korosi pada sistem. Selanjutnya, air umpan hasil deaerasi dipanaskan kembali dan dikembalikan ke boiler, sehingga siklus tertutup ini dapat berulang.[4]

2.1.2. Komponen Utama PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pembangkit yang menggunakan sistem termal dengan empat komponen utama yang saling terhubung, yaitu boiler, turbin uap, kondensor, dan generator. Masing-masing

komponen ini memiliki peran khusus yang secara kolektif mendukung efektivitas dan reliabilitas operasi pembangkit dalam menghasilkan energi listrik.

1. Boiler



Gambar 3. Boiler PLTU PT Bintang Alumina Indonesia
(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

Boiler atau ketel uap merupakan alat yang berbentuk bejana tertutup dengan fungsi utama menghasilkan uap melalui proses pemanasan air menggunakan bahan bakar. Pada proses ini, energi kimia dari bahan bakar diubah menjadi energi panas yang dialirkan ke air di dalam bejana, sehingga terjadi perubahan fasa dari air menjadi uap. Boiler dirancang untuk memaksimalkan transfer panas dari hasil pembakaran. Oleh sebab itu, boiler berperan sebagai mesin konversi energi, mengubah energi potensial (kimia) dalam bahan bakar menjadi energi panas, yang pada akhirnya digunakan untuk menghasilkan kerja di sistem pembangkit.[5]

2. Turbin Uap

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), turbin uap berfungsi sebagai konverter energi primer yang menukar energi potensial uap bertekanan tinggi menjadi energi kinetik pada sudu turbin, selanjutnya dikonversi ke energi mekanik berupa putaran rotor. Rotasi poros turbin kemudian dihubungkan langsung dengan generator atau melalui gearbox

reduksi untuk menyesuaikan kecepatan putar sesuai kebutuhan beban[6], seperti pada PLTU PT Bintan Alumina Indonesia.

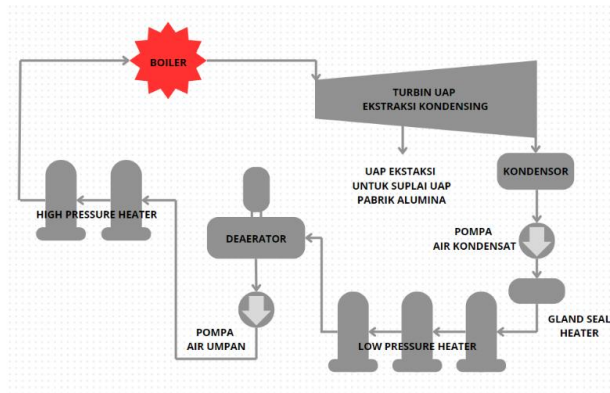


Gambar 4. Turbin uap unit 4 PLTU PT Bintan Alumina Indonesia

(Sumber : dokumentasi pribadi)

Turbin uap tersusun atas dua jenis sudu utama yang bekerja secara berpasangan, yaitu sudu tetap (*stationary blade* atau *nozel*) dan sudu gerak (*moving blade* atau sudu rotor) yang dipasang secara berdekatan di dalam *casing* turbin. Sudu tetap berfungsi sebagai *nozel* yang mempercepat aliran uap hingga mencapai kecepatan tinggi sekaligus menurunkan tekanannya melalui proses ekspansi. Selanjutnya, sudu gerak yang terpasang pada rotor bertugas membelokkan arah aliran uap, sehingga timbul gaya impuls yang memutar poros turbin. Kombinasi antara torsi yang dihasilkan pada poros dan kecepatan putaran turbin inilah yang menghasilkan daya keluaran mekanik untuk menggerakkan generator. [7]

Dalam penerapannya, turbin uap dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis berdasarkan cara pemanfaatan uap buang dan sistem pengelolaan tekanannya[8]. Pada pembangkit listrik tenaga uap, tipe yang paling umum digunakan adalah turbin kondensing karena mampu menghasilkan daya keluaran yang relatif tinggi dengan mengekspansikan uap hingga tekanan sangat rendah di sisi keluaran. Melalui pemanfaatan kondensor, tekanan balik turbin dapat diturunkan mendekati kondisi vakum, sehingga selisih energi antara uap masuk dan uap keluar menjadi besar dan efisiensi siklus termal PLTU meningkat.[9]



Gambar 5. Siklus Turbin Uap Kondensasi

Turbin Kondensasi merupakan turbin uap yang uap keluarannya langsung dialirkan ke kondensor sehingga tekanannya lebih rendah dari tekanan atmosfer. Pada jenis ini, hampir seluruh energi termal uap dimanfaatkan di dalam turbin sebelum dikondensasikan kembali menjadi air, lalu dipompa ke boiler untuk mengulang siklus.[10] Turbin uap kondensasi memiliki beberapa komponen utama sebagai berikut:

1. Turbin uap
Uap panas dari boiler dialirkan ke turbin melalui saluran masuk dan melewati beberapa tingkat sudu. Pada setiap tingkat, uap mengalami ekspansi sehingga melepaskan energi panas dan kinetik yang dimanfaatkan untuk memutar poros turbin. Proses ini berlangsung bertahap dari tekanan tinggi hingga tekanan rendah sehingga energi termal uap dikonversi menjadi energi mekanik putar.[11]
2. Kondensor
Uap keluaran turbin tidak dibuang ke atmosfer, tetapi diarahkan ke kondensor. Di dalam kondensor, uap didinginkan oleh air pendingin (umumnya air laut atau air sungai) dan diubah kembali menjadi air kondensat. Tekanan di dalam kondensor dipertahankan sangat rendah (mendekati vakum) agar penurunan tekanan di turbin menjadi besar sehingga efisiensi siklus meningkat.[11]
3. Pompa kondensat
Air kondensat yang terkumpul di kondensor dipompa oleh pompa kondensat untuk dikembalikan ke boiler atau sistem pemanas awal. Dengan demikian diperoleh siklus tertutup, di mana air yang sudah

dikondensasikan dapat digunakan kembali sebagai air umpan boiler.[11]

4. Sistem vakum

Sistem ini bertugas mempertahankan tekanan rendah di kondensor agar proses ekspansi uap dalam turbin dapat berlangsung optimal. Kondensor umumnya dilengkapi pompa vakum atau ejektor yang berfungsi menyedot udara dan gas non-kondensabel yang masuk ke sistem, sehingga kondisi vakum tetap terjaga dan efisiensi ekspansi uap di turbin tetap tinggi.[12]

5. Sumber air pendingin atau menara pendingin

Air pendingin yang telah menyerap panas dari kondensor harus didinginkan sebelum digunakan kembali. Pada instalasi tertentu digunakan menara pendingin yang memanfaatkan aliran udara ambien untuk menurunkan suhu air. Air yang sudah didinginkan kemudian dipompa kembali menuju kondensor sehingga proses pembuangan panas dapat berlangsung terus-menerus.[11]

3. Generator



Gambar 6. Generator PT PLTU BAI

(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

Generator adalah komponen pembangkit listrik yang berfungsi mengonversi energi mekanis menjadi energi listrik *output*, dengan kecepatan putar rotor yang diselaraskan dengan kecepatan stator. Generator memiliki dua bagian utama, yaitu rotor sebagai bagian yang bergerak, dan stator sebagai bagian yang tetap. Kumparan pada rotor membentuk rangkaian tertutup dari sumber listrik, dan ketika diberikan tegangan arus searah, akan tercipta medan magnet. Perputaran rotor, yang digerakkan oleh mesin penggerak utama (*prime mover*), menyebabkan fluks magnet ini memotong konduktor pada stator, sehingga terjadi induksi tegangan pada kumparan stator dan energi listrik terbentuk.[13]

4. Kondensor

Kondensor adalah alat penukar panas yang dimanfaatkan untuk mengubah uap bekas hasil kerja turbin menjadi air kondensat, selanjutnya air tersebut dikumpulkan di *hotwell* dan dipompa kembali menuju boiler untuk diproses ulang sebagai uap. Proses yang terjadi di kondensor melibatkan perpindahan panas antara uap dan media pendingin. Dalam pembangkit listrik tenaga uap, terdapat beberapa tipe kondensor yang dapat digunakan, namun secara umum diklasifikasikan menjadi dua kategori utama: kondensor kontak langsung (di mana air pendingin dan uap bercampur langsung) dan kondensor permukaan (di mana air pendingin dan uap tidak bercampur langsung tetapi menggunakan pihak ketiga).[14]



Gambar 7. Kondensor PLTU PT BAI

(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

Pada sistem PLTU PT BAI, digunakan kondensor tipe permukaan yang di mana uap panas hasil keluar dari turbin dialirkan melalui pipa hisap menuju jajaran tube pada kondensor. Pada tahap ini, uap panas didinginkan menggunakan air pendingin yang bergerak melalui sisi luar tube. Pendinginan ini menyebabkan perubahan fase uap menjadi air kondensat yang kemudian ditampung dalam *hotwell*. Tingkat air pada *hotwell* harus dijaga agar tidak berlebihan ataupun kurang, sehingga sistem ini dilengkapi dengan pompa kondensat untuk menyalurkan air kondensat menuju tangki deaerator sebagai bagian dari siklus air umpan ke boiler berikutnya.[15]

2.2 Tekanan Sealing

2.2.1. Pengertian Tekanan Sealing

Tekanan sealing merupakan tekanan uap yang dijaga stabil di dalam seal steam header, kemudian didistribusikan ke *gland seal* turbin untuk membentuk barrier fluida yang efektif. Peran utamanya adalah menghalangi kebocoran uap dari area tekanan tinggi (HP) turbin ke atmosfer, sekaligus mencegah infiltrasi udara luar ke zona tekanan rendah (LP) yang terhubung dengan kondensor vakum. Tekanan ini perlu dipertahankan di atas tekanan atmosfer agar uap sealing dapat mengalir keluar, mengisi rongga labirin seal, dan memblokir potensi aliran balik udara maupun uap proses.[16]

2.2.2. Sistem Pengaturan Tekanan Sealing

Pengaturan tekanan sealing turbin dikendalikan secara otomatis melalui *Gland Steam Supply Valve* dan *Spillover/Unloading Valve* yang terintegrasi dengan *seal steam header*. Pada fase *start-up* atau beban rendah, ketika tekanan uap turbin belum mencapai level optimal, *supply valve* membuka untuk menyediakan uap bantu dari boiler ke header, sehingga mempertahankan tekanan sealing pada setpoint standar (umumnya 0,1–0,3 bar gauge).

Saat operasi beban tinggi, kebocoran uap dari sisi HP turbin masuk ke header dan berpotensi menaikkan tekanan; jika melebihi ambang batas (>0,3 bar), *supply valve* menutup sementara *spillover valve* membuka untuk mengalirkan kelebihan uap ke kondensor utama, menjaga kestabilan tekanan header.[16]

2.2.3. Kondisi Tekanan Sealing Normal dan Tidak Normal

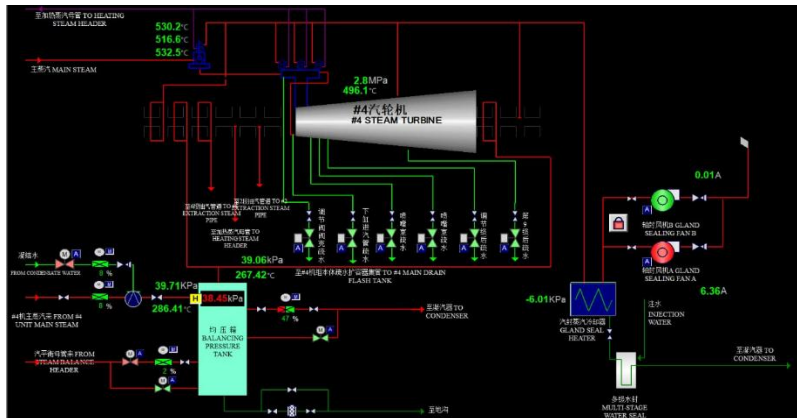
Tekanan sealing turbin uap optimal dipertahankan pada rentang 34–37 kPa absolut (atau 2–5 psig sesuai desain pabrik) untuk menjamin kinerja sistem gland sealing yang andal.

Jika tekanan sealing terlalu rendah di bawah setpoint pada sisi low pressure (LP) vakum, kemampuan menahan perbedaan tekanan dengan atmosfer menurun, sehingga udara luar tersusup ke dalam turbin dan kondensor melalui air ingress. Fenomena ini meningkatkan tekanan kondensor (menurunkan tingkat vakum), membebani pompa vakum air ejektor, serta berpotensi memicu korosi akibat oksigen terlarut yang merusak tube kondensor dalam jangka panjang.

Sebaliknya, tekanan sealing yang berlebih menyebabkan aliran uap ke gland melebihi kapasitas normal, mengakibatkan kebocoran uap ke atmosfer yang memboroskan energi dan air demineralisasi, kontaminasi minyak pelumas di

bearing housing akibat kondensasi uap panas (peningkatan suhu metal bantalan), serta beban tambahan pada *gland steam condenser* yang memengaruhi efisiensi sistem pendingin secara keseluruhan.[16]

2.3. Sistem Sealing Turbin Uap Unit 4 PT Bintang Alumina Indonesia



Gambar 8. Sistem Sealing Turbin Unit 4 PT BAI
(Sumber : DCS Control Room PT BAI)

2.3.1. Pengertian Sistem Sealing

Sistem sealing pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan komponen teknis yang berfungsi menjaga batas antara bagian internal dan eksternal peralatan agar tetap tertutup rapat terhadap fluida maupun gas. Fungsi utamanya adalah mencegah keluarnya fluida kerja dari sistem serta menahan masuknya udara luar ke dalam area yang seharusnya tertutup.[12]

Dalam operasinya, sistem sealing di PLTU bekerja pada berbagai tingkat tekanan, mulai dari tekanan tinggi hingga tekanan sangat rendah atau kondisi vakum. Karena itu, sistem ini harus memiliki ketahanan terhadap perubahan suhu, fluktuasi tekanan, serta kondisi lingkungan yang dapat menyebabkan korosi atau penurunan kualitas material. Apabila sistem sealing mengalami kerusakan, dapat terjadi kebocoran fluida yang berdampak pada perubahan tekanan, penurunan efisiensi termal, bahkan gangguan pada keselamatan operasi pembangkit.[2]

Pada sistem kondensor, sistem sealing memiliki peran yang sangat penting karena peralatan tersebut beroperasi di bawah tekanan atmosfer. Bila fungsi sealing tidak berjalan dengan baik, udara luar dapat masuk ke dalam sistem dan

menimbulkan *air in-leakage*, yang akan menurunkan tingkat kevakuman kondensor serta mengurangi kinerja keseluruhan proses pembangkitan listrik. [17]

2.3.2. Fungsi Sistem Sealing pada PLTU

Sistem sealing pada PLTU memiliki fungsi yang bersifat multidimensional, tidak hanya sebagai penghalang kebocoran, tetapi juga sebagai penunjang performa dan keandalan sistem pembangkitan.

1. Menahan Fluida Proses

Sealing berfungsi untuk memastikan fluida kerja seperti uap, air kondensat, dan gas proses tetap berada di dalam sistem yang dirancang. Kebocoran fluida dapat mengakibatkan kehilangan energi, penurunan efisiensi, serta potensi kerusakan peralatan di sekitar titik kebocoran.

2. Menjaga Tekanan dan Kevakuman Sistem

Pada peralatan yang beroperasi dalam kondisi vakum, sealing berperan menjaga perbedaan tekanan antara bagian dalam sistem dan atmosfer. Kualitas sealing sangat menentukan stabilitas tekanan dan kevakuman, terutama pada kondensor.

3. Mencegah *Air in-leakage*

Masuknya udara luar ke dalam sistem vakum akan meningkatkan kandungan gas non-kondensabel, yang menyebabkan penurunan laju kondensasi uap dan meningkatnya tekanan kondensor.

4. Meningkatkan Efisiensi dan Keandalan Operasi

Sealing yang baik akan menurunkan beban kerja sistem vakum, mengurangi konsumsi energi tambahan, serta memperpanjang umur peralatan.

5. Melindungi Peralatan dari Kerusakan

Kebocoran fluida atau udara dapat mempercepat terjadinya korosi, erosi, dan kontaminasi, sehingga sealing berperan tidak langsung dalam menjaga integritas peralatan PLTU. [18]

2.3.3. Prinsip Kerja Sistem Sealing

Sistem sealing pada turbin uap berfungsi menjaga kestabilan operasi pembangkit, terutama pada bagian poros turbin yang menjadi batas antara area bertekanan dengan lingkungan luar. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan uap sebagai media perapat untuk mencegah kebocoran uap dari dalam turbin dan juga mencegah udara luar masuk ke area yang memiliki tekanan rendah atau vakum. [19]

Pada PLTU, sistem sealing terhubung langsung dengan sistem vakum kondensor dan sistem pendukung lainnya. Jika terjadi gangguan tekanan pada sistem sealing, maka tidak hanya menyebabkan kebocoran di sekitar poros

turbin, tetapi juga menurunkan kualitas kevakuman kondensor yang berpengaruh pada efisiensi keseluruhan siklus turbin.

1. Penyaluran Uap Sealing ke *Balancing Pressure Tank*

Uap sealing berasal dari main steam boiler atau steam header, kemudian dialirkan ke *Balancing Pressure Tank* untuk menstabilkan tekanan dan aliran uap. Tekanan di tangki ini diatur agar cukup untuk menutup celah pada poros turbin tanpa menyebabkan kebocoran uap ke luar. Nilai tekanannya harus tetap lebih tinggi dari area vakum, namun lebih rendah dari tekanan uap utama. [19]

2. Pembentukan Perapat pada Labyrinth Packing

Dari *Balancing Pressure Tank*, uap sealing dialirkan ke *labyrinth packing* yang terpasang di sekitar poros turbin. Bagian ini bekerja dengan memberi hambatan aliran melalui celah sempit, sehingga tekanan uap menurun secara bertahap dan kebocoran dapat dicegah.[19] Uap sealing juga berfungsi sebagai penghalang agar udara luar tidak masuk ke dalam area turbin yang berada dalam kondisi vakum.[20]

3. Pengaliran Uap Sisa ke *Gland seal Heater*

Uap sealing yang telah melewati *labyrinth packing* sebagian masih berupa uap dan dialirkan menuju *gland seal heater*. Di komponen ini, uap didinginkan secara tidak langsung sehingga sebagian terkondensasi menjadi air. Tujuan proses ini adalah untuk memisahkan udara dan mengurangi kandungan uap sebelum dibuang.[20]

Selain itu, *gland seal heater* juga berfungsi sebagai pemisah udara dari campuran uap yang terbawa selama proses sealing agar udara tersebut tidak kembali masuk ke sistem turbin atau kondensor

4. Pembuangan Udara oleh *Gland seal Fan*

Udara hasil pemisahan di *gland seal heater* dihisap oleh *Gland seal Fan* dan dibuang ke atmosfer. Proses ini penting untuk menghindari penumpukan udara non-kondensabel di dalam sistem vakum. Jika udara tidak dikeluarkan dengan baik, maka dapat menurunkan tingkat kevakuman kondensor dan memengaruhi kinerja sistem.[20]

Kinerja *Gland seal Fan* sangat berkaitan dengan efektivitas sealing secara keseluruhan, karena fan ini membantu memastikan bahwa aliran uap sealing tetap bergerak menjauhi area vakum.

5. Operasi Vakum pada *Gland seal Heater*

Gland seal heater dioperasikan dalam kondisi vakum agar aliran uap sealing tetap lancar dan tidak terjadi kondensasi berlebih di sekitar poros turbin. Tekanan rendah ini menjaga perbedaan tekanan yang diperlukan sehingga arah aliran fluida tetap sesuai dengan desain awal. Kondisi vakum juga membantu menjaga kestabilan kerja sistem sealing terhadap perubahan beban turbin.[20]

6. Hubungan Tekanan *Balancing Pressure Tank* dengan Kevakuman Kondensor

Dalam kondisi normal, tekanan pada *Balancing Pressure Tank* dipertahankan antara 17–37 kPa. Tekanan ini cukup untuk menghasilkan sealing yang efektif tanpa menyebabkan kehilangan uap berlebih. Jika tekanan turun di bawah batas tersebut, suplai uap sealing tidak mencukupi sehingga udara luar dapat masuk ke area vakum di belakang turbin.[20]

Masuknya udara ini mengakibatkan kevakuman kondensor menurun dan tekanan cenderung meningkat. Kondisi ini menjadi tanda bahwa sistem sealing tidak bekerja optimal dan dapat menurunkan efisiensi turbin serta memperberat kerja sistem vakum. [21]

2.3.4. Pengaruh Kegagalan Sistem Sealing

Kegagalan sistem sealing pada kondensor dapat menurunkan kualitas kevakuman secara signifikan, karena kondensor beroperasi pada tekanan sangat rendah sehingga kebocoran sekecil apa pun dapat berdampak besar terhadap performa sistem dan menimbulkan berbagai permasalahan operasional[2], yang diantaranya:

1. Masuknya Udara Non-Kondensabel

Kegagalan sistem sealing menyebabkan udara non-kondensabel masuk ke kondensor dan menambah tekanan parsial sehingga menghambat proses perpindahan panas.

2. Penurunan Efisiensi Kondensor

Akumulasi udara membentuk lapisan isolasi pada pipa pendingin yang menurunkan efisiensi perpindahan panas.

3. Tekanan Kondensor Meningkat dan *Back Pressure* Turbin Naik

Tekanan kondensor yang meningkat akibat gas non-kondensabel akan meningkatkan tekanan buang turbin, sehingga turbin menghasilkan kerja yang lebih rendah dan efisiensi siklus menurun.

4. Peningkatan Beban Sistem Vakum

Semakin banyak udara yang masuk, semakin besar kebutuhan tenaga untuk ejector atau *vacuum pump* untuk mempertahankan kevakuman, sehingga konsumsi energi meningkat.

2.4. Pengaruh Tekanan Sealing terhadap Kevakuman Kondensor

2.4.1. Hubungan Tekanan Sealing dan Kebocoran Udara

Tekanan sealing berperan sebagai penghalang fluida (*pressure barrier*) yang memisahkan sisi turbin bertekanan rendah (vakum) dengan atmosfer. Ketika tekanan sealing pada *gland seal* sisi LP turun di bawah batas aman (umumnya

<34 kPa), perbedaan tekanan antara atmosfer dan gland chamber menyebabkan udara luar terhisap masuk (*air in-leakage*) ke dalam turbin dan kondensor.[22] Sebaliknya, jika tekanan sealing dijaga pada set point optimal (34-37 kPa atau 1.05 bar), aliran uap sealing (*sealing steam*) akan mengisi celah labirin dan mengalir sebagian ke atmosfer/vent, sehingga mencegah *ingress* udara. *Unique Systems* menegaskan bahwa "*seal steam pressure controls the direction of leakage*", di mana tekanan positif yang tepat memastikan kebocoran berupa uap keluar, bukan udara masuk. [23]

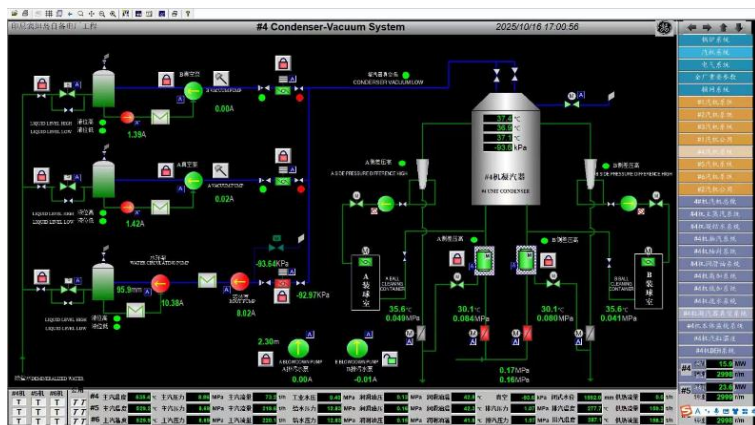
2.4.2. Pengaruh Kebocoran Udara terhadap Kevakuman Kondensor

Udara yang masuk ke kondensor akibat kegagalan sealing bersifat non-kondensabel (NCG). Akumulasi udara ini menurunkan kevakuman kondensor melalui dua mekanisme utama:

Peningkatan Tekanan Parsial: Hukum Dalton menyatakan tekanan total kondensor = tekanan parsial uap + tekanan parsial udara. Bertambahnya massa udara langsung menaikkan tekanan total (vakum turun).

Air Blanketing Effect: Udara membentuk lapisan isolasi pada permukaan tube kondensor, menghambat perpindahan panas kondensasi, sehingga efektivitas pendinginan turun drastis dan tekanan kondensor semakin naik. [24]

2.5. Sistem Kevakuman Kondensor Turbin Uap Unit 4 PT Bintang Alumina Indonesia



Gambar 9. Sistem Vakum Kondensor Unit 4
(Sumber : DCS Control Room PT BAI)

Kevakuman kondensor merupakan salah satu parameter operasi yang sangat berpengaruh terhadap kinerja turbin uap dan efisiensi keseluruhan sistem pembangkitan listrik tenaga uap.[25] Kondisi kevakuman yang optimal memungkinkan proses kondensasi uap buang turbin berlangsung secara efektif, sehingga energi panas dapat dimanfaatkan secara maksimal pada siklus pembangkitan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai konsep, satuan, faktor yang memengaruhi, serta dampak dan pengendalian kevakuman kondensor menjadi hal yang penting dalam pengoperasian PLTU.[26]

2.5.1. Pengertian Kevakuman Kondensor

Kevakuman kondensor didefinisikan sebagai kondisi tekanan di dalam kondensor yang berada di bawah tekanan atmosfer. Dalam sistem PLTU, kevakuman ini terbentuk akibat proses kondensasi uap buang turbin yang berubah menjadi air kondensat setelah melepaskan panasnya kepada media pendingin. Ketika uap mengalami kondensasi, volumenya berkurang secara signifikan, sehingga tekanan di dalam kondensor menurun dan tercipta kondisi vakum.[27]

Kevakuman kondensor memiliki peran penting dalam menurunkan tekanan buang turbin uap. Semakin rendah tekanan pada sisi buang turbin, maka semakin besar rentang ekspansi uap yang terjadi di dalam turbin. Kondisi ini memungkinkan energi panas uap dimanfaatkan secara lebih optimal untuk menghasilkan energi mekanik, yang pada akhirnya meningkatkan daya listrik yang dihasilkan oleh generator.

Secara konseptual, kevakuman kondensor memiliki tujuan utama sebagai berikut:

1. Menurunkan tekanan akhir ekspansi uap pada turbin.
2. Meningkatkan kerja spesifik turbin uap.
3. Memaksimalkan pemanfaatan energi panas uap.
4. Menjaga kestabilan operasi sistem air-uap.[28]

2.5.2. Fungsi Kevakuman pada Kondensor

Kevakuman kondensor berfungsi sebagai pendukung utama kinerja turbin uap dan efisiensi siklus termal. Fungsi-fungsi utama kevakuman kondensor antara lain sebagai berikut:

1. Meningkatkan Rasio Ekspansi Uap

Kevakuman yang tinggi menyebabkan tekanan pada sisi keluaran turbin menjadi sangat rendah. Hal ini memungkinkan uap mengalami ekspansi yang lebih panjang selama melewati sudu-sudu turbin, sehingga energi panas uap dapat dikonversikan menjadi energi mekanik secara lebih maksimal.

2. Meningkatkan Efisiensi Termal Siklus Rankine

Tekanan kondensor yang rendah akan menurunkan temperatur saturasi uap buang. Akibatnya, panas yang terbuang ke lingkungan menjadi lebih kecil dibandingkan energi panas yang dimanfaatkan untuk menghasilkan kerja, sehingga efisiensi termal siklus Rankine meningkat.

3. Meningkatkan Daya Keluaran Turbin

Dengan bertambahnya kerja turbin akibat rentang ekspansi uap yang lebih besar, energi mekanik yang diteruskan ke generator juga meningkat. Kondisi ini berdampak langsung pada peningkatan daya listrik tanpa penambahan konsumsi bahan bakar.

4. Menurunkan Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Kevakuman kondensor yang optimal memungkinkan pembangkit menghasilkan daya listrik yang lebih besar dengan jumlah energi panas yang relatif sama, sehingga konsumsi bahan bakar per satuan energi listrik dapat ditekan. [29]

2.5.3. Prinsip Kerja Kevakuman Kondensor

Prinsip kerja sistem kevakuman kondensor melibatkan penggunaan pompa vakum (seperti pompa cincin cair atau ejektor jet uap) untuk secara terus-menerus mengeluarkan udara dan gas-gas non-kondensasi dari dalam kondensor.

Tujuan utama dari sistem kevakuman ini, terutama dalam konteks Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), adalah untuk mempertahankan tekanan balik turbin serendah mungkin (tekanan vakum tinggi). [26]

Prinsip Kerja :

1. **Kondensasi Uap:** Uap buangan dari turbin uap memasuki kondensor. Di sini, uap didinginkan oleh air pendingin yang mengalir melalui pipa-pipa, menyebabkannya terkondensasi kembali menjadi air (kondensat).
2. **Pembentukan Vakum:** Proses kondensasi ini secara alami mengurangi volume gas secara drastis, yang menciptakan tekanan yang sangat rendah (vakum parsial) di dalam ruang kondensor.
3. **Pengeluaran Gas Non-Kondensasi:** Meskipun sebagian besar uap terkondensasi, ada udara dan gas lain yang masuk ke sistem (misalnya, melalui kebocoran kecil pada seal poros turbin atau kelarutan dalam air pengisi). Gas-gas ini tidak dapat terkondensasi dan akan menumpuk, menyebabkan peningkatan tekanan di dalam kondensor.
4. **Peran Pompa Vakum:** Sistem kevakuman, yang biasanya terdiri dari ejektor uap atau pompa vakum mekanis, terus-menerus menghisap dan mengeluarkan udara serta gas-gas non-kondensasi ini dari bagian atas kondensor.

5. Pemeliharaan Tekanan Rendah: Dengan secara aktif mengeluarkan gas-gas tersebut, pompa vakum memastikan tekanan di dalam kondensor tetap rendah (vakum tinggi).[30]

2.5.4. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kevakuman Kondensor

Tingkat kevakuman kondensor dipengaruhi oleh berbagai parameter operasi yang saling berkaitan, antara lain:

1. Temperatur Air Pendingin

Air pendingin dengan temperatur rendah memiliki kemampuan penyerapan panas yang lebih tinggi, sehingga proses kondensasi uap berlangsung lebih efektif. Sebaliknya, kenaikan temperatur air pendingin akan meningkatkan tekanan kondensor dan menurunkan kevakuman.

2. Laju Aliran Air Pendingin

Aliran air pendingin yang tidak memenuhi standar desain akan menurunkan efektivitas proses pendinginan, sehingga kondensasi tidak berlangsung secara optimal. Penurunan debit air pendingin dapat terjadi akibat kinerja pompa yang tidak normal, adanya penyumbatan pada jalur aliran oleh kotoran atau sampah, maupun karena rendahnya permukaan air laut atau sungai.[31]

3. Beban Turbin

Pada kondisi beban turbin yang tinggi, jumlah uap buang yang masuk ke kondensor meningkat. Jika kapasitas pendinginan tidak sebanding dengan peningkatan tersebut, maka tekanan kondensor akan naik dan kevakuman menurun.

4. Fouling pada Tube Kondensor

Endapan fouling pada permukaan tube meningkatkan tahanan termal sehingga menghambat perpindahan panas dan menurunkan kevakuman kondensor. Fouling umumnya berasal dari kotoran atau sedimen air laut yang mengendap di pipa kondensor. [32]

5. Kebocoran Udara (*Air in-leakage*)

Masuknya udara atau gas non-kondensabel ke dalam kondensor menyebabkan peningkatan tekanan parsial gas di dalam sistem. Gas tersebut menghambat proses kondensasi uap sehingga kevakuman kondensor menurun secara signifikan. Kebocoran udara atau in-leakage menjadi salah satu faktor utama yang menurunkan tingkat kevakuman. Karena kondensor beroperasi pada tekanan di bawah tekanan atmosfer, adanya celah atau kegagalan pada sistem sealing dapat memungkinkan udara luar masuk. Udara yang masuk bersifat non-kondensabel, tidak dapat dikondensasikan, dan akan terakumulasi di dalam kondensor.

Akumulasi gas non-kondensabel tersebut tidak hanya menaikkan tekanan parsial di dalam kondensor, tetapi juga menurunkan efisiensi

perpindahan panas karena terbentuknya lapisan isolasi pada permukaan penukar panas.[33]

2.5.5. Dampak Penurunan Kevakuman Kondensor terhadap Kinerja PLTU

Penurunan kevakuman kondensor dapat menimbulkan dampak negatif terhadap operasi pembangkit, antara lain:

1. **Meningkatnya Tekanan Buang Turbin**

Tekanan kondensor yang lebih tinggi menyebabkan tekanan buang turbin meningkat, sehingga rentang ekspansi uap menjadi lebih pendek dan kerja turbin menurun.[26]

2. **Penurunan Daya Listrik**

Berkurangnya energi mekanik yang dihasilkan turbin menyebabkan daya listrik yang dihasilkan oleh generator ikut menurun.

3. **Penurunan Efisiensi Sistem Pendingin**

Kevakuman yang rendah menunjukkan bahwa proses pelepasan panas di kondensor tidak berlangsung secara optimal, yang dapat berdampak pada peningkatan temperatur kondensat.[2]

4. **Peningkatan Konsumsi Bahan Bakar**

Untuk mempertahankan daya keluaran, diperlukan tambahan energi panas dari pembakaran bahan bakar, sehingga konsumsi bahan bakar per satuan energi listrik meningkat. [2]

2.5.6. Pompa Vakum Pada Kevakuman Kondensor

1. **Pompa Vakum Root**

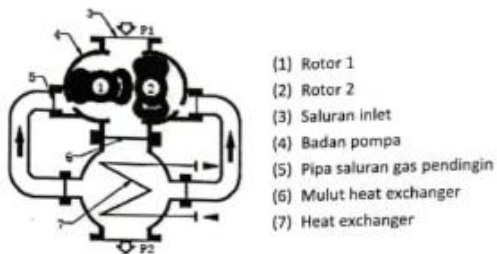
Pompa vakum Roots adalah jenis pompa vakum kering (*dry vacuum pump*) yang menggunakan dua rotor berbentuk angka 8 yang berputar sinkron secara berlawanan di dalam *casing* untuk mengisap dan mengeluarkan gas non-kondensabel dari sistem kondensor



Gambar 10. Pompa Vakum Tipe Root PT BAI

(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

Pompa vakum roots berpendingin gas utamanya terdiri dari badan pompa dan pendingin udara



Gambar 11. Bagian-bagian Pompa Vakum Tipe Root

(Sumber : PT Bintang Alumina Indonesia)

Pompa vakum roots berpendingin gas pada dasarnya terdiri atas badan pompa dan sistem pendingin gas. Di dalam rumah pompa terdapat dua rotor yang berputar berlawanan dalam *casing*, dilengkapi saluran masuk, saluran gas pendingin, serta penukar kalor (*heat exchanger*). Gas proses masuk melalui sisi

hisap, dikompresi di ruang antar-rotor, lalu dialirkan ke sisi buang melalui jalur yang terhubung dengan penukar kalor sehingga gas buang dapat didinginkan sebelum dilepas[34]

Pendingin dan motor penggerak merupakan perlengkapan wajib pada pompa vakum roots tipe berpendingin gas, dengan spesifikasi yang disesuaikan kondisi operasi masing-masing unit. Pompa jenis ini dapat dioperasikan tersendiri atau dikombinasikan secara seri dengan pompa vakum lain, seperti pompa vakum cincin air, untuk mencapai tingkat vakum yang lebih tinggi sesuai kebutuhan proses. Pada unit PLTU PT BAI, pompa vakum roots dihubungkan seri dengan pompa vakum cincin air, sehingga kedua pompa bekerja bersama untuk mempertahankan kevakuman kondensor pada nilai yang diinginkan.

Katup pemecah vakum pada pompa vakum root dipasang di sisi inlet, setelah katup pneumatic yang berfungsi menghilangkan vakum ketika pompa dimatikan. Sebelum pompa vakum root berhenti beroperasi, katup ini harus dibuka terlebih dahulu sehingga tekanan di sisi hisap naik dan sistem tidak lagi berada dalam kondisi vakum. [34]

a. Kelebihan Pompa Vakum Roots:[34]

- Efisiensi energi tinggi: Pompa Roots umumnya lebih hemat energi untuk mencapai tingkat vakum yang dalam dibandingkan pompa vakum cincin air, sehingga lebih ekonomis saat unit turbin beroperasi pada kondisi beban normal dan stabil.
- Laju hisap besar: Mampu mengeluarkan gas dengan kecepatan tinggi, sehingga proses evakuasi ruang dan pemeliharaan kevakuman kondensor dapat berlangsung lebih cepat.
- Konstruksi sederhana: Rancangan pompa relatif simpel dengan jumlah komponen bergerak yang sedikit, sehingga perawatan lebih mudah dan potensi kerusakan mekanik lebih kecil.
- Tanpa media cair: Tidak memerlukan cairan kerja untuk beroperasi, sehingga mengurangi kebutuhan pengelolaan cairan dan menurunkan risiko pencemaran.

b. Kekurangan Pompa Vakum Roots:[34]

- Kurang cocok untuk gas korosif: Tidak direkomendasikan untuk menghisap gas yang korosif atau mengandung uap cair karena dapat mempercepat kerusakan komponen internal.
- Sensitif terhadap partikel padat: Adanya debu atau partikel di dalam gas dapat mengganggu celah kerja rotor dan menurunkan kinerja, bahkan berpotensi menyebabkan aus atau macet.

- Membutuhkan sistem pendinginan: Diperlukan pendinginan tambahan untuk mengendalikan temperatur pompa agar tidak terjadi overheating selama beroperasi pada beban tinggi dan waktu lama.

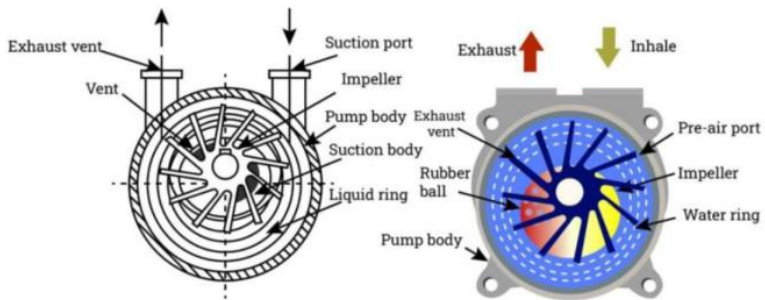
2. Pompa Vakum Cincin Air



Gambar 12. Pompa Vakum Tipe Cincin Air

(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

Pompa vakum cincin air adalah pompa vakum yang menggunakan cairan sebagai media untuk membentuk vakum di dalam rumah pompa. Pada pompa ini, rotor dipasang sedikit eksentrik di dalam *casing* yang telah terisi sebagian air. Saat rotor berputar, bilah-bilahnya melempar air ke dinding *casing* sehingga terbentuk cincin air yang berputar dan menyisakan ruang di antara bilah-bilah rotor. Perubahan volume ruang tersebut selama satu putaran membuat udara atau gas terisap masuk dan terjebak bersama air, lalu terdorong ke saluran buang. Dengan cara ini, tekanan di dalam ruang yang dihisap turun sehingga tercipta kondisi vakum.[34]



Gambar 13. Bagian-bagian Pompa Vakum Tipe Cincin Air

(Sumber : PT Bintang Alumina Indonesia)

Air cincin tidak hanya bertindak sebagai elemen pembentuk vakum, tetapi juga sekaligus berfungsi sebagai pendingin dan penyekat (*seal*) antara bagian yang berputar dengan *casing*. Karena selama operasi air menyerap panas dan bercampur dengan gas, sebagian air panas dialirkan keluar menuju pemisah udara–air, sedangkan air yang lebih dingin disuplai kembali sebagai cairan cincin. Siklus sirkulasi air ini menjaga suhu pompa agar tidak melewati suhu jenuh yang dapat menyebabkan air menguap berlebihan, sehingga pompa tetap mampu menarik dan membuang gas secara kontinu dan efisien. [34]

a. Kelebihan pompa vakum cincin air:[34]

- Mampu menangani gas korosif: Sesuai untuk menghisap gas yang bersifat korosif atau berbahaya karena keberadaan cincin cairan dapat melindungi komponen internal pompa dari kontak langsung dengan gas.
- Pengendalian suhu yang baik: Cairan kerja berperan sebagai media pendingin sehingga suhu operasi pompa lebih terjaga dan risiko terjadinya overheating dapat dikurangi.
- Efektif menghisap uap: Kinerja hisap terhadap uap relatif baik, sementara pada pompa Roots biasanya kurang efisien. Oleh karena itu, pompa ini sering dipakai pada tahap awal pembentukan vakum sebelum turbin dinyalakan.

b. Kekurangan pompa vakum cincin air:[34]

- Efisiensi energi lebih rendah: Konsumsi daya per tingkat vakum umumnya lebih besar dibandingkan pompa Roots untuk kedalaman vakum yang sama.
- Ketergantungan pada cairan: Membutuhkan suplai cairan kontinu serta penanganan limbah cair, sehingga menambah kebutuhan operasi dan biaya perawatan.

- Sistem lebih kompleks: Diperlukan peralatan tambahan seperti pompa sirkulasi dan jalur perpipaan cairan, sehingga konfigurasi instalasinya menjadi lebih rumit.

2.5.7. Standar Tekanan Vakum Kondensor Berdasarkan Spesifikasi Teknis Turbin Uap Unit 4

Bab 2 Prosedur Pengoperasian Unit Utama

1 Spesifikasi dan fitur unit utama

1.1 Spesifikasi teknis turbin uap

1.1.1 Model turbin uap: C30-8.83/1.1

1.1.2 Tipe: turbin uap kondensasi, ekstraksi, rolling, silinder tunggal, bersuhu dan bertekanan tinggi.

1.1.3 Daya kontinu maksimum: 33 MW

1.1.4 Daya rate: 30 MW

1.1.5 Laju aliran uap utama: 175,20 t/jam

1.1.6 Tekanan uap utama: 8,83 MPa

1.1.7 Suhu uap utama: 535°C

1.1.8 Tekanan uap ekstraksi yang bisa diatur: 1,1 MPa

1.1.9 Laju aliran terukur (rate) dari uap ekstraksi yang bisa diatur: 80 t/jam

1.1.10 Suhu terukur (rate) uap ekstraksi yang bisa diatur: 289,6°C

1.1.11 Konsumsi uap rate: 5.839 kg/kWh

1.1.12 Tekanan uap buang: 6,1 kPa

1.1.13 Jumlah level dalam silinder turbin: total 18 level

1.1.14 Panjang efektif dari sudu rotor turbin paling belakang: 450 mm

1.1.15 Kecepatan rate: 3000 r/menit

1.1.16 Kecepatan kritis poros:

Kecepatan kritis orde pertama turbin uap adalah 2160 r/min

Kecepatan kritis orde pertama generator 1816 r/menit

1.1.17 Laju perubahan kecepatan: 3-6%

1.1.18 Laju keterlambatan (delay) : < 0,1%

1.1.19 Metode penyambungan silinder buang dan kondensor: kaku

1.1.20 Arah putaran: searah jarum jam dari turbin uap ke generator

1.1.21 Pabrikan: Shandong Jinan Power Generation Equipment Factory Co., Ltd.

1.2 Parameter termal dari kondisi kerja normal

Gambar 14. Prosedur Pengoperasian Unit Utama PT.BAI

(Sumber : PT.BAI)

Penetapan rentang vakum kondensor operasi normal pada Unit 4 PT Bintang Alumina Indonesia, yaitu -94 hingga -95 kPa, memiliki dasar teori yang jelas dan bukan angka yang ditetapkan secara sepihak oleh operator. Berdasarkan Standar Operasional Prosedur PT Bintang Alumina Indonesia, Bab 2 Prosedur

Pengoperasian Unit Utama, spesifikasi teknis turbin uap Unit 4 (model C30-8.83/1.1, produksi Shandong Jinan Power Generation Equipment Factory Co., Ltd.) menyebutkan bahwa tekanan uap buang turbin yang masuk ke dalam kondensor dirancang sebesar 6,1 kPa absolut. Nilai ini merupakan tekanan hasil rancangan pabrikan yang harus dipertahankan pada sisi keluaran turbin agar unit beroperasi sesuai kondisi optimal yang direncanakan.

Untuk menemukan nilai vakum yang setara dengan tekanan desain tersebut, digunakan perhitungan yang sudah lazim dipakai dalam termodinamika, yaitu tekanan absolut dikurangi tekanan atmosfer: $6,1 \text{ kPa} - 101 \text{ kPa} = -94,9 \text{ kPa}$. Hasil inilah yang menjadi dasar mengapa angka vakum -94 hingga -95 kPa dijaga sebagai standar operasi, karena di titik inilah proses pembuangan hasil konversi energi turbin ke dalam kondensor berlangsung sesuai dengan spesifikasi rancangan pabrikan. Dengan kata lain, menjaga vakum kondensor pada rentang tersebut sama artinya dengan menjaga turbin tetap beroperasi pada kondisi tekanan balik (backpressure) yang telah diperhitungkan sejak awal oleh pabrikan, sehingga rasio ekspansi uap, efisiensi termal siklus, dan daya keluaran turbin dapat tercapai secara maksimal sesuai desain aslinya.

2.6. Distributed Control System (DCS)



Gambar 15. Distributed Control System (DCS)

(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

Distributed Control System (DCS) merupakan sistem pengendalian berbasis komputer yang dirancang untuk mengawasi dan mengatur seluruh proses industri secara terintegrasi, dengan unit kontrol (controller) yang tersebar

secara mandiri di berbagai lokasi. Berbeda dari sistem terpusat, kegagalan satu controller pada DCS hanya memengaruhi area lokal tanpa mengganggu keseluruhan operasi pabrik, sehingga meningkatkan tingkat keandalan dan ketersediaan sistem.[35]

Arsitektur DCS terdiri dari tiga komponen utama:

- *Field Control Station (FCS)* : unit inti yang mengandung modul pengendali (CPU) beserta modul masukan/keluaran (I/O) yang tersambung langsung ke sensor dan aktuator di lapangan. FCS mengeksekusi logika kendali seperti PID dan interlock secara real-time untuk respons cepat terhadap perubahan proses.
- *Operator Station (HIS/HMI)* : komputer di ruang kontrol pusat (*Central Control Room/CCR*) yang menyajikan antarmuka grafis interaktif bagi operator guna memantau parameter proses, menyesuaikan setpoint, serta mengelola alarm secara efektif.[36]
- *Communication Network* : Bus komunikasi data berkecepatan tinggi yang menghubungkan FCS, HIS, dan server engineering untuk pertukaran data yang mulus.

Dalam operasional PLTU, DCS mengintegrasikan kontrol Boiler, Turbine, dan Balance of Plant (termasuk sistem sealing dan vakum kondensor). Semua parameter operasional seperti tekanan sealing dan nilai vakum direkam secara kontinu dalam Historian Server DCS, yang kemudian dapat diakses dalam bentuk tren grafik atau logsheet harian untuk keperluan analisis performa unit. [35]

Sistem DCS pada PT Bintang Alumina Indonesia bekerja secara *real-time*, yaitu mencatat nilai setiap parameter proses secara terus-menerus tiap detik selama unit beroperasi. Dengan mekanisme pencatatan ini, setiap perubahan nilai pada suatu parameter, termasuk penurunan atau kenaikan yang bersifat tajam dan ekstrem (*spike*), akan tetap terekam oleh sistem dan tidak terlewat, karena proses akuisisi data berjalan kontinu tanpa jeda antar-pencatatan. Data yang telah terekam tersebut kemudian dapat ditelusuri kembali melalui fitur *history* atau *trend* yang tersedia pada sistem DCS, sehingga operator maupun peneliti dapat menampilkan kembali seluruh nilai yang berubah-ubah pada rentang waktu tertentu, termasuk momen-momen ketika terjadi fluktuasi tajam sekalipun berlangsung dalam durasi yang sangat singkat. Dengan demikian, potensi hilangnya data akibat *spike* yang tidak terekam sebagaimana umum terjadi pada sistem pencatatan manual atau logsheet berinterval tetap, dapat diminimalkan pada sistem DCS ini karena sifat pencatatannya yang kontinu dan real-time. Jika terjadi lonjakan nilai yang tajam melewati nilai standar operasional, alarm akan memberikan tanda dari proteksi yang dimiliki oleh sistem dari perusahaan

2.7. Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai sistem sealing dan pengaruhnya terhadap kinerja pembangkit telah banyak dilakukan, khususnya pada sistem turbin uap dan peralatan pendukung yang beroperasi pada kondisi tekanan rendah maupun vakum. Salah satu aspek yang sering dibahas adalah keterkaitan antara sistem sealing dengan kestabilan tekanan, efisiensi termal, serta keandalan operasi unit pembangkit.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Judul & Penulis	Tahun	Pembahasan	Research Gap
1	Analisis Pengaruh Perubahan Tekanan Vakum Kondensor terhadap Efisiensi Heat Rate Turbin Uap PLTU Ketapang A. Laksono et al.	2020	Korelasi tekanan vakum kondensor terhadap efisiensi turbin dan heat rate menggunakan data DCS[16]	Fokus utama pada hubungan vakum-efisiensi; tidak menganalisis pengaruh tekanan sealing turbin sebagai variabel independen terhadap degradasi kevakuman kondensor
2	Analisis Pengaruh Perubahan Tekanan Vakum Kondensor terhadap Efisiensi PLTU Kendari-3 Unit 2 S. Saputro	2022	Efek overhaul terhadap peningkatan vakum kondensor (15 mmHg) dan efisiensi termal[2]	Pendekatan maintenance/overhaul; tidak membahas faktor operasional tekanan sealing atau data spesifik Unit 4 PT Bintan Alumina Indonesia
3	Analisa Penyebab Penurunan Performa Vakum Kondensor PLTU Belawan 65 MW F. F. Fadhillah	2017	Root cause analysis: fouling tube + CW temp + <i>air leakage (gland seal</i> disebut sekilas)[37]	Pendekatan kualitatif tanpa korelasi statistik kuantitatif tekanan sealing vs vakum; bukan PT Bintan Alumina Indonesia

4	Sistem Sealing pada Turbin Uap (Dokumen teknis PLTU Indonesia)[38]	2015	Deskripsi sistem <i>gland seal</i> LP → leak-off steam ke kondensor[38]	Hanya deskripsi sistem; tidak ada analisis empiris pengaruh variasi tekanan sealing terhadap performa vakum kondensor
5	Studi Kasus Penyebab Penurunan Tekanan Seal Air Fan PLTU A. S. Putra	2024	Kebocoran seal pada air fan (bukan turbin) → penurunan tekanan[39]	Fokus seal air fan bukan <i>gland seal</i> turbin; tidak terkait kevakuman kondensor

Oleh karena itu, penelitian tugas akhir ini dilakukan untuk melengkapi dan memperluas kajian sebelumnya dengan memfokuskan pembahasan pada sistem sealing secara umum, bukan hanya pada satu jenis komponen. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai peran sistem sealing dalam menjaga kevakuman kondensor serta dampaknya terhadap kinerja operasional PLTU, khususnya pada sistem sirkulasi tertutup di PLTU PT Bintang Alumina Indonesia.

Bab 3. Metodologi Penelitian (*D4)

3.1. Desain Penelitian

Desain penelitian pada tugas akhir ini disusun untuk menggambarkan tahapan pelaksanaan penelitian secara menyeluruh, yang memuat penjelasan mengenai metode penelitian, lokasi dan waktu dilaksanakannya penelitian, serta diagram alir yang menggambarkan urutan kegiatan.

3.1.1. Metode Penelitian

Berdasarkan permasalahan dan tujuan pada bab 1, maka penelitian tugas akhir ini menggunakan penelitian kuantitatif. Penelitian kuantitatif dilakukan dengan cara mengumpulkan data berdasarkan hasil pengukuran yang dapat dinyatakan dalam bentuk angka, kemudian diolah dan diselesaikan melalui perhitungan matematis dan analisis statistik.

3.1.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT Bintan Alumina Indonesia, tepatnya pada Turbin Uap Unit 4 yang berlokasi di Gn. Kijang, Kabupaten Bintan, Provinsi Kepulauan Riau. Penelitian ini dilaksanakan dari 1 September hingga 30 November.



Gambar 16. Map PLTU PT BAI

(Sumber : Goggle Maps)

3.2. Metode Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa metode untuk mendukung proses pengumpulan data, yaitu sebagai berikut :

3.2.1 Studi Literatur

Pada tahap ini, peneliti melakukan pengumpulan data dengan mencari berbagai sumber yang membahas tekanan sealing, kondisi vakum kondensor pada turbin uap. Bahan rujukan diperoleh dari manual operasi PT BAI dan artikel ilmiah yang relevan dengan topik penelitian. Studi literatur ini dimaksudkan untuk membangun dasar teori yang kuat dan menjadi acuan dalam proses pengolahan data penelitian.

3.2.3 Pengumpulan Data

Setelah dipastikan bahwa data yang dibutuhkan tersedia dan dapat diakses, tahap berikutnya adalah pengambilan data operasi pada turbin uap yang menjadi objek penelitian di PLTU PT Bintan Alumina Indonesia.

Pengumpulan data dilakukan melalui *Distributed Control System* (DCS) yang terpasang di control room. Parameter utama yang akan diamati meliputi tekanan sealing turbin, vakum kondensor, dan parameter-parameter pendukung lainnya yang nantinya akan digunakan untuk menganalisis pengaruh tekanan sealing turbin terhadap kinerja vakum kondensor pada turbin uap.

Pengambilan data akan dilakukan selama periode empat bulan, yaitu Agustus, September, Oktober, dan November, dengan frekuensi mingguan. Adapun pada setiap minggu, data akan dicatat berdasarkan nilai rata-rata tertinggi dan terendah dari masing-masing parameter yang diamati.

Tabel 2. Data Nilai Rata-rata Tertinggi

Period	Beban Turbin (MW) Maks	Sealing (kPa) Maks	Vakum Kondensor (kPa) Maks	Pompa Vakum (A) Maks
Agustus				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
September				

Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
Oktober				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
November				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				

Tabel 3. Data Nilai Rata-rata Terendah

Period	Beban Turbin (MW) Min	Sealing (kPa) Min	Vakum Kondensor (kPa) Min	Pompa Vakum (A) Min
Agustus				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
September				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
Oktober				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
November				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				

Tabel 4. Spesifikasi Turbin Uap Unit 4

Kategori	Satuan	Data
Model	/	C30-8,83/1,1
Nilai daya	MW	30
Nilai Tekanan Masuk	Mpa	8,83
Nilai Tekanan Ekstraksi	Mpa	1,1
Nilai Kecepatan	r/min	3000
Nilai Temperatur Masuk	°C	535
Nilai Laju Uap Ekstraksi	t/h	80

Tabel 5. Spesifikasi Kondensor Unit 4

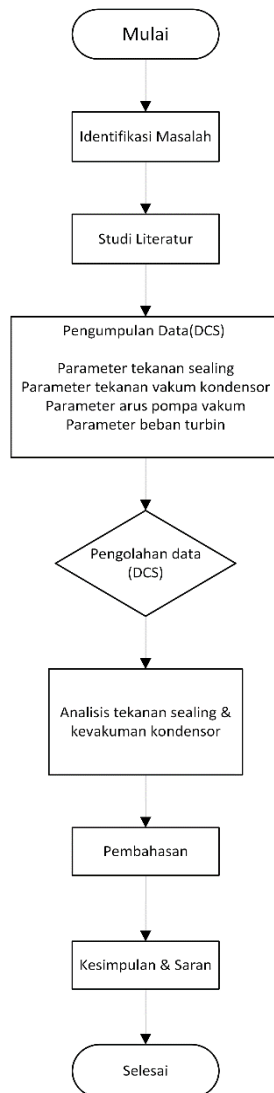
Kategori	Satuan	Data
Model	/	N2500A
Jenis	/	2500
Area pendinginan	m ²	30
Suhu air pendingin	°C	30
Tekanan desain sisi air	MPa	0,35
Debit air pendingin	t/h	6851
Tekanan sisi uap	kPa	7,6
Jumlah pipa air pendingin	buah	4398
Diameter pipa air pendingin	mm	Φ22×0,7 (Zona kondensasi) Φ22×0,5 (Area pendinginan udara)
Material pipa air pendingin	/	TA1
Hambatan total air pada kondensor	mH ₂ O	≤6,0
Pabrikan	Shandong Jinan Pabrik Co, Ltd.	

Tabel 6. Spesifikasi Pompa Vakum

Item	Pompa Vakum Root	Pompa Cincin Air
Model	ZIL-300	2BW6E103-OEK4
Kecepatan putaran(r/min)	2950	1450
Tekanan hisap minimum inlet pompa (kPa)	1,7	
Kapasitas pemvakuman set pompa(kg/jam)	15,5	
Efisiensi (%)	33	
Jenis penukar panas	Tipe tabung	

Area penukaran panas (m ²)	8/8	
Suhu air pendingin penukar panas (°C)	28-33	
Kuantitas (unit)	1	1
Pabrikan pompa	Jiangyin Tiantian Vacuum Equipment Manufacturing Co, Ltd.	Wuhan Wellong Pump Industry Co., Ltd.
Model motor	YE3 160M1-2 TH	YE3 160M1-4 TH
Tegangan listrik (V)	380	380
Arus listrik (A)	20,6	21,5
Daya (kW)	11	11
Kecepatan putaran motor (r/min)	2950	1470
Pabrikan motor	Anhui Wannan Electric Motor Co., Ltd.	

3.1.3 Diagram Alir



Gambar 17. Diagram Alir

Diagram alir pada Gambar menjelaskan urutan tahapan penelitian yang dilakukan dalam penyusunan tugas akhir ini. Proses penelitian diawali dengan kegiatan identifikasi masalah dan studi literatur untuk merumuskan fokus serta landasan teori yang relevan. Selanjutnya, peneliti pengumpulan data yang mencakup parameter tekanan sealing, vakum kondensor, serta variabel operasional turbin. Setelah data dinyatakan lengkap dan layak diolah, dilakukan analisis kuantitatif dan pembahasan hasil yang kemudian mengantarkan pada penarikan kesimpulan serta penyusunan saran sebagai akhir dari rangkaian penelitian.

3.3. Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan besaran yang dapat berubah dan memberikan pengaruh terhadap hasil suatu penelitian, sehingga dapat menguraikan dan menganalisis masalah yang dikaji. Variabel penelitian dalam Tugas Akhir ini terdiri dari variabel independen yaitu tekanan sealing turbin (tekanan sealing pada *Balancing Pressure Tank* dalam satuan kPa) yang tercatat di layar DCS control room PLTU PT BAI sebagai faktor pemicu utama berdasarkan data operasi, variabel dependen yaitu tekanan vakum kondensor (-kPa, rentang -94 hingga -95 kPa) dan arus pompa vakum (A) yang secara langsung terpengaruh oleh perubahan tekanan sealing, serta variabel kontrol yaitu beban turbin yang dijaga konstan di rentang 14-15 MW agar hubungan sebab-akibat antara variabel independen dan dependen tetap jelas tanpa gangguan faktor eksternal.

3.4. Metode Analisis Data

Metode analisis data digunakan untuk mengetahui hubungan dan pengaruh tekanan sealing terhadap tingkat kevakuman kondensor pada sistem turbin uap di PLTU PT Bintan Alumina Indonesia. Data yang telah diperoleh dari hasil pengukuran dan data historis selanjutnya diolah secara kuantitatif untuk menghasilkan kesimpulan yang bersifat objektif dan terukur

3.4.1. Pengolahan Data Awal

Data tekanan sealing dan vakum kondensor yang diperoleh dari sistem kontrol dan logsheet operasi terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan kelengkapan dan konsistensi data. Selanjutnya, data diseragamkan satuannya agar memudahkan proses analisis, misalnya tekanan sealing dalam satuan kPa dan vakum kondensor dalam satuan mmHg atau kPa absolut. Data yang tidak representatif akibat gangguan operasi atau kondisi abnormal tidak disertakan dalam analisis untuk menjaga keakuratan hasil penelitian. Pengolahan data dilakukan terhadap hasil pengukuran dari logsheet operasi turbin uap Unit 4

PLTU PT Bintang Alumina Indonesia, yang mencakup tiga parameter utama yaitu tekanan sealing turbin, tekanan vakum kondensor, dan arus listrik pompa vakum. Proses ini bertujuan untuk mereduksi fluktuasi data harian yang disebabkan oleh variasi operasi sementara, serta memperoleh nilai representatif yang mencerminkan kondisi operasi unit secara umum.

Pengolahan data menggunakan metode perhitungan nilai rata-rata (*mean*) dari seluruh data pengamatan pada periode tertentu, sehingga menghasilkan parameter tunggal yang stabil untuk setiap kondisi pengujian. Pendekatan ini meminimalkan pengaruh noise operasional harian seperti perubahan setting operator atau gangguan sementara, sekaligus memudahkan analisis tren hubungan antar variabel.

3.4.2. Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengetahui hubungan antara variabel independen dan variabel dependen. Metode analisis yang digunakan yaitu analisis korelasi.

Analisis korelasi digunakan untuk mengetahui tingkat hubungan antara tekanan sealing dan vakum kondensor. Nilai koefisien korelasi (*r*) menunjukkan kekuatan dan arah hubungan antarvariabel. Nilai korelasi positif menunjukkan bahwa peningkatan tekanan sealing diikuti oleh peningkatan nilai tekanan di kondensor (penurunan vakum), sedangkan nilai korelasi negatif menunjukkan bahwa peningkatan tekanan sealing menyebabkan penurunan tekanan di kondensor (vakum meningkat).

3.4.3. Penggunaan Software

Proses pengolahan dan analisis data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak pengolahan data seperti Microsoft Excel atau software statistik lainnya. Software ini digunakan untuk melakukan perhitungan korelasi, serta penyajian data dalam bentuk tabel dan grafik guna mempermudah analisis dan interpretasi hasil.

3.5. Metode Pengolahan data

Setelah data-data yang diperlukan diperoleh data akan diolah untuk menyelesaikan penelitian ini dengan menghitung nilai rata-rata dari masing-masing kondisi, baik dalam bentuk nilai tertinggi dan terendah dalam setiap periode pengambilan data dengan langkah berikut:

3.5.1. Perhitungan Rata-Rata (Mean)

Nilai rata-rata setiap parameter dihitung menggunakan rumus berikut[40]:

$$Mean = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

di mana :

x_i : nilai sealing dalam data

n : jumlah total nilai sealing dalam data

3.5.2. Koefisien Korelasi Pearson (r)

Untuk mengetahui kekuatan dan arah hubungan linier antara tekanan sealing (x) dengan vakum kondensor (y), digunakan rumus koefisien korelasi Pearson[41]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

di mana:

r = koefisien korelasi Pearson ($-1 \leq r \leq 1$)

x_i = nilai tekanan sealing pengamatan ke-i (kPa)

y_i = nilai vakum kondensor pengamatan ke-i (kPa)

n = jumlah pasangan data

3.5.2. Persamaan Regresi Linear Sederhana

Untuk memperoleh model prediktif hubungan tekanan sealing terhadap vakum kondensor, digunakan persamaan regresi linear sederhana[42]:

$$\hat{y} = a + bx \quad (3)$$

Dengan koefisien kemiringan (slope) dan intersep dihitung sebagai berikut:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$a = \bar{y}b \cdot \bar{x} \quad (5)$$

di mana:

$\hat{y}$ = nilai dugaan vakum kondensor (kPa)

a = intersep regresi

b = kemiringan (slope) garis regresi

x = tekanan sealing (kPa)

$\bar{x}, \bar{y}$ = rata-rata variabel x dan y

3.5.3. Koefisien Determinasi (R^2)

Koefisien determinasi digunakan untuk mengukur seberapa besar variasi vakum kondensor (y) dapat dijelaskan oleh variasi tekanan sealing (x)[43]:

$$R^2 = r^2 \quad (6)$$

Nilai R^2 berkisar antara 0 dan 1; semakin mendekati 1, semakin besar proporsi variasi y yang dapat dijelaskan oleh x.

3.5.4. Interpretasi Data

Hasil analisis data diinterpretasikan dengan mengaitkan nilai statistik yang diperoleh terhadap kondisi operasi PLTU. Apabila hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan tekanan sealing menyebabkan penurunan tingkat kevakuman kondensor, maka dapat disimpulkan bahwa tekanan sealing berpengaruh terhadap kinerja sistem kondensasi. Penurunan kevakuman ini berpotensi meningkatkan tekanan buang turbin, yang selanjutnya dapat menurunkan efisiensi turbin uap.

Tabel 7. Interpretasi Data

Nilai $ r $	Interpretasi
0,00 – 0,19	Sangat lemah / hampir tidak ada korelasi
0,20 – 0,39	Korelasi lemah
0,40 – 0,69	Korelasi sedang
0,70 – 0,89	Korelasi kuat
0,90 – 1,00	Korelasi sangat kuat

Tabel interpretasi ini bersumber dari Guilford (1956) yang digunakan secara luas dalam penelitian bidang teknik dan sains. Dampak dari nilai interpretasi terhadap penelitian ini adalah: Apabila hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan tekanan sealing diikuti oleh peningkatan kedalaman vakum kondensor (r negatif kuat), maka dapat disimpulkan bahwa tekanan sealing berpengaruh signifikan terhadap kinerja sistem kondensasi. Penurunan kevakuman berpotensi meningkatkan tekanan buang turbin dan menurunkan efisiensi turbin uap. Selain itu, hasil analisis juga dibandingkan dengan teori dan referensi yang relevan untuk memastikan kesesuaian antara hasil penelitian dan konsep termodinamika sistem PLTU.

Adapun pengaruh dari nilai korelasi sebagai berikut:

1. 0,00–0,19 Sangat Lemah : Tekanan sealing hampir tidak berpengaruh terhadap vakum. Artinya faktor lain (suhu CW, fouling) yang dominan. Tidak perlu intervensi sealing.
2. 0,20–0,39 Lemah : Sealing sedikit berpengaruh tapi tidak signifikan. Rekomendasi setpoint sealing tidak bisa diandalkan.
3. 0,40–0,69 Sedang : Sealing cukup berpengaruh namun banyak faktor lain yang juga bermain. Setpoint perlu dipadukan dengan monitoring parameter lain.
4. 0,70–0,89 Kuat : Sealing berpengaruh kuat dan nyata terhadap vakum.
5. 0,90–1,00 Sangat Kuat Vakum hampir sepenuhnya dikendalikan oleh sealing. Jarang terjadi di kondisi industri nyata karena selalu ada faktor lain.

Adapun untuk mempermudah proses pengolahan data serta meminimalisir kesalahan dalam proses perhitungan, seluruh data akan diolah menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel.

Tabel 8. Pengolahan Data Nilai Tertinggi di Microsoft Excel

Data Tertinggi				
Period	Beban Turbin (MW)	Sealing (kPa) Max	Vakum Kondensor (kPa) Max	Pompa Vakum (A) Max
Agustus				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
September				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
Oktober				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
November				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
Rata -Rata	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	

Tabel 9. Pengolahan Data Nilai Terendah di Microsoft Excel

Data terendah				
Period	Beban Turbin (MW)	Sealing (kPa) Min	Vakum Kondensor (kPa) Min	Pompa Vakum (A) Min
Agustus				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
September				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
Oktober				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
November				
Minggu ke-1				
Minggu ke-2				
Minggu ke-3				
Minggu ke-4				
Rata – Rata	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	

Penentuan nilai tertinggi dan terendah dilakukan melalui dua tahapan. Pertama, data mentah diperoleh dari Historian Server DCS yang merekam seluruh nilai parameter setiap detik selama 24 jam dalam satu hari. Kedua, dari keseluruhan data harian dalam satu minggu, dipilih satu nilai yang paling tinggi (maksimum) untuk mewakili kelompok data MAX, dan satu nilai paling rendah (minimum) untuk mewakili kelompok data MIN. Pemilihan ini dilakukan dengan fungsi MAX() dan MIN() pada Microsoft Excel setelah data DCS diekspor dalam format .csv. Nilai tertinggi dipilih bukan berarti hanya satu titik data ekstrem, melainkan nilai rata-rata tertinggi yang representatif dari kondisi operasi puncak selama satu minggu, dengan memastikan bahwa nilai tersebut bukan berasal dari kondisi abnormal atau gangguan sementara.

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

Bab ini menyajikan data hasil penelitian yang telah diperoleh selama periode pengamatan, beserta pembahasan analisis yang dilakukan untuk menjawab rumusan masalah penelitian. Data yang disajikan merupakan hasil pengolahan parameter operasional turbin uap Unit 4 PT Bintang Alumina Indonesia.

4.1. Data Hasil Penelitian

Tabel 10 menyajikan data nilai tertinggi (maksimum) dari empat parameter operasional turbin uap Unit 4 yang direkam setiap minggu selama 16 minggu periode Agustus hingga November 2025. Kolom Beban Turbin (MW) menunjukkan daya keluaran turbin yang dijaga konstan pada rentang 14–15 MW sebagai variabel kontrol. Kolom Sealing Max (kPa) menunjukkan nilai puncak tekanan sealing dalam satu minggu, yang berkisar antara 37,23 hingga 41,96 kPa. Kolom Vakum Kondensor (kPa) menunjukkan nilai vakum yang bersesuaian, berkisar -94,69 hingga -95,40 kPa. Kolom Pompa Vakum (A) menunjukkan arus listrik pompa yang berkisar 7,51 hingga 7,89 Ampere. Dari tabel ini terlihat pola: saat sealing tinggi, vakum cenderung lebih dalam dan arus pompa lebih rendah.

Tabel 10. Data Tertinggi

Period	Beban Turbin (MW)	Sealing (kPa) Max	Vakum Kondensor (kPa)	Pompa Vakum (A)
Agustus				
Minggu ke-1	14,96	39,44	-94,98	7,74
Minggu ke-2	14,94	39,67	-95,07	7,58
Minggu ke-3	14,95	40,66	-95,29	7,81
Minggu ke-4	14,85	41,96	-95,3	7,82
September				
Minggu ke-1	14,99	41,65	-95,16	7,79
Minggu ke-2	14,88	37,38	-95,39	7,74
Minggu ke-3	14,92	39,09	-95,4	7,73
Minggu ke-4	14,95	40,2	-95,03	7,61
Oktober				

Minggu ke-1	14,7	38,14	-95,24	7,66
Minggu ke-2	14,96	37,61	-95,01	7,57
Minggu ke-3	14,93	39,98	-94,69	7,51
Minggu ke-4	15	37,31	-94,98	7,55
November				
Minggu ke-1	14,84	38,13	-94,9	7,61
Minggu ke-2	15	38,53	-95,31	7,84
Minggu ke-3	15	37,23	-95,32	7,8
Minggu ke-4	14,96	38,3	-95,06	7,89

Tabel 11 menyajikan data nilai terendah (minimum) dari parameter yang sama. Nilai Sealing Min berkisar antara 33,84 hingga 36,16 kPa — jauh lebih rendah dibanding kelompok MAX. Akibatnya vakum kondensor hanya mencapai -92,49 hingga -93,76 kPa — lebih lemah dibanding kelompok MAX. Yang signifikan adalah nilai arus pompa vakum yang jauh lebih tinggi, berkisar 8,82 hingga 11,12 Ampere. Hal ini membuktikan bahwa saat sealing rendah, pompa vakum harus bekerja jauh lebih keras untuk mempertahankan kondisi vakum, yang mengindikasikan adanya udara non-kondensabel yang masuk ke dalam kondensor akibat sealing tidak optimal

Tabel 11. Data Terendah

Period	Beban Turbin (MW)	Sealing (kPa) Min	Vakum Kondensor (kPa)	Pompa Vakum (A)
Agustus				
Minggu ke-1	14,04	34,15	-92,95	10,59
Minggu ke-2	14	33,84	-93,32	10,57
Minggu ke-3	14,04	34,64	-93,04	10,67
Minggu ke-4	14,05	34,64	-92,72	10,74
September				
Minggu ke-1	14,05	34,41	-93,27	10,59
Minggu ke-2	14	35,09	-92,66	11,12
Minggu ke-3	14,05	35,4	-93,41	9,51
Minggu ke-4	14,07	35,09	-92,49	10,96

Oktober				
Minggu ke-1	14,05	35,86	-93,6	8,82
Minggu ke-2	14,05	35,4	-93,1	9,88
Minggu ke-3	14,07	36,16	-92,79	9,33
Minggu ke-4	14,08	36,08	-93,48	8,84
November				
Minggu ke-1	14,08	36,08	-93,26	9,4
Minggu ke-2	14,04	35,7	-93,76	9,6
Minggu ke-3	14,05	36	-93,62	10,1
Minggu ke-4	14,06	35,7	-93,26	9,99

4.2. Pembahasan

4.2.1. Pengolahan Data Penelitian Menggunakan Microsoft Excel

Setelah data diperoleh, dilakukan pengolahan menggunakan Microsoft Excel dengan menerapkan rumus-rumus yang telah dijelaskan pada Bab 3. Rumus mean digunakan untuk menghitung nilai rata-rata setiap parameter pada masing-masing kategori data

Tabel 12. Hasil Data Tertinggi

Period	Beban Turbin (MW)	Sealing (kPa) Max	Vakum Kondensor (kPa)	Pompa Vakum (A)
Agustus				
Minggu ke-1	14,96	39,44	-94,98	7,74
Minggu ke-2	14,94	39,67	-95,07	7,58
Minggu ke-3	14,95	40,66	-95,29	7,81
Minggu ke-4	14,85	41,96	-95,3	7,82
September				
Minggu ke-1	14,99	41,65	-95,16	7,79
Minggu ke-2	14,88	37,38	-95,39	7,74
Minggu ke-3	14,92	39,09	-95,4	7,73
Minggu ke-4	14,95	40,2	-95,03	7,61

Oktober				
Minggu ke-1	14,7	38,14	-95,24	7,66
Minggu ke-2	14,96	37,61	-95,01	7,57
Minggu ke-3	14,93	39,98	-94,69	7,51
Minggu ke-4	15	37,31	-94,98	7,55
November				
Minggu ke-1	14,84	38,13	-94,9	7,61
Minggu ke-2	15	38,53	-95,31	7,84
Minggu ke-3	15	37,23	-95,32	7,8
Minggu ke-4	14,96	38,3	-95,06	7,89
Rata -Rata	14,927	39,08	-95,133	7,703125

Tabel 13. Hasil Data Terendah

Period	Beban Turbin (MW)	Sealing (kPa) Min	Vakum Kondensor (kPa)	Pompa Vakum (A)
Agustus				
Minggu ke-1	14,04	34,15	-92,95	10,59
Minggu ke-2	14	33,84	-93,32	10,57
Minggu ke-3	14,04	34,64	-93,04	10,67
Minggu ke-4	14,05	34,64	-92,72	10,74
September				
Minggu ke-1	14,05	34,41	-93,27	10,59
Minggu ke-2	14	35,09	-92,66	11,12
Minggu ke-3	14,05	35,4	-93,41	9,51
Minggu ke-4	14,07	35,09	-92,49	10,96
Oktober				
Minggu ke-1	14,05	35,86	-93,6	8,82
Minggu ke-2	14,05	35,4	-93,1	9,88
Minggu ke-3	14,07	36,16	-92,79	9,33

Minggu ke-4	14,08	36,08	-93,48	8,84
November				
Minggu ke-1	14,08	36,08	-93,26	9,4
Minggu ke-2	14,04	35,7	-93,76	9,6
Minggu ke-3	14,05	36	-93,62	10,1
Minggu ke-4	14,06	35,7	-93,26	9,99
Rata – Rata	14,04875	35,246	-93,171	10,044375

4.3. Hasil Analisis

4.3.1. Hubungan Tekanan Sealing Turbin terhadap Kevakuman Kondensor

Untuk menjawab tujuan penelitian pertama, dilakukan analisis korelasi Pearson dan regresi linear sederhana terhadap data gabungan (16 dari nilai tertinggi dan 16 dari nilai terendah) dengan variabel x = tekanan sealing dan y = vakum kondensor.

Tabel 14. Nilai Perhitungan

Komponen	Gabungan
n	32
$\sum x_i$	1.189,52
$\sum y_i$	-3.012,86
$\sum x_i y_i$	-112.056,79
$\sum x_i^2$	44.376,39
$\sum y_i^2$	283.699,91
$\bar{x}$	37,1725
$\bar{y}$	-94,1519

Berikut merupakan penjelasan mengenai tabel nilai perhitungan diatas:

1. $n = 32$: jumlah total pasang data, terdiri dari 16 data nilai tertinggi (Tabel 10) + 16 data nilai terendah (Tabel 11).
2. $\sum x_i = 1.189,52$: jumlah seluruh nilai tekanan sealing dari 32 data. Diperoleh dengan menjumlahkan semua nilai kolom Sealing (kPa) dari Tabel 10 dan Tabel 11.
3. $\sum y_i = -3.012,10$: jumlah seluruh nilai vakum kondensor dari 32 data. Bernilai negatif karena vakum kondensor memang bertanda negatif.

4. $\Sigma x_i y_i = -112.056,79$: jumlah hasil perkalian setiap pasang data sealing $\times$ vakum. Dihitung dengan mengalikan nilai sealing dan vakum pada baris yang sama untuk setiap 32 data, lalu dijumlahkan.
5. $\Sigma x_i^2 = 44.376,39$: jumlah kuadrat seluruh nilai tekanan sealing. Dihitung dengan mengkuadratkan setiap nilai sealing lalu dijumlahkan.
6. $\Sigma y_i^2 = 283.699,91$: jumlah kuadrat seluruh nilai vakum kondensor.
7. $\bar{x} = 37,1725$: rata-rata tekanan sealing gabungan = $\Sigma x_i / n = 1.189,52 / 32$.
8. $\bar{y} = -94,1519$: rata-rata vakum kondensor gabungan = $\Sigma y_i / n = -3.012,10 / 32$.

- **Perhitungan korelasi person**

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (1)$$

- Numerator (Pembilang) :

$$\begin{aligned} &= 32 \times -112.056,79 \\ &= 1.189,52 \times -3.012,86 \\ &= -3.585.817,15 - (-3.583.857,23) = -1.959,92 \end{aligned}$$

- Denominator (Penyebut) :

$$\begin{aligned} &= 32 \times 44.376,39 = 1.420.044,58 \\ &= (1.189,52)^2 = 1.414.957,83 \\ &= 1.420.044,58 - 1.414.957,83 = 5.086,75 \\ &= 32 \times 283.699,91 = 9.078.397,04 \\ &= (-3.012,86)^2 = 9.077.325,38 \\ &= 9.078.397,04 - 9.077.325,38 = 1.071,66 \\ &= \sqrt{5.086,75 \times 1.071,66} = 2.334,80 \end{aligned}$$

$$r = -1.959,92 / 2.334,80 = -0.8395$$

- **Perhitungan persamaan regresi linear**

$$\hat{y} = a + bx \quad (3)$$

- Koefisien kemiringan (slope) b:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
&= 32 \times -112.056,79 \\
&= 1.189,52 \times -3.012,86 \\
&= -3.585.817,15 - (-3.583.857,23) = -\mathbf{1.959,92}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 32 \times 44.376,39 = 1.420.044,58 \\
&= (1.189,52)^2 = 1.414.957,83 \\
&= 1.420.044,58 - 1.414.957,83 = \mathbf{5.086,75}
\end{aligned}$$

$$\mathbf{b = -1.959,92 / 5.086,75 = -0,3853}$$

- Intercept (a)

$$\begin{aligned}
&a = \bar{y}b.\bar{x} \quad (5) \\
&a = -94.1519 - (-0.3853 \times 37.125) \\
&a = -94.1519 - (-14,3225) \\
&\mathbf{a = -79,8294}
\end{aligned}$$

$$\mathbf{\text{Persamaan Regresi : } \hat{y} = -0,3853x - 79,8294}$$

- Koefisien Determinasi (R^2)

$$\begin{aligned}
&R^2 = r^2 \quad (6) \\
&= (-0.8395)^2 = \mathbf{0.7048} \\
&= 0.7048 \times 100\% = \mathbf{70.48\%}
\end{aligned}$$

Korelasi Pearson pada data gabungan menghasilkan nilai $r = -0,8395$ yang tergolong **sangat kuat dan berpola negatif**. Nilai $R^2 = 0,7048$ menunjukkan bahwa 70,48% variasi vakum kondensor dapat dijelaskan oleh variasi tekanan sealing secara keseluruhan.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan data gabungan dikarenakan korelasi sulit terdeteksi ketika rentang variabel independen terlalu sempit dalam satu kelompok. Apabila data Max dan data Min dianalisis secara terpisah, rentang tekanan sealing yang digunakan menjadi sangat sempit. Data Max hanya mencakup rentang 37,23 hingga 41,96 kPa dengan lebar rentang $\pm 4,73$ kPa, sedangkan Data Min hanya mencakup rentang 33,84 hingga 36,16 kPa dengan lebar rentang $\pm 2,32$ kPa. Rentang yang sempit ini menyebabkan variasi antar data terlalu kecil, sehingga pengaruh tekanan sealing terhadap vakum kondensor sulit terdeteksi secara statistik, yang tercermin dari hasil korelasi masing-masing kelompok yang tidak signifikan (Data Max: $r = 0,0124$, $p = 0,9637$; Data Min: $r = -0,3137$, $p = 0,2367$).

Dengan menggabungkan Data Max dan Data Min, rentang tekanan sealing menjadi jauh lebih lebar yaitu dari 33,84 hingga 41,96 kPa dengan lebar rentang $\pm 8,12$ kPa — hampir dua kali lipat dibandingkan masing-masing kelompok secara

terpisah. Perluasan rentang ini memungkinkan pola hubungan antara tekanan sealing dan vakum kondensor terlihat lebih jelas dan konsisten. Selain itu, selisih rata-rata tekanan sealing antara Data Max ($\bar{x} = 39,08$ kPa) dan Data Min ($\bar{x} = 35,246$ kPa) sebesar $\pm 3,83$ kPa menciptakan dua kluster data yang terpisah pada grafik scatter plot, di mana kelompok Data Max berada di sisi kanan atas dan kelompok Data Min berada di sisi kiri bawah, yang secara bersama-sama membentuk tren linear negatif yang kuat dan konsisten.

Korelasi kuat pada data gabungan ($r = -0,8395$) justru membuktikan bahwa perbedaan level tekanan sealing antar zona berpengaruh nyata dan sistematis terhadap kevakuman kondensor, dengan $p\text{-value} = 0,0000 < \alpha = 0,05$. Nilai r yang negatif mengandung makna bahwa secara keseluruhan, semakin rendah tekanan sealing maka vakum kondensor cenderung semakin melemah (nilai vakum mendekati nol), dan sebaliknya semakin tinggi tekanan sealing secara keseluruhan maka vakum kondensor cenderung semakin menguat.

4.3.2 Nilai Tekanan Sealing Optimal untuk Mempertahankan Vakum 94–95 kPa

Karena data gabungan memiliki nilai korelasi terkuat ($r = -0,8395$), maka persamaan regresi gabungan digunakan sebagai dasar utama penentuan tekanan sealing optimal, hal ini dikarenakan kondisi *maximum* dan *minimum* tidak menghasilkan korelasi yang signifikan secara statistik (Max: $r = 0,012$, $p = 0,964$; Min: $r = -0,314$, $p = 0,237$). Hal ini disebabkan oleh sempitnya rentang variasi tekanan *sealing* dalam masing-masing kelompok, sehingga hubungan antar variabel tidak dapat terdeteksi dalam satu regime operasi saja.

Persamaan regresi gabungan adalah:

$$\hat{y} = -0,3853x - 79,8294$$

Untuk mempertahankan vakum kondensor pada rentang target -94 hingga -95 kPa, dilakukan substitusi nilai $\hat{y}$ ke dalam persamaan regresi dan diselesaikan terhadap x (tekanan sealing):

- a. Substitusi batas minimum tekanan sealing

$$-94 = -0,3853x - 79,8294$$

$$-0,3853x = -94 + 79,8294$$

$$-0,3853x = -14,1706$$

$$x = -14,1706 \div (-0,3853) = 36,77 \text{ kPa}$$

- b. Substitusi batas maksimum tekanan sealing

$$-95 = -0,3853x - 79,8294$$

$$-0,3853x = -95 + 79,8294$$

$$-0,3853x = -15,1706$$

$$x = -15,1706 \div (-0,3853) = 39,37 \text{ kPa}$$

Berdasarkan hasil analisis regresi linear sederhana menggunakan data gabungan (Max + Min), diperoleh persamaan regresi $\hat{y} = -0,3853x - 79,8294$. Persamaan ini digunakan sebagai dasar utama dalam menentukan rentang tekanan sealing optimal untuk mempertahankan vakum kondensor pada rentang -94 hingga -95 kPa, yaitu sebesar $36,77 \text{ kPa} \leq x \leq 39,37 \text{ kPa}$.

Hasil ini menunjukkan bahwa operasi turbin uap unit 4 selama periode Agustus hingga November telah berjalan dalam kondisi yang cukup sesuai dengan rentang optimal, dengan nilai rata-rata tekanan sealing gabungan sebesar 37,16 kPa yang berada tepat di dalam rentang tersebut. Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa korelasi pada data tertinggi (Max) sangat lemah ($r = 0,0124$), yang berarti tekanan sealing puncak secara individual tidak secara langsung menentukan kualitas vakum kondensor. Sebaliknya, korelasi gabungan yang kuat ($r = -0,8395$) mengindikasikan bahwa fluktuasi keseluruhan tekanan sealing — baik maksimum maupun minimum — secara bersama-sama berpengaruh signifikan terhadap kondisi vakum kondensor.

Secara operasional, tekanan sealing yang tinggi memang bermanfaat dalam menjaga kestabilan vakum kondensor. Namun batas maksimum tekanan sealing sebesar 39,37 kPa tidak ditetapkan semata-mata berdasarkan pertimbangan kualitas vakum kondensor, melainkan juga mempertimbangkan dampaknya terhadap sistem lain di dalam turbin uap, khususnya sistem oli pelumasan bearing. Apabila tekanan sealing melebihi batas yang ditoleransi, uap sealing yang semakin panas dan bertekanan tinggi berpotensi merambat ke area bearing turbin. Kondisi ini memicu terjadinya pertukaran panas antara uap sealing yang panas dengan oli pendingin yang seharusnya berada pada temperatur rendah.

Akibat dari pertukaran panas tersebut, uap sealing yang bertemu dengan permukaan oli yang lebih dingin akan mengalami kondensasi dan membentuk embun di sekitar sistem pelumasan. Peningkatan kelembaban di area bearing ini dapat menyebabkan dua risiko utama, yaitu kavitasi pada sistem pelumasan akibat perubahan fase fluida, serta korosi pada komponen bearing akibat paparan uap air secara terus-menerus.

Oleh karena itu, rentang tekanan sealing optimal 36,77 – 39,37 kPa merupakan rentang yang menyeimbangkan dua kepentingan sekaligus: cukup tinggi untuk menjaga vakum kondensor tetap stabil pada rentang -94 hingga -95 kPa, namun tidak melampaui batas yang dapat membahayakan integritas sistem oli pelumasan dan bearing turbin.

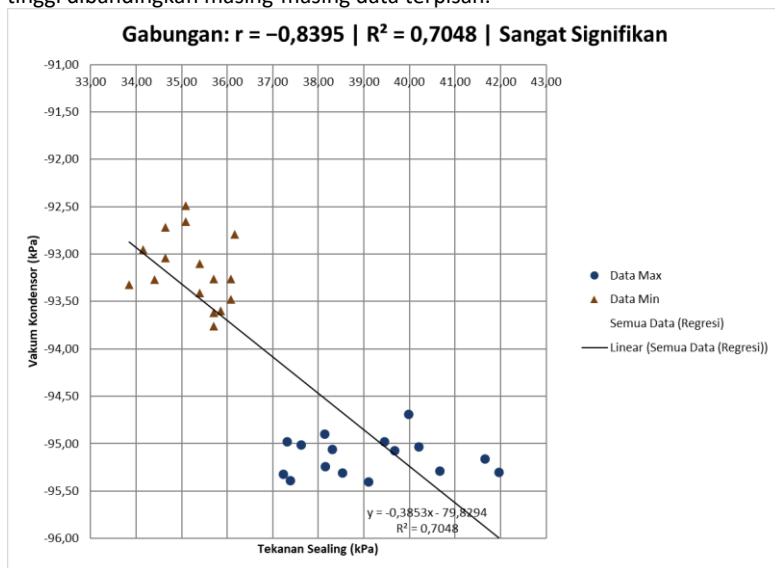
4.3.3. Pola Grafik Hubungan Tekanan Sealing terhadap Fluktuasi Vakum Kondensor

Grafik scatter plot data gabungan menampilkan pola linear negatif yang paling jelas dan konsisten di antara ketiga kategori. Titik-titik data membentuk

pola yang semakin menurun ke kanan, menggambarkan bahwa semakin tinggi tekanan sealing (secara keseluruhan), vakum kondensor cenderung semakin melemah (nilai semakin mendekati nol).

Garis regresi dengan kemiringan $b = -0,3853$ menunjukkan bahwa setiap kenaikan 1 kPa tekanan sealing, vakum kondensor melemah rata-rata sebesar 0,3853 kPa. Dengan $R^2 = 0,7048$, sebesar 70,48% perubahan vakum kondensor dapat dijelaskan oleh variasi tekanan sealing secara keseluruhan.

Grafik ini juga memperlihatkan dua kelompok titik data yang terpisah: kelompok kiri (Sealing Min, 33–37 kPa) dan kelompok kanan (Sealing Max, 37–42 kPa). Kedua kelompok tersebut secara bersama-sama membentuk tren linear negatif yang kuat, yang menjelaskan mengapa korelasi gabungan jauh lebih tinggi dibandingkan masing-masing data terpisah.

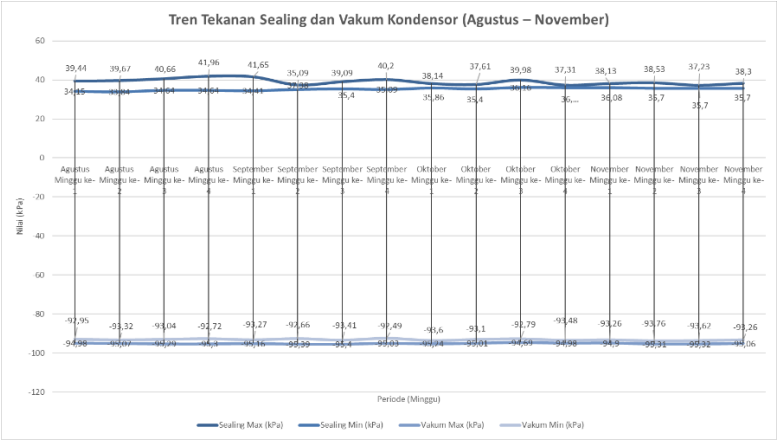


Gambar 18. Grafik Hubungan Tekanan Sealing terhadap Fluktuasi Vakum Kondensor

a. Pola Tren Waktu (Agustus – November)

Selain grafik scatter, analisis tren waktu dilakukan untuk melihat fluktuasi tekanan sealing dan vakum kondensor dari Agustus hingga November secara

kronologis.



Gambar 19. Pola Tren Waktu

Tabel 15. Hasil Observasi Tren

Bulan	Observasi Pola
Agustus	Tekanan sealing Max cukup tinggi (39–42 kPa); vakum kondensor stabil di sekitar –94,98 hingga –95,30 kPa.
September	Terdapat variasi cukup besar pada Sealing Max (37–42 kPa); vakum kondensor berfluktuasi antara –95,03 hingga –95,40 kPa.
Oktober	Sealing Max relatif stabil (37–40 kPa); vakum kondensor sedikit menguat (–94,69 kPa pada minggu ke-3).
November	Sealing Max cenderung turun (37–39 kPa); vakum kondensor bergerak di kisaran –94,9 hingga –95,32 kPa.

Secara keseluruhan, grafik tren waktu menunjukkan bahwa sistem turbin uap unit 4 beroperasi dalam kondisi yang relatif stabil sepanjang periode Agustus–November. Fluktuasi tekanan sealing dan vakum kondensor berada dalam rentang yang dapat diterima secara operasional, dengan nilai rata-rata sealing max 39,08 kPa dan rata-rata vakum –95,133 kPa.

BAB 5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis korelasi Pearson dan regresi linear sederhana terhadap data gabungan tekanan sealing dan vakum kondensor turbin uap unit 4 periode Agustus hingga November, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Korelasi antara tekanan sealing dengan vakum kondensor

Analisis korelasi Pearson pada data gabungan (Max + Min, $n = 32$) menghasilkan nilai $r = -0,8395$ yang tergolong sangat kuat dan berpola negatif. Hal ini menunjukkan bahwa fluktuasi keseluruhan tekanan sealing baik nilai maksimum maupun minimum secara bersama-sama berpengaruh signifikan terhadap kondisi vakum kondensor. Pola negatif mengindikasikan bahwa semakin tinggi tekanan sealing secara keseluruhan, vakum kondensor cenderung semakin melemah. Selain itu, ditemukan perbedaan karakteristik yang signifikan antara kedua kelompok data. Pada kelompok data nilai tertinggi (Sealing Max), rata-rata tekanan sealing mencapai 39,08 kPa dengan vakum kondensor rata-rata -95,133 kPa, sedangkan pada kelompok data nilai terendah (Sealing Min) dengan rata-rata sealing sekitar 35,25 kPa, vakum kondensor cenderung lebih lemah di rentang -92,49 hingga -93,76 kPa. Perbedaan level antar kedua kelompok ini dengan selisih rata-rata $\pm 3,83$ kPa terbukti berpengaruh nyata dan sistematis terhadap kualitas vakum kondensor.

Dari sisi arus pompa vakum, ditemukan fluktuasi yang cukup besar yaitu antara 7,51 A hingga 11,12 A. Kondisi ini mengindikasikan adanya hubungan tiga variabel yang saling berkaitan: ketika tekanan sealing turun dan vakum kondensor melemah, pompa vakum harus bekerja lebih keras untuk mempertahankan kondisi vakum, yang tercermin dari peningkatan arus listrik pompa.

2. Nilai tekanan sealing optimal

Berdasarkan persamaan regresi gabungan $\hat{y} = -0,3853x - 79,8294$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,7048$, diperoleh rentang tekanan sealing optimal untuk mempertahankan vakum kondensor pada rentang -94 hingga -95 kPa, yaitu: **$36,77 \text{ kPa} \leq \text{Tekanan Sealing} \leq 39,37 \text{ kPa}$** . Nilai rata-rata tekanan sealing aktual sebesar 37,16 kPa berada tepat di dalam rentang optimal tersebut, yang menunjukkan bahwa sistem telah beroperasi dalam kondisi yang sesuai. Batas maksimum 39,37 kPa ditetapkan bukan hanya berdasarkan pertimbangan vakum, melainkan juga untuk mencegah uap sealing yang terlalu panas

merambat ke sistem oli pelumasan bearing, yang dapat memicu kondensasi, kavitasi, dan korosi pada komponen bearing turbin.

3. Pola grafik hubungan tekanan sealing terhadap vakum kondensor

Grafik scatter plot data gabungan memperlihatkan pola linear negatif yang jelas dengan dua kluster data — kelompok Data Min di sisi kiri bawah dan kelompok Data Max di sisi kanan atas — yang secara bersama-sama membentuk tren menurun konsisten. Garis regresi $\hat{y} = -0,3853x - 79,8294$ mampu menjelaskan 70,48% variasi vakum kondensor. Analisis tren waktu selama periode Agustus hingga November menunjukkan sistem beroperasi secara stabil dalam rentang operasional yang dapat diterima secara teknis.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan temuan di lapangan, berikut saran yang dapat diberikan:

1. Berdasarkan hasil penelitian, disarankan kepada pihak operasional PLTU PT Bintan Alumina Indonesia Unit 4 untuk menjaga tekanan sealing pada rentang setpoint 36,77–39,37 kPa secara konsisten. Operator disarankan untuk mengatur batas alarm bawah pada sistem DCS di angka 36,77 kPa agar tindakan korektif dapat segera dilakukan sebelum vakum kondensor turun di bawah -94 kPa. Pengawasan melalui DCS perlu dilakukan secara intensif mengingat karakteristik Unit 4 yang berbeda dari Unit 1, di mana sealing pada level 34–37 kPa yang masih normal di Unit 1 justru berpotensi melemahkan vakum kondensor di Unit 4. Selain itu, kondisi arus pompa vakum perlu dipantau sebagai indikator tambahan, karena lonjakan arus yang signifikan (mendekati 11 A) mengindikasikan adanya gangguan pada sistem vakum yang kemungkinan besar dipicu oleh tekanan sealing yang tidak optimal.
2. Diperlukan inspeksi dan pemeliharaan berkala pada komponen labyrinth seal, jalur Balancing Pressure Tank, serta kondisi tube kondensor untuk memastikan tidak ada kebocoran maupun fouling yang menyebabkan ketidakstabilan tekanan sealing dan penurunan vakum. Kondisi pompa vakum tipe Root dan Cincin Air juga harus dipantau secara rutin mengingat fluktuasi arus yang ditemukan dalam data penelitian. Khusus untuk tube kondensor yang berjumlah 4.398 buah, perlu dilakukan pengecekan kondisi fouling secara berkala, karena endapan pada permukaan tube dapat menurunkan efektivitas pendinginan dan berdampak pada kevakuman kondensor meskipun tekanan sealing sudah berada pada rentang optimal.

3. Analisis Pengaruh Variabel Lain terhadap Vakum Kondensor. Penelitian ini secara sadar membatasi diri hanya pada tekanan sealing sebagai variabel independen. Peneliti selanjutnya disarankan untuk mengembangkan model regresi berganda yang melibatkan variabel lain yang turut mempengaruhi vakum kondensor, seperti temperatur air pendingin, laju aliran air pendingin (debit desain 6.851 t/h), dan tingkat fouling pada tube kondensor. Model regresi berganda akan menghasilkan pemahaman yang jauh lebih komprehensif tentang faktor-faktor penentu kualitas vakum kondensor secara simultan.
4. Analisis Rantai Pengaruh Tekanan Sealing terhadap Efisiensi Turbin secara Langsung. Penelitian ini hanya sampai pada vakum kondensor sebagai variabel dependen akhir. Padahal tujuan akhir dari menjaga vakum kondensor adalah meningkatkan efisiensi termal turbin dan daya output listrik. Peneliti selanjutnya disarankan untuk meneruskan rantai analisis ini dengan mengukur secara langsung pengaruh tekanan sealing terhadap heat rate turbin, efisiensi termal siklus Rankine, dan daya output generator (MW). Data-data tersebut tersedia pada sistem DCS yang sama sehingga secara teknis sangat memungkinkan untuk dikaji.
5. Analisis pada Rentang Beban Turbin yang Lebih Luas. Penelitian ini hanya mencakup beban turbin 14–15 MW atau sekitar 47–50% dari kapasitas penuh 30 MW. Peneliti selanjutnya disarankan untuk melakukan penelitian serupa pada rentang beban yang lebih luas, misalnya 20–25 MW atau beban penuh 30 MW, guna mengetahui apakah rentang optimal sealing 36,77–39,37 kPa masih berlaku pada kondisi beban tinggi, serta seberapa besar pengaruh sealing terhadap vakum kondensor pada berbagai level beban.

Daftar Pustaka

- [1] H. Abbas and M. Arif, "Analisa pembangkit tenaga listrik dengan tenaga uap di pltu," vol. 14, no. April 2019, pp. 3–7, 2024.
- [2] S. Halimatu, S. Wuryanti, A. A. Melkias, and K. Kunci, "Analisis Pengaruh Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Performa Turbin Uap," pp. 24–25, 2024.
- [3] L. Sibuea, D. Despa, and R. Widyawati, "Pemodelan dan Simulasi Sistem Automatic Battery Charging pada Emergency Diesel Generator PLTU Sebalang," *J. Profesi Ins. Univ. Lampung*, vol. 5, no. 2, 2024, doi: 10.23960/jpi.v5n2.133.
- [4] M. M. Rashidi, A. Aghagoli, and M. Ali, "Thermodynamic Analysis of a Steam Power Plant with Double Reheat and Feed Water Heaters," vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/940818.
- [5] R. T. Jurnal, "PERANCANGAN BOILER DENGAN MEMANFAATKAN SAMPAH KERING UNTUK BAHAN BAKAR PLTU MINI 3 kW STT-PLN," *Power Plant*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 2018, doi: 10.33322/powerplant.v5i1.113.
- [6] P. Listrik and T. Uap, "1,2,3,4)".
- [7] R. S. M. Mustangin, Saptysji H, Fellando M, "Mustangin_buku turbin uap.pdf," 2018.
- [8] K. Komarudin, H. H. Abrianto, A. Multi, and A. P. Utama, "Performance Analysis of Extraction Condensing Turbine - Unit 1 at PLTU X , Bekasi , West Java," vol. 2, no. 1, pp. 130–138, 2023.
- [9] S. Pendidikan *et al.*, "ANALISA PENGARUH LOAD CAPACITY PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP TANJUNG AWAR-AWAR 350 MW TERHADAP EFISIENSI TURBIN GENERATOR QFSN-350-2 UNIT 1 Joko Purnomo Mohamad Effendy Abstrak," pp. 43–49.
- [10] Soelaiman, Sofyan, and N. Priyanto, "Analisa prestasi kerja turbin uap pada beban yang bervariasi," *Turbin Heat Rate*, vol. 2, no. 1, pp. 1–12, 2020.
- [11] "Lesson 5.pdf."
- [12] N. U. Omenife, D. A. Desai, and R. K. Dunne, "Analysis of Brush Seal Interaction with Steam Turbine Rotor-Shafts," vol. 4, no. 1, pp. 32–44, 2024.
- [13] Nur Andiansyah, "Analisis Efisiensi Generator Pada Pltu Pabrik Gula Pt. Kebon Agung Trangkil," pp. 1–43, 2023.
- [14] A. W. Pramono, G. P. Artiani, and A. Laksono, "Analisa Pengaruh Jumlah Pengoperasian CWP Terhadap Performa Kondensor PLTU Rembang," *J. Power Plant*, vol. 3, no. 1, pp. 1–4, 2015.
- [15] J. C. Bhuana, I. Muh, and A. Maulana, "Analisis Efektivitas Kondensor Di

- PLTU PT. Semen Tonasa Btg Unit I 2×25 MW,” *PoliGrid*, vol. 2, no. 1, p. 20, 2021, doi: 10.46964/poligrid.v2i1.720.
- [16] “3) 1,3)”.
- [17] A. Mursadin and A. Y. Iriyanto, “Modeling and Predicting Steam Power Plant Condenser Vacuum based on Small-sized Operation Data,” vol. 14, no. 4, pp. 15233–15238, 2024.
- [18] A. A. Melkias and S. N. Gomez, “Evaluasi Kinerja Steam Jet Ejector Tingkat Pertama Terhadap Kevakuman Kondensor,” 2024.
- [19] T. Gland, S. Steam, and S. Tss, “Turbine Gland Seal Steam System (TSS) 1 Functions 2 Design Bases,” pp. 1–15.
- [20] O. Apriyahanda, “Sistem S e a l i n g Pada Turbin Uap”.
- [21] E. Science, “Analysis and Treatment of Abnormal Pressure of Shaft Seal of Small Steam Turbine Analysis and Treatment of Abnormal Pressure of Shaft Seal of Small Steam Turbine,” 2019, doi: 10.1088/1755-1315/310/3/032016.
- [22] B. Pvs--tgs and P. Of, “TURBINE GLAND SEAL SYSTEMS – ENGINEERING DATA,” pp. 1–3.
- [23] U. S. E. P. R. Final and S. Analysis, “U.s. epr final safety analysis report 10.4.3,” pp. 13–16.
- [24] C. Basics, “Condenser Basics,” pp. 2–5.
- [25] I. D. Alber, “ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN TEKANAN VAKUM KONDENSOR TERHADAP EFESIENSI DAN HEAT RATE TURBIN UAP DI PLTU KENDARI-3 UNIT 2,” vol. 12, no. 2, pp. 1–8, 2021.
- [26] A. R. Effendi, “Analisis Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kerja Turbin Dan Produksi Listrik PLTU Unit 1 Sebalang Menggunakan Simulasi Cycle Tempo,” vol. 8, no. 1, pp. 1–29, 2020.
- [27] E. Novianarenti *et al.*, “Numerical Study of The Power Plant Surface Condenser to Prevent High Pressure in Critical Areas,” 2021, doi: 10.31284/j.jmesi.2021.v1i2.2317.
- [28] J. T. Mesin and F. T. Industri, “Analisa Termodinamika Pengaruh Penurunan Tekanan Vakum pada Kondensor Terhadap Performa Siklus PLTU Menggunakan,” no. 3.
- [29] Y. Kurniawan, “Penurunan kevakuman kondensor pada instalasi turbin uap generator di kapal vlgc nusa bright,” 2020.
- [30] P. X. Mw, U. Sultra, and T. Akhir, “PENGARUH TEKANAN VACUUM PUMP PADA NILAI EFEKTIVITAS KONDENSOR PLTU PT . ANTAM,” 2018.
- [31] F. M. Musthofa, J. T. Mesin, P. Negeri, and U. Pandang, “PENGARUH DEBRIS FILTER DAN BALL CLEANING TERHADAP TINGKAT KEVAKUMAN DAN KEBERSIHAN KONDENSOR PLTU BARRU UNIT 1 SULAWESI SELATAN,” 2020.
- [32] J. T. Mesin, P. Negeri, and U. Pandang, “ANALISIS EFEKTIVITAS KONDENSOR DI PLTU PT . SEMEN TONASA BTG UNIT I 2 × 25 MW,”

- 2018.
- [33] H. Satyadi and H. T. N, "Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan HG2T Method (Helium Gas Tracer Test) Solution To Increase Condenser Vacuum Tightness Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan," vol. 2, no. 1, pp. 66–77, 2024.
 - [34] "Pompa Vakum 真空泵."
 - [35] J. Pendidikan, T. Elektro, and U. N. Yogyakarta, "MATERI KULIAH Sistem Kontrol Terdistribusi (Distributed Control Systems) Sistem Kontrol Proses Berbasis Berkomputer Perkembangan Sistem Kontrol Proses Sistem Kontrol Proses Berbasis Berkomputer," pp. 1–38, 2013.
 - [36] I. W. W. Kusuma, "PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR (PLTA) Oleh : I Gede Suputra Widharma Kata Pengantar," no. 009, 2021.
 - [37] B. K. Mw, "KONDENSOR DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) SKRIPSI OLEH : FAUZY FIRDAUS FADHILLAH FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITASA MEDAN AREA MEDAN," 2017.
 - [38] O. Apriyahanda, "Sistem Sealing Pada Turbin Uap".
 - [39] J. T. Mesin, "Politeknik negeri jakarta," 2024.
 - [40] Katadata, "Rumus MEAN." [Online]. Available: <https://katadata.co.id/berita/nasional/66c5a3d237458/rumus-mean-nilai-rata-rata-jenis-rumus-dan-contoh-soalnya>
 - [41] Kabinet Abyahita, "Korelasi Pearson." [Online]. Available: <https://ss.mipa.ub.ac.id/korelasi-pearson/>
 - [42] R. F. Refiantoro, "Analisis Regresi Sederhana Pada Nilai UAS Menggunakan Microsoft Excel Dan IBM SPSS," vol. 17, no. November, pp. 107–116, 2022.
 - [43] scribbr, "Coefficient of Determination (R^2) | Calculation & Interpretation." [Online]. Available: <https://www.scribbr.com/statistics/coefficient-of-determination/>

**FORMULIR LOGBOOK BIMBINGAN DAN PENGAJUAN
SIDANG TUGAS AKHIR**

Nama : Fajar Masdiantoro
 NIM : 4232201010
 Pembimbing I : Ir. Didi Istardi, S.T., M.Sc
 Judul : Pengaruh Tekanan Sealing Surbin Terhadap Kevakuman Kondensor Pada Turbin Uap Unit 4 PT Bintang Alumina Indonesia

No	Hari/Tgl	Rincian Kegiatan	TTD Pembimbing
1	Rabu, 15 April 2026	Membahas kelanjutan bab 4 & 5, dan juga membahas penambahan pada bab 3 tentang step pengolahan data dan progres lainnya.	
2	Minggu, 26 April 2026	Mengirim progres tugas akhir hingga bab 5 berupa data kasaran yang akan di olah.	
3	Kamis, 30 April 2026	Membahas penambahan pada bab 3 tentang implementasi rumus ke data yang diolah di excel.	
4	Senin, 04 Mei 2026	Membahas progres tugas akhir hingga bab 5 dan beberapa perubahan dalam pengolahan data.	
5	Rabu, 13 Mei 2026	Menyampaikan progres tugas akhir setelah saran dari pembimbing setelah perubahan pada bagian pengolahan data serta penyusunan bab 5.	

6	Senin , 25 Mei 2026	Mengirim progres tugas akhir ke dosen pembimbing hingga bab 5 dan meminta saran koreksi pada tugas akhir tersebut.	
7	Minggu, 31 Mei 2026	Membahas konfirmasi tentang saran dan koreksi pada progres tugas akhir hingga bab 5.	
8	Senin, 1 Juni 2026	Membahas progres tugas akhir setelah beberapa perubahan dari bab 3,4 dan 5. Serta mengecek kembali isi dari tugas akhir.	
9	Rabu, 3 Juni 2026	Mengirim progres tugas akhir untuk meminta di koreksi dan saran dari dosen pembimbing.	
10	Jumat, 5 Juni 2026	Membahas konfirmasi tentang saran dari tugas akhir oleh dosen pembimbing.	
11	Minggu, 7 Juni 2026	Membahas adanya perubahan dari saran dosen pembimbing pada tugas akhir.	
12	Kamis, 25 Juni 2026	Review ppt tugas akhir oleh dosen pembimbing.	

13	Jumat, 26 Juni 2026	Persetujuan maju sidang akhir tugas akhir oleh dosen pembimbing.	
----	------------------------	--	---

Berdasarkan hasil bimbingan yang telah dilaksanakan selama 3 bulan dan telah disetujui oleh dosen pembimbing, maka dengan ini saya mengajukan diri sebagai peserta Sidang tugas akhir

Ir. Didi Istardi, S.T., M.Sc



NIP: 102022

Batam, 26 Juni 2026

Fajar Masdiantoro



NIM: 4232201010