

OPTIMASI EFISIENSI ISOTHERMAL MAIN AIR COMPRESSOR DI PT.XYZ

Muhammad Alvin Faiz Asshidqi¹, Daffa Yoganza Arrunata¹, Annasit^{1*}

¹Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, 58315

*E-mail: annasit@esdm.go.id

ABSTRAK

Kompresor merupakan peralatan penting dalam industri yang mengkonsumsi energi signifikan. Efisiensi isothermal menjadi parameter kunci untuk menilai kinerja kompresor, khususnya di *Air Separation Unit* (ASU) yang sangat bergantung pada udara bertekanan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimasi efisiensi isothermal pada *Main Air Compressor* (MAC) *multistage* di PT. XYZ. Metode penelitian dilakukan dengan mengolah data operasional aktual, seperti *pressure*, *temperature*, *flowrate*, dan *power consumption*, kemudian menghitung efisiensi isothermal menggunakan dua pendekatan: berdasarkan temperatur *cooling water* aktual dan temperatur konstan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi isothermal rata-rata aktual sebelum optimasi adalah 68,62%. Melalui serangkaian optimasi yang berfokus pada penurunan temperatur *cooling water* dan tindakan pendukung, efisiensi isothermal berhasil ditingkatkan menjadi 71,52%, disertai penghematan konsumsi daya sebesar 5,33%. Optimasi ini berhasil mendekatkan kinerja kompresor ke kondisi desainnya, membuktikan efektivitas strategi yang diterapkan dalam meningkatkan efisiensi energi dan keandalan operasional.

Kata kunci: Efisiensi Isothermal, *Main Air Compressor*, Optimasi Energi, *Cooling Water*, Konsumsi Daya

1. PENDAHULUAN

Kompresor merupakan salah satu peralatan penting dalam industri yang berfungsi untuk meningkatkan tekanan gas dengan cara memampatkannya. Proses ini mengubah energi mekanik menjadi energi pneumatik, yang kemudian dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi seperti pengolahan gas, pembangkitan listrik, *cooling system*, dan *Compressed Air System Storage* (CAES) [6]. Dalam fasilitas industri, terutama pada pabrik pemisahan udara atau biasa disebut *Air Separation Unit* (ASU), *Air Separation Unit* merupakan fasilitas industri yang berfungsi untuk memisahkan udara atmosfer menjadi komponen utama seperti oksigen (O₂), nitrogen (N₂), dan argon (Ar) dengan menggunakan prinsip kriogenik maupun non-kriogenik. Pada umumnya, proses pemisahan dilakukan melalui metode distilasi kriogenik yang membutuhkan udara dalam kondisi bertekanan dan bersuhu sangat rendah. Oleh karena itu, keberadaan *Main Air Compressor* (MAC) menjadi krusial, karena berfungsi menyediakan udara bertekanan yang akan didinginkan, dimurnikan, dan selanjutnya dipisahkan di dalam kolom distilasi. Kinerja dan efisiensi kompresor dalam *Air Separation Unit* sangat menentukan stabilitas pasokan gas industri serta efisiensi energi pabrik secara keseluruhan [9].

Compressed Air System diketahui menyumbang sekitar 10% dari total konsumsi energi di sektor industri global, menjadikannya salah satu utilitas yang paling banyak mengonsumsi energi di fasilitas produksi [10]. Efisiensi Isothermal kompresor menjadi faktor penentu dalam penghematan energi dan pengurangan biaya operasional. Salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kinerja kompresor adalah efisiensi isothermal, yang menggambarkan sejauh

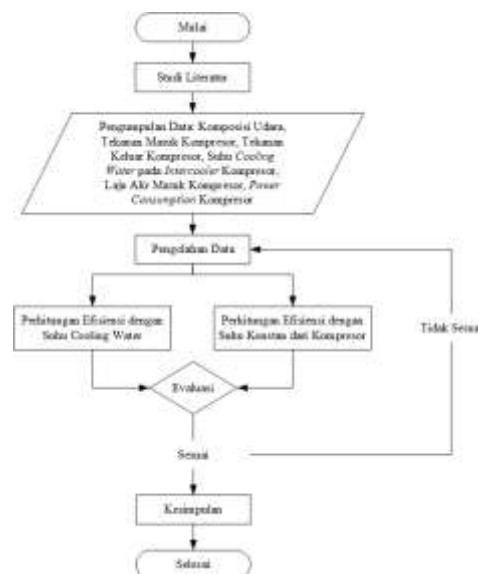
mana proses kompresi mendekati kondisi ideal dengan mempertahankan suhu konstan selama proses pemampatan [10] [11].

Kompresor satu tahap memiliki keterbatasan dalam mengendalikan kenaikan suhu yang signifikan selama proses kompresi, sehingga mengakibatkan penurunan efisiensi. Untuk mengatasi hal ini, digunakan kompresor *multistage* yang dilengkapi dengan *intercooler* antar tahap [5]. Penerapan pendinginan antar tahap bertujuan untuk menurunkan suhu udara sebelum masuk ke tahap berikutnya, sehingga mengurangi volume spesifik dan kebutuhan daya kompresor [1]. Strategi ini secara langsung berdampak pada peningkatan efisiensi isothermal [7].

Pada *Air Separation Unit*, efisiensi isothermal kompresor menjadi parameter penting dalam menilai kinerja keseluruhan sistem, karena proses pemisahan udara sangat bergantung pada stabilitas tekanan dan suhu gas [8]. Efisiensi isothermal mengukur seberapa dekat proses kompresi yang terjadi dengan proses isothermal ideal, di mana suhu gas dijaga konstan selama kompresi. Nilai efisiensi ini umumnya berada pada kisaran 70–85% untuk kompresor industri, tergantung pada desain, kondisi operasi, dan kualitas sistem pendinginan antar-tahap (*intercooler*) [4]. Pencapaian efisiensi tinggi sangat dipengaruhi oleh kemampuan *intercooler* menurunkan temperatur *discharge* antar tahap sehingga beban kerja kompresor berkurang [3]. Pada *Main Air Compressor* di *Air Separation Unit*, peningkatan efisiensi isothermal langsung berkorelasi dengan penghematan energi listrik yang signifikan, mengingat kompresor dapat menyumbang hingga 60–70% dari total konsumsi daya pabrik [2].

PT. XYZ menghadapi tantangan dalam menjaga efisiensi isothermal pada *Main Air Compressor multistage*-nya akibat pengaruh faktor-faktor seperti kondisi *cooling water*, *inlet temperature*, beban operasional, dan *pressure*. Penelitian ini bertujuan menganalisis dan mengoptimasi efisiensi isothermal melalui evaluasi data operasional aktual, dengan membandingkan perhitungan berdasarkan suhu *cooling water* dan suhu konstan serta memvalidasinya dengan kondisi lapangan. Hasilnya diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis untuk meningkatkan efisiensi energi, menekan biaya operasional, dan menjadi acuan dalam perawatan serta pengoperasian kompresor di industri.

2. METODE



Gambar 1. Flowchart Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur yang membahas kompresor, khususnya terkait efisiensi isothermal yang akan dioptimalkan. Tahap berikutnya adalah pengumpulan data yang diperlukan untuk menentukan nilai efisiensi. Data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan dua pendekatan perhitungan, yaitu perhitungan berdasarkan suhu *cooling water* dan perhitungan berdasarkan suhu konstan pada kompresor. Selanjutnya, hasil perhitungan dievaluasi untuk memastikan kesesuaiannya dengan kondisi aktual di lapangan. Apabila hasil perhitungan efisiensi menunjukkan kesesuaian, maka dapat ditarik kesimpulan dari penelitian ini. Namun, jika hasil efisiensi tidak sesuai dengan spesifikasi *design*, maka dilakukan pengolahan ulang data hingga diperoleh hasil yang valid. Penelitian ini dilaksanakan selama tiga bulan, dimulai pada 1 Juli 2025 hingga 30 September 2025. Obyek penelitian adalah *Main Air Compressor multistage* tiga tahap yang telah dimodifikasi dengan penambahan *intercooler* pada sistemnya.

3. PEMBAHASAN

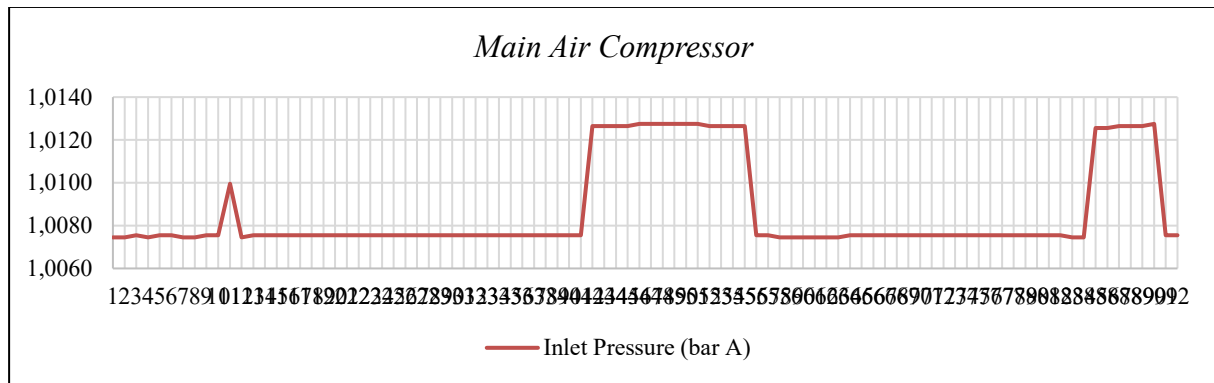
Penelitian mengenai optimasi efisiensi isothermal pada *Main Air Compressor* di PT. XYZ telah dilaksanakan selama hampir tiga bulan dengan mengacu pada data operasional yang meliputi *inlet pressure*, *outlet pressure*, serta parameter pendukung lainnya. Data tersebut menjadi dasar dalam melakukan analisis dan perhitungan efisiensi isothermal dengan menggunakan dua pendekatan.

Pendekatan pertama dilakukan melalui perhitungan efisiensi isothermal berdasarkan temperatur *cooling water*. Pada metode ini, temperatur *cooling water* yang digunakan dalam *intercooler* menjadi parameter utama yang memengaruhi efektivitas pelepasan panas dari udara terkompresi. Semakin rendah temperatur *cooling water*, maka semakin besar kemampuan sistem pendingin untuk menjaga temperatur gas hasil kompresi mendekati kondisi isothermal, sehingga efisiensi kompresor dapat meningkat. Sebaliknya, apabila temperatur *cooling water* terlalu tinggi, maka proses pelepasan panas menjadi tidak optimal sehingga temperatur gas terkompresi tetap lebih tinggi dari kondisi ideal. Hal ini mengakibatkan efisiensi isothermal menurun secara signifikan.

Pendekatan kedua dilakukan melalui perhitungan efisiensi isothermal dengan asumsi temperatur dijaga konstan pada nilai tertentu atau pada kondisi rendah. Metode ini menggunakan kondisi ideal sebagai acuan, di mana temperatur gas selama proses kompresi dianggap dapat dipertahankan konstan. Dengan demikian, nilai efisiensi isothermal yang diperoleh dari metode ini merepresentasikan suhu konstant yang dapat dicapai oleh sistem.

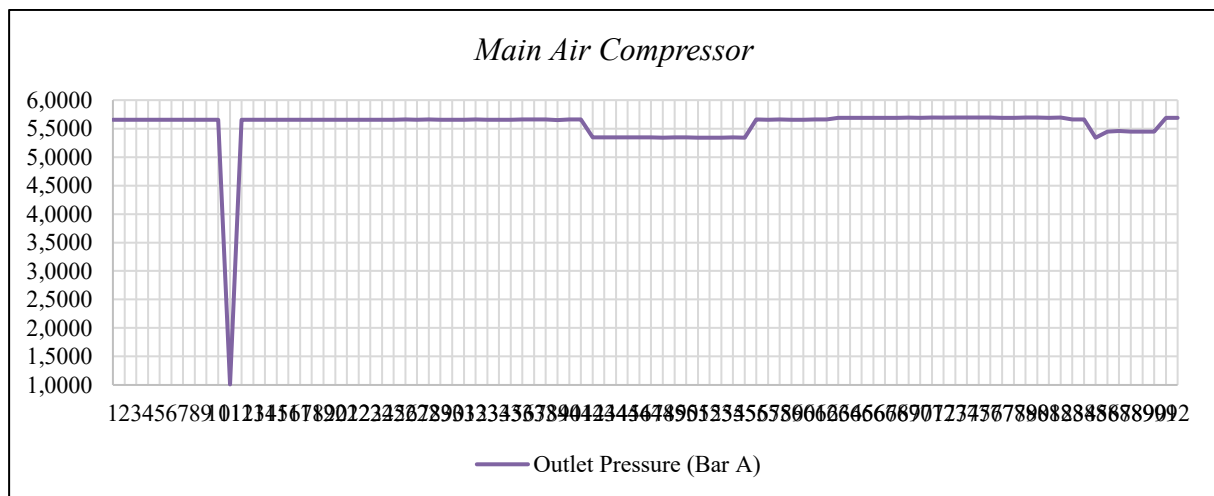
Kedua pendekatan ini saling berkorelasi dalam memberikan gambaran mengenai kinerja kompresor. Perhitungan dengan asumsi temperatur konstan menggambarkan kondisi ideal yang menjadi acuan maksimal efisiensi isothermal, sedangkan perhitungan dengan temperatur *cooling water* mencerminkan kondisi aktual di lapangan. Perbedaan antara kedua hasil tersebut menunjukkan sejauh mana kinerja sistem pendinginan memengaruhi pencapaian efisiensi isothermal. Semakin kecil selisih antara hasil kedua metode, semakin baik kinerja *intercooler* dalam menjaga proses kompresi mendekati kondisi ideal. Sebaliknya, jika *cooling water* bersuhu tinggi, maka selisih tersebut semakin besar, yang berarti efisiensi aktual jauh di bawah efisiensi teoritis.

Selain itu, perlu dicatat bahwa pada PT. XYZ terdapat dua unit *Main Air Compressor* yang beroperasi untuk memenuhi kebutuhan penuh dalam proses produksi. Namun, pada penelitian ini perhitungan efisiensi isothermal difokuskan hanya pada satu unit *Main Air Compressor* (*single MAC*). Fokus ini dipilih untuk memperoleh hasil analisis yang lebih terperinci dan akurat pada tingkat unit, sebelum kemudian dikembangkan pada kondisi operasi dengan dua kompresor secara bersamaan.



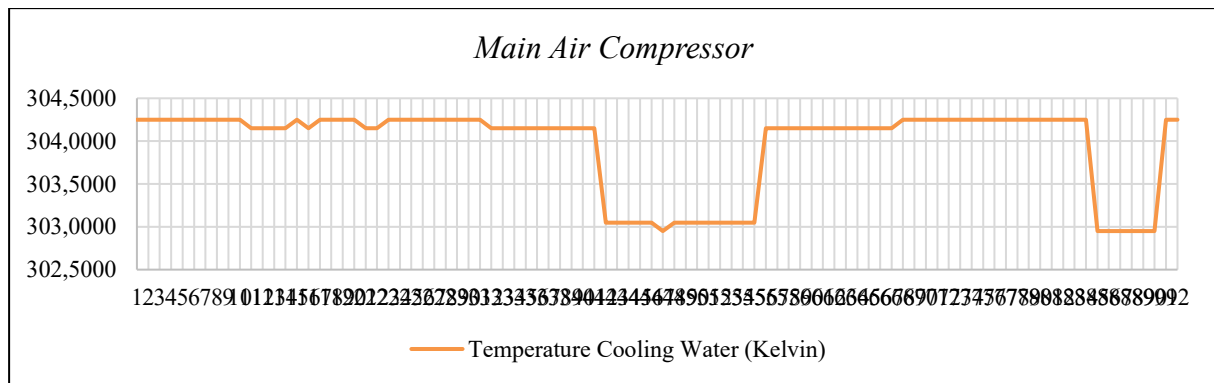
Gambar 2. Grafik Inlet Pressure Main Air Compressor

Gambar 2. memperlihatkan grafik *inlet pressure* yang diperoleh selama proses pengamatan pada *Main Air Compressor*. Grafik tersebut menggambarkan kondisi tekanan masuk pada tiga keadaan operasi, yaitu *normal operation*, *minimum load operation*, serta saat terjadi *plant trip*. Pada kondisi *normal operation*, nilai *inlet pressure* berada dalam rentang yang stabil sesuai dengan spesifikasi operasi. Pada kondisi *minimum load operation*, terjadi peningkatan tekanan. Sementara itu, pada kondisi *plant trip*, terlihat tekanan yang sama pada kondisi lingkungan karena kompresor berhenti beroperasi sebagai konsekuensi dari penghentian proses secara mendadak.



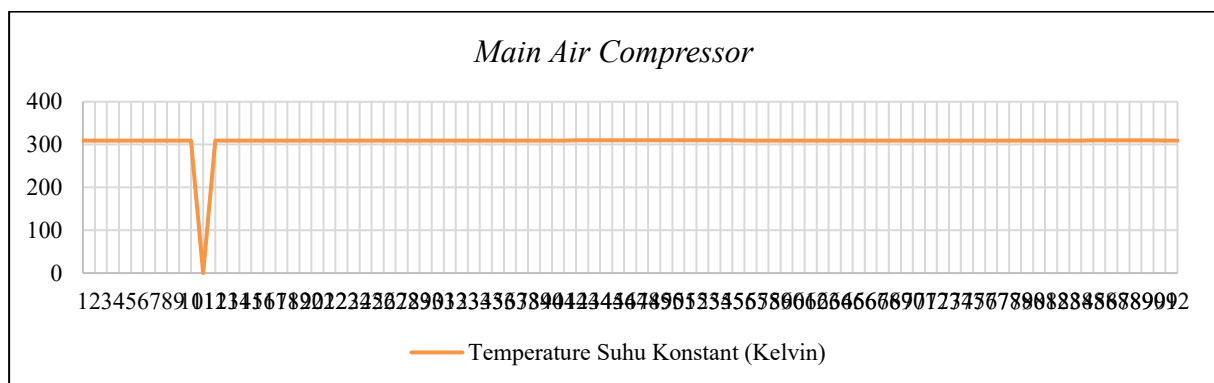
Gambar 3. Grafik Pressure Outlet Main Air Compressor

Gambar 3. menampilkan hasil pengamatan terhadap *outlet pressure* pada *Main Air Compressor* selama periode penelitian. Grafik tersebut memperlihatkan karakteristik tekanan keluar kompresor pada beberapa kondisi operasi, meliputi *normal operation*, *minimum Load operation*, dan *plant trip*. Pada kondisi *normal operation*, *outlet pressure* tercatat berada pada tingkat yang konsisten dengan kebutuhan proses. Ketika beroperasi pada *minimum load*, tekanan keluar menunjukkan penurunan. Adapun pada saat terjadi *plant trip*, grafik memperlihatkan tekanan yang sama pada kondisi lingkungan karena terhentinya proses kompresi.



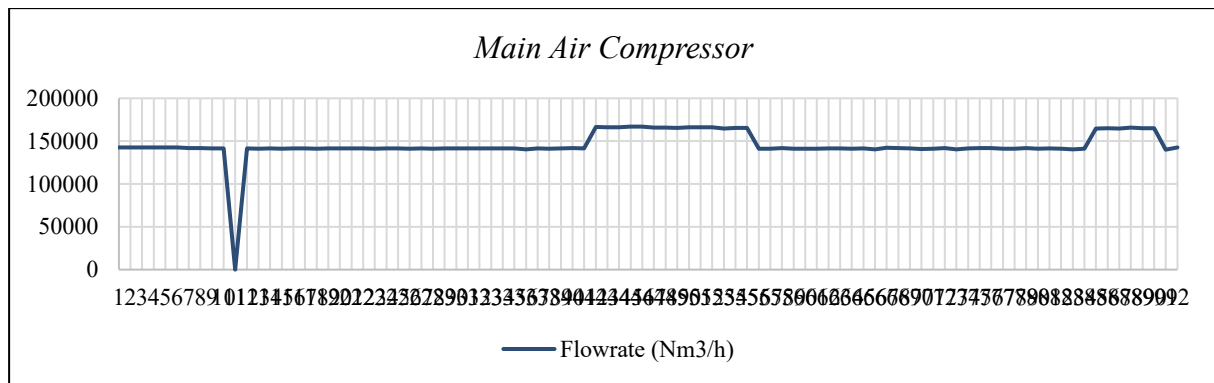
Gambar 4. Grafik *Temperature Cooling Water*

Gambar 4. menyajikan grafik temperatur *cooling water* yang diperoleh selama pengamatan pada *Main Air Compressor*. Grafik ini menunjukkan perbedaan karakteristik temperatur *cooling water* pada tiga kondisi operasi, yaitu *normal operation*, *minimum load operation*, serta saat *plant trip*. Pada kondisi *normal operation*, temperatur *cooling water* relatif stabil dan sesuai untuk mendukung proses pendinginan pada dua unit *Main Air Compressor* yang beroperasi secara bersamaan. Namun, pada kondisi *minimum load operation*, hanya satu unit *Main Air Compressor* yang berfungsi, sehingga beban kompresi yang ditanggung meningkat akibat akumulasi aliran yang masuk ke satu kompresor. Kondisi ini menuntut temperatur *cooling water* yang lebih rendah agar proses pelepasan panas tetap optimal. Sementara itu, pada saat *plant trip*, temperatur *cooling water* sama dinginnya seperti kondisi normal akibat terhentinya *Main Air Compressor*.



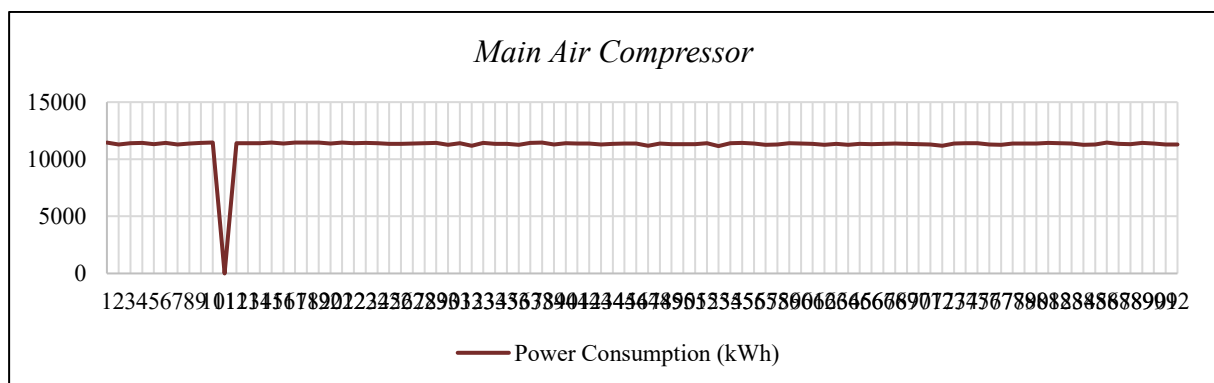
Gambar 5. Grafik *Temperature Konstan*

Gambar 5. menampilkan grafik temperatur konstan yang digunakan sebagai acuan dalam perhitungan efisiensi isothermal pada *Main Air Compressor*. Grafik ini memperlihatkan kondisi temperatur pada saat *normal operation*, *minimum load operation*, serta saat terjadi *plant trip*. Dalam kondisi *normal operation*, temperatur konstan dapat dipertahankan sesuai asumsi ideal untuk mendukung proses perhitungan efisiensi. Pada kondisi *minimum load operation*, meskipun hanya satu unit *Main Air Compressor* yang beroperasi dengan beban lebih besar, temperatur konstan tetap dijaga agar proses perhitungan mendekati kondisi ideal. Sementara itu, pada saat *plant trip*, tidak terdapat temperatur konstan yang dipertahankan karena seluruh operasi *Main Air Compressor* berhenti, sehingga acuan suhu tidak lagi relevan untuk digunakan.



Gambar 6. Grafik Flowrate Main Air Compressor

Gambar 6. memperlihatkan hasil pengamatan terhadap *flowrate* udara yang masuk ke *Main Air Compressor* pada berbagai kondisi operasi. Pada saat *normal operation*, distribusi *flowrate* cenderung stabil karena beban kompresi ditanggung secara seimbang oleh dua unit *Main Air Compressor*. Ketika beralih ke kondisi *minimum load operation*, hanya satu unit *Main Air Compressor* yang berfungsi sehingga volume aliran yang masuk terkonsentrasi pada satu kompresor, menyebabkan nilai *flowrate* relatif lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi operasi normal per unit. Adapun pada saat *plant Trip*, grafik menunjukkan penurunan drastis *flowrate* hingga mendekati nol sebagai akibat dari berhentinya proses kompresi secara menyeluruh.



Gambar 7. Grafik Power Consumption Main Air Compressor

Gambar 7 menampilkan hasil pengamatan terhadap *power consumption* pada *Main Air Compressor* dalam berbagai kondisi operasi. Pada kondisi *normal operation*, kebutuhan daya berada pada tingkat yang relatif stabil seiring dengan pembagian beban kerja antara dua unit *Main Air Compressor*. Ketika beroperasi pada *minimum load operation*, hanya satu unit *Main Air Compressor* yang berfungsi, sehingga konsumsi daya per unit sedikit meningkat akibat penumpukan beban kompresi. Sementara itu, pada kondisi *plant trip*, konsumsi daya turun secara drastis hingga nol karena seluruh sistem kompresor berhenti beroperasi.

Berdasarkan data hasil pengamatan, perhitungan efisiensi isothermal pada *Main Air Compressor* dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu menggunakan temperatur *cooling water* aktual dan temperatur konstan sebagai kondisi ideal. Perhitungan dimulai dengan menentukan laju alir massa udara dari data tekanan, *inlet temperature*, serta *flowrate* aktual. Pendekatan *cooling water* menggambarkan kondisi nyata sehingga dipengaruhi kinerja pendinginan,

sedangkan temperatur konstan merepresentasikan kondisi ideal sebagai acuan batas teoritis. Berikut ini adalah rumus isothermalnya:

$$\eta_{iso} = \frac{W_{iso}}{powerinput} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_{iso} = P_1 V_1 \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

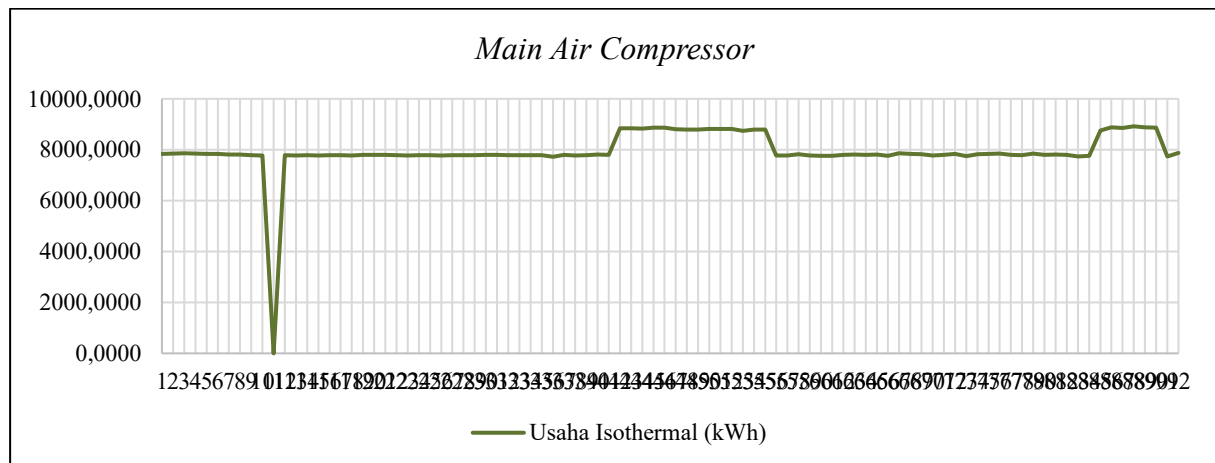
$$\eta_{iso} = \frac{W_{iso}}{powerinput} \times 100\% \quad (3)$$

Persamaan (1) menunjukkan definisi efisiensi isothermal (η_{iso}), yang diperoleh dari perbandingan antara kerja isothermal (W_{iso}) dengan daya input aktual kompresor ($powerinput$). Nilai ini dinyatakan dalam persen untuk memudahkan interpretasi performa kompresor terhadap kondisi ideal.

Persamaan (2) merupakan rumus kerja isothermal (W_{iso}) yang dihitung berdasarkan *inlet pressure* (P_1), *outlet pressure* (P_2), serta volume spesifik atau volume alir pada kondisi *inlet* (V_1). Hubungan ini melibatkan fungsi logaritmik $\ln(P_2/P_1)$ yang menunjukkan karakteristik kompresi isothermal, di mana temperatur dijaga konstan.

Persamaan (3) kembali menegaskan formulasi efisiensi isothermal dengan menekankan bahwa besarnya efisiensi sangat bergantung pada seberapa kecil perbedaan antara kerja ideal (isothermal) dengan daya aktual yang diserap kompresor. Dengan demikian, efisiensi isothermal dapat dijadikan indikator utama dalam menilai kinerja *Main Air Compressor*, khususnya dalam membandingkan kondisi aktual di lapangan dengan kondisi ideal teoritis.

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan isothermal yang telah dijabarkan sebelumnya, diperoleh nilai efisiensi isothermal *Main Air Compressor* pada berbagai kondisi operasi. Hasil perhitungan tersebut dirangkum dalam data berikut, yang menggambarkan variasi efisiensi sesuai dengan perbedaan kondisi operasi, seperti *normal operation*, *minimum load operation*, dan saat terjadi *plant trip*.

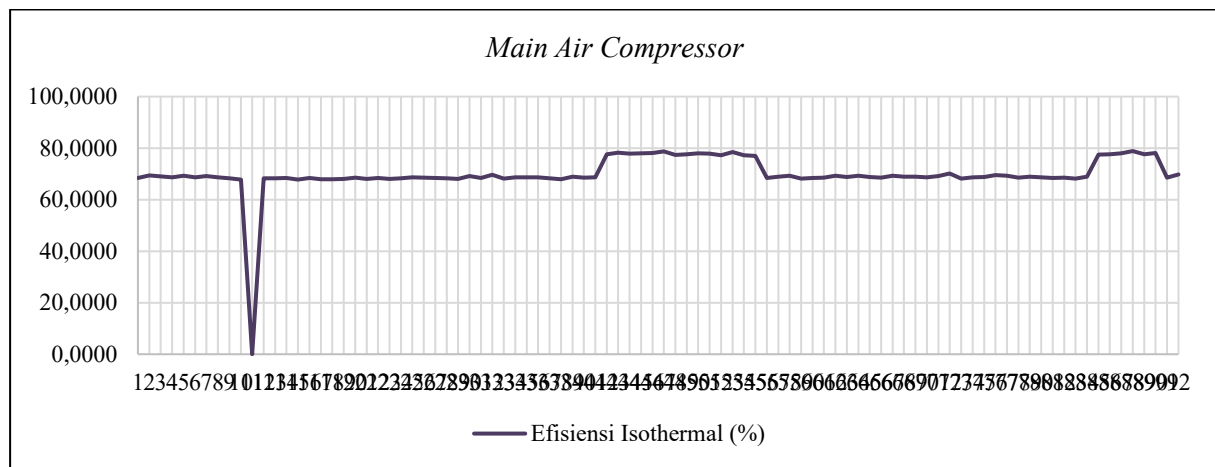


Gambar 8. Grafik Usaha Isothermal *Main Air Compressor* dengan Suhu *Cooling Water*

Gambar 8 menunjukkan grafik hasil perhitungan usaha isothermal (W_{iso}) dengan suhu *cooling water* pada *Main Air Compressor* selama periode pengamatan. Secara umum, nilai usaha isothermal berada pada rentang 7.000.000 hingga 9.000.000 kWh, didapatkan rata-rata yaitu 7793,1814 kWh dengan kecenderungan stabil pada kondisi operasi normal. Terlihat adanya penurunan signifikan pada titik tertentu, yang mencerminkan kondisi transisi akibat

perubahan beban, seperti saat *minimum load operation* maupun *plant trip*, di mana laju alir massa udara yang dikompresi menurun drastis. Pada kondisi *normal operation*, nilai W_{iso} cenderung konstan karena *inlet pressure* dan *outlet pressure* berada dalam rentang stabil, sehingga kerja kompresi yang dibutuhkan relatif tidak mengalami fluktuasi besar. Sebaliknya, pada kondisi *minimum load*, hanya satu unit *Main Air Compressor* yang beroperasi sehingga aliran udara terpusat pada satu kompresor, mengakibatkan kebutuhan usaha meningkat dibandingkan operasi *single MAC* dengan beban normal.

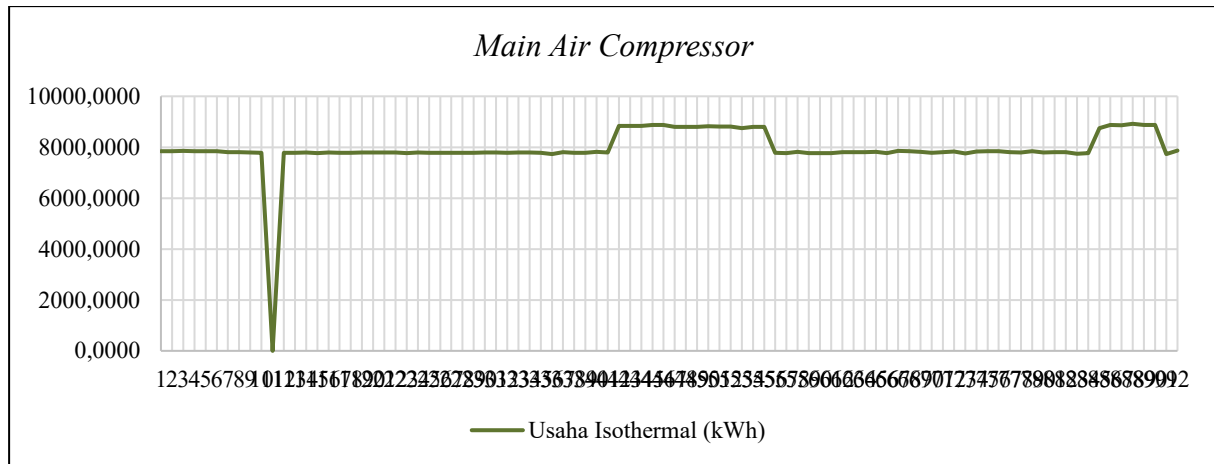
Dari analisis ini dapat disimpulkan bahwa usaha isothermal berbanding lurus dengan variasi tekanan dan laju alir massa udara. Semakin besar perbedaan antara *inlet pressure* dan *outlet pressure*, serta semakin tinggi *flowrate*, maka usaha isothermal yang dibutuhkan untuk proses kompresi juga meningkat. Oleh karena itu, kestabilan sistem pendinginan dan distribusi beban antar kompresor memiliki pengaruh langsung terhadap besarnya usaha isothermal yang dihasilkan.



Gambar 9. Grafik Isothermal Efficiency MAC dengan Suhu Cooling Water

Gambar 9 menunjukkan hasil perhitungan efisiensi isothermal (η_{iso}) dengan suhu *cooling water* pada *Main Air Compressor* selama periode pengamatan. Secara umum, nilai efisiensi isothermal berada pada kisaran 65–77%, dengan rata-rata sebesar 68,6203%. Nilai efisiensi tertinggi yang dicapai adalah 77,0927%, yang terjadi pada saat kondisi operasi normal dengan sistem pendinginan bekerja optimal, sehingga temperatur gas selama proses kompresi dapat dijaga lebih mendekati konstan.

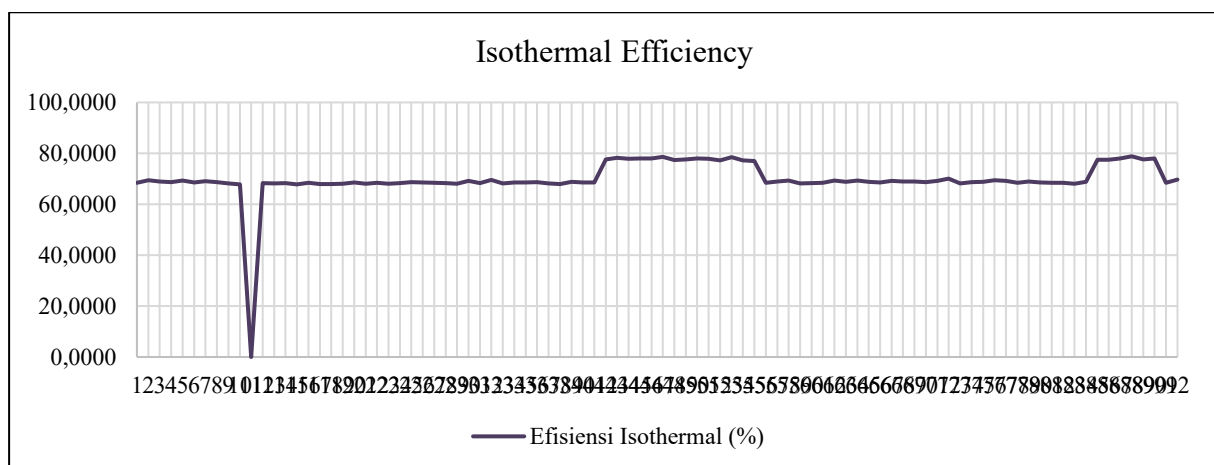
Sebaliknya, terdapat penurunan signifikan pada titik tertentu, terutama saat terjadi transisi beban seperti *minimum load operation* maupun *plant trip*, di mana nilai efisiensi turun drastis. Hal ini disebabkan oleh ketidakseimbangan beban kerja antar *Main Air Compressor*, peningkatan temperatur akibat pendinginan yang kurang optimal, serta fluktuasi laju alir massa udara. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa efisiensi isothermal sangat bergantung pada kestabilan sistem operasi, distribusi beban kompresor, dan performa *cooling water* dalam menjaga temperatur rendah. Kondisi ini sekaligus menegaskan bahwa untuk mencapai efisiensi optimal, diperlukan pengaturan operasi yang konsisten serta sistem pendinginan yang andal.



Gambar 10. Grafik Usaha Isothermal *Main Air Compressor* dengan suhu konstant

Gambar 10 menunjukkan grafik hasil perhitungan usaha isothermal (W_{iso}) dengan suhu *cooling water* pada Main Air Compressor selama periode pengamatan. Secara umum, nilai usaha isothermal berada pada rentang 7.000.000 hingga 9.000.000 kWh, didapatkan rata-rata yaitu 7936,9843 kWh dengan kecenderungan stabil pada kondisi operasi normal. Terlihat adanya penurunan signifikan pada titik tertentu, yang mencerminkan kondisi transien akibat perubahan beban, seperti saat *minimum load operation* maupun *plant trip*, di mana laju alir massa udara yang dikompresi menurun drastis. Pada kondisi *normal operation*, nilai W_{iso} cenderung konstan karena tekanan *inlet* dan *outlet* berada dalam rentang stabil, sehingga kerja kompresi yang dibutuhkan relatif tidak mengalami fluktuasi besar. Sebaliknya, pada kondisi *minimum load*, hanya satu unit Main Air Compressor yang beroperasi sehingga aliran udara terpusat pada satu kompresor, mengakibatkan kebutuhan usaha meningkat dibandingkan operasi *single MAC* dengan beban normal.

Dari analisis ini dapat disimpulkan bahwa usaha isothermal berbanding lurus dengan variasi tekanan dan laju alir massa udara. Semakin besar perbedaan tekanan antara *inlet* dan *outlet*, serta semakin tinggi *flowrate*, maka usaha isothermal yang dibutuhkan untuk proses kompresi juga meningkat. Oleh karena itu, kestabilan sistem pendinginan dan distribusi beban antar kompresor memiliki pengaruh langsung terhadap besarnya usaha isothermal yang dihasilkan.



Gambar 11. Grafik *Isothermal Efficiency Main Air Compressor* dengan suhu konstant

Gambar 11 menunjukkan hasil perhitungan efisiensi isothermal (η_{iso}) dengan suhu konstant pada *Main Air Compressor* selama periode pengamatan. Secara umum, nilai efisiensi isothermal berada pada kisaran 65–77%, dengan rata-rata sebesar 69,8866%. Nilai efisiensi tertinggi yang dicapai adalah 78,8485%, yang terjadi pada saat kondisi operasi normal dengan sistem pendinginan bekerja optimal, sehingga temperatur gas selama proses kompresi dapat dijaga lebih mendekati konstan.

Sebaliknya, terdapat penurunan signifikan pada titik tertentu, terutama saat terjadi transisi beban seperti *minimum load operation* maupun *plant trip*, di mana nilai efisiensi turun drastis. Hal ini disebabkan oleh ketidakseimbangan beban kerja antar *Main Air Compressor*, peningkatan temperatur akibat pendinginan yang kurang optimal, serta fluktuasi laju alir massa udara. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa efisiensi isothermal sangat bergantung pada kestabilan sistem operasi, distribusi beban kompresor, dan performa *cooling water* dalam menjaga temperatur rendah. Kondisi ini sekaligus menegaskan bahwa untuk mencapai efisiensi optimal, diperlukan pengaturan operasi yang konsisten serta sistem pendinginan yang andal.

Tabel 1. Perbandingan Hasil Pengamatan dan Data Design

Kompresor	Satuan	Data Design Suhu <i>Cooling Water</i>	Data Rata-Rata Harian Suhu <i>Cooling Water</i>	Data Design Suhu Konstant	Data Rata-Rata Harian Suhu Konstant
Fasa	(-)	Udara	Udara	Udara	Udara
Komposisi	molar (%)	0,7812	0,7812	0,7812	0,7812
	molar (%)	0,2095	0,2095	0,2095	0,2095
	molar (%)	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093
Berat Molekul	kg/kmol	28,9593	28,9593	28,9593	28,9593
<i>Inlet Pressure</i>	bar	-0,0033	-0,0046	-0,0046	-0,0046
	bar A	1,0100	1,0087	1,0087	1,0087
<i>Outlet Pressure</i>	bar	4,6867	4,5387	4,5387	4,5387
	bar A	5,7000	5,5520	5,5520	5,5520
Suhu	°C	31,0000	30,8000	36,0000	39,3632
	Kelvin	304,1500	303,9500	309,1500	309,5217
<i>Flowrate</i>	Nm ³ /h	140850	145228,1304	140850	145228,1304
	kmol	1,7467	1,8009	1,7467	1,8009
	kg/h	182095	187754,9019	182095	187754,9019
<i>Power Consumption</i>	kWh	10599	11234,2500	10599	11234,2500
Usaha Isothermal	kWh	7643,4596	7793,1814	7769,1124	7936,9843
Efisiensi Isothermal	%	72,1149	68,6203	73,3004	69,8866

Berdasarkan Tabel 1., perbandingan antara data desain dan data rata-rata harian menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan pada nilai efisiensi isothermal. Pada metode dengan acuan temperatur *cooling water*, efisiensi isothermal data desain tercatat sebesar 72,1149%, sedangkan data rata-rata harian turun menjadi 68,6203%. Hal ini mengindikasikan bahwa performa aktual kompresor di lapangan sedikit lebih rendah dibandingkan dengan kondisi perancangan. Penurunan efisiensi ini dapat disebabkan oleh variasi temperatur *cooling*

water yang tidak selalu optimal, sehingga proses kompresi menjadi lebih mendekati adiabatik daripada isothermal.

Sementara itu, pada metode dengan acuan suhu konstan, nilai efisiensi isothermal data desain tercatat sebesar 73,3004%, sedangkan hasil rata-rata harian menunjukkan angka 69,8866%. Pola yang serupa terlihat, yaitu adanya penurunan efisiensi antara kondisi desain dan kondisi aktual. Perbedaan ini menunjukkan bahwa pada kenyataannya, menjaga temperatur gas benar-benar konstan sepanjang proses kompresi sulit dicapai akibat keterbatasan sistem pendinginan dan fluktuasi operasi.

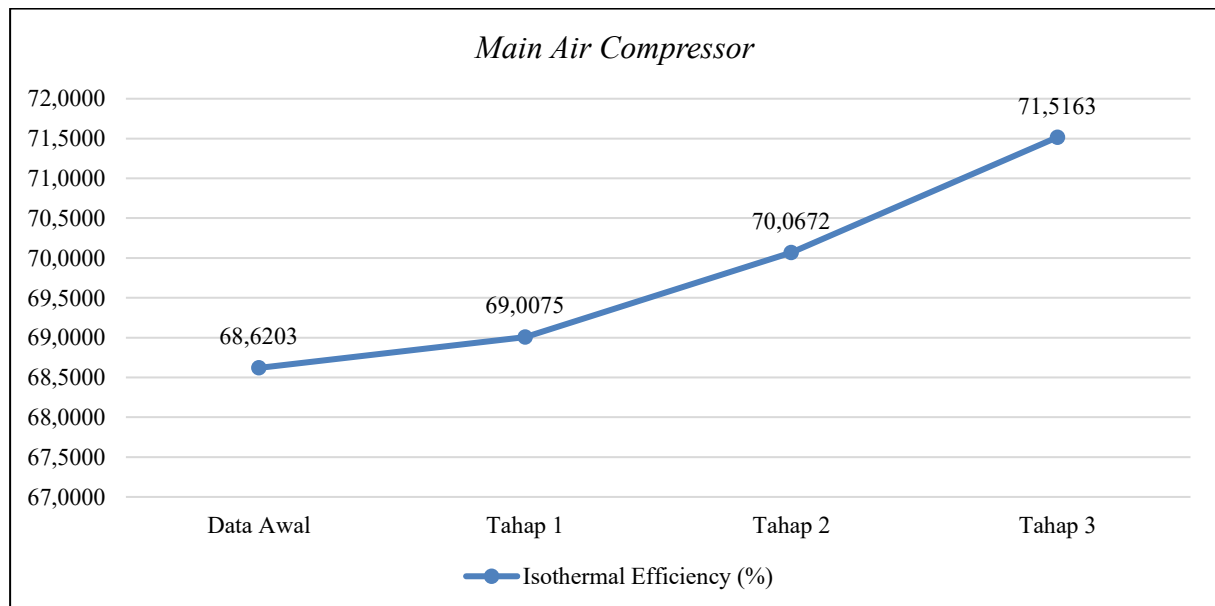
Optimasi efisiensi isothermal pada *Main Air Compressor* dilakukan dengan fokus pada metode perhitungan menggunakan data suhu *cooling water*, karena metode ini dianggap lebih akurat dan merepresentasikan kondisi operasi aktual dibandingkan pendekatan dengan suhu konstan. *Cooling water* berperan penting dalam proses pendinginan udara terkompresi, sehingga semakin rendah suhu *cooling water* yang digunakan, maka kemampuan sistem dalam menurunkan temperatur keluaran kompresor menjadi lebih optimal. Kondisi ini selaras dengan tujuan utama operasi kompresor, yaitu menghasilkan tekanan tinggi dengan temperatur serendah mungkin untuk meningkatkan kinerja proses. Selain itu, melalui upaya penurunan konsumsi daya (*power consumption*), efisiensi energi dapat dicapai sekaligus memberikan keuntungan operasional berupa penghematan biaya energi dan perpanjangan umur peralatan. Dengan demikian, optimasi ini diharapkan mampu meningkatkan performa kompresor secara menyeluruh, baik dari sisi teknis maupun ekonomis.

Tabel 2. Optimasi Efisiensi Isothermal *Main Air Compressor*

Kompresor	Satuan	Data Design Suhu Cooling Water	Data Rata-Rata Harian Suhu Cooling Water	Optimasi <i>Main Air Compressor</i>		
Fasa	(-)	Udara	Udara	Udara	Udara	Udara
Komposisi	molar (%)	0,7812	0,7812	0,7812	0,7812	0,7812
	molar (%)	0,2095	0,2095	0,2095	0,2095	0,2095
	molar (%)	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093
Berat Molekul	kg/kmol	28,9593	28,9593	28,9593	28,9593	28,9593
<i>Inlet Pressure</i>	bar	-0,0033	-0,0046	-0,0040	-0,0035	-0,0033
	bar A	1,0100	1,0087	1,0093	1,0098	1,0100
<i>Outlet Pressure</i>	bar	4,6867	4,5387	4,6569	4,5592	4,6867
	bar A	5,7000	5,5520	5,6702	5,5725	5,7000
Suhu	°C	31,0000	30,8000	30,5000	30,0000	29,5000
	Kelvin	304,1500	303,9500	303,6500	303,1500	302,6500
<i>Flowrate</i>	Nm ³ /h	140850	145228,1304	140850	140850	140850
	kmol	1,7467	1,8009	1,7467	1,7467	1,7467
	kg/h	182095	187754,9019	182095	182095	182095
<i>Power Consumption</i>	kWh	10599	11234,2500	11029	10732	10635
Usaha Isothermal	kWh	7643,4596	7793,1814	7610,8378	7519,6108	7605,7638
Efisiensi Isothermal	%	72,1149	68,6203	69,0075	70,0672	71,5163

Berdasarkan Tabel 2., optimasi yang dilakukan secara bertahap menghasilkan perbaikan kinerja yang terukur pada *Main Air Compressor*. Secara kuantitatif, efisiensi isothermal rata-rata sebelum optimasi tercatat sebesar 68,6203%, sedangkan setelah serangkaian tindakan optimasi nilainya meningkat menjadi 71,5163%. Hal ini menunjukkan adanya kenaikan absolut sebesar 2,8960 poin persentase, atau peningkatan relatif sekitar 4,22% terhadap kondisi rata-rata awal. Selaras dengan itu, konsumsi daya menurun dari 11.234,25 kWh menjadi 10.635 kWh, yang berarti terjadi penghematan energi sebesar 599,25 kWh (5,33%). Sementara itu, temperatur *cooling water* juga mengalami penurunan dari rata-rata 303,95 K (30,8 °C) menjadi 302,65 K (29,5 °C), atau turun sebesar 1,30 K (0,43%) dibandingkan kondisi awal.

Penurunan temperatur *cooling water* menjadi mekanisme utama dalam upaya optimasi ini, karena secara teoritis usaha isothermal berbanding lurus dengan temperatur acuan. Meskipun penurunan suhu rata-rata relatif kecil (sekitar 1,3 K), pengurangan konsumsi daya yang diperoleh lebih signifikan dibandingkan perhitungan berdasarkan rasio temperatur semata. Hal ini menunjukkan bahwa selain penurunan *temperatur cooling water*, terdapat faktor pendukung lain yang turut berperan, seperti pembersihan *intercooler*, peningkatan debit *cooling water*, serta perbaikan efisiensi motor penggerak. Kombinasi intervensi tersebut terbukti mampu menurunkan *losses* baik dari sisi *thermal* maupun mekanis, sehingga menghasilkan peningkatan efisiensi dan penurunan energi yang lebih besar.



Gambar 12. Grafik Optimasi Isothermal Efficiency Main Air Compressor

Gambar 12 menunjukkan bahwa optimasi ini tidak hanya ditujukan untuk meningkatkan kinerja operasional saat ini, tetapi juga diarahkan untuk mengembalikan performa *Main Air Compressor* mendekati kondisi desain awal. Data menunjukkan bahwa efisiensi isothermal desain awal tercatat sebesar 72,1149%, sementara nilai rata-rata harian aktual sebelum optimasi hanya mencapai 68,6203%. Selisih sebesar 3,49 poin persentase tersebut mencerminkan adanya degradasi performa akibat faktor operasional, seperti peningkatan suhu *cooling water*, *fouling* pada *intercooler*, serta bertambahnya *losses* mekanis selama periode operasi.

Setelah dilakukan serangkaian optimasi bertahap melalui penurunan suhu *cooling water*, perbaikan perpindahan panas, dan pengaturan konsumsi daya, efisiensi isothermal berhasil ditingkatkan menjadi 71,5163%, atau hanya berbeda 0,6 poin persentase dari nilai desain. Hal ini membuktikan bahwa strategi optimasi yang diterapkan efektif dalam memulihkan kinerja

Main Air Compressor mendekati kondisi perancangan awal. Pencapaian tersebut juga menegaskan bahwa kompresor masih memiliki integritas mekanis yang baik serta berpotensi dipertahankan kinerjanya melalui strategi operasional yang tepat.

Dengan demikian, optimasi ini dapat dipandang sebagai bentuk rekondisi performa berbasis data operasional aktual, yang tidak hanya meningkatkan efisiensi dalam jangka pendek, tetapi juga memperkuat keandalan *Main Air Compressor* dalam jangka panjang. Pendekatan optimasi bertahap dengan fokus pada penurunan temperatur *cooling water* serta tindakan pendukung lain terbukti mampu meningkatkan efisiensi isothermal secara signifikan sekaligus menurunkan konsumsi energi. Strategi bertahap ini juga memberikan ruang untuk validasi tiap intervensi serta menjaga risiko operasional tetap terkendali, sehingga perbaikan yang dilakukan bersifat andal sekaligus layak secara teknis.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data operasional *Main Air Compressor* (MAC) di PT. XYZ, dapat disimpulkan bahwa optimasi melalui penurunan temperatur *cooling water* dan perbaikan kinerja *intercooler* berhasil meningkatkan efisiensi isothermal kompresor. Efisiensi isothermal rata-rata meningkat dari 68,62% menjadi 71,52%, dengan penghematan konsumsi daya sebesar 5,33%. Temuan ini membuktikan bahwa kinerja aktual kompresor dapat didekatkan kembali ke kondisi desain melalui pendekatan optimasi berbasis data operasional secara sistematis.

Secara umum, penelitian ini memperkuat temuan publikasi terdahulu bahwa efisiensi isothermal pada *Main Air Compressor* (MAC) *multistage* sangat dipengaruhi oleh efektivitas sistem pendinginan. Strategi optimasi yang berfokus pada kontrol temperatur *cooling water* dan stabilitas operasi tidak hanya relevan untuk kasus di PT. XYZ, tetapi juga dapat diadopsi dalam konteks industri serupa, khususnya *Air Separation Unit* (ASU) yang mengandalkan kompresor berdaya tinggi. Implikasi hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan serupa dapat diterapkan secara luas untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi biaya operasional di sektor industri yang bergantung pada sistem udara bertekanan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Kronberg, "Isobaric Expansion Engines–Compressors: Thermodynamic Analysis of Multistage Vapor Driven Compressors," *MDPI Journal Energies*, vol. 16, no. 19, pp. 1-15, Sept. 2023.
- [2] D. Kim, "Optimal Use of Liquefied Natural Gas (LNG) Cold Energy in Air Separation Units," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 57, no. 17 pp. 5914-5923, March. 2018.
- [3] D. Ramachandran, "Development of Efficient Compressors for Turbochargers," dalam *Prosiding ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, Chennai, India, Aug. 2017, pp. 359-368.
- [4] F. Hapsari, "Analisa Efisiensi Kinerja Kompresor Sentrifugal (15-K-103) pada Unit Residue Catalytic Cracking di PTPertamina Internasional Refinery Unit VI Balongan Indramayu," *Jurnal Global Ilmiah*, vol. 1, no. 3, pp. 187-192, Dec. 2023.
- [5] M. Casey. Smith, *Radial Flow Turbocompressor*. Cambridge: Cambridge University, 2021, pp. 106-134.
- [6] M. Hussain, "A review on study of an air compressor," *Asian Journal of Multidimensional Research*, vol. 10, no. 12, pp. 102-109, Feb. 2022.
- [7] M. Pita, "Experimental Investigation of Effects of Motor Speed on Isothermal Efficiency of Water Cooler Two-Stage Compressor," dalam *Prosiding 2021 IEEE 12th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*, Cape Town, South Africa, Jul. 2021, pp. 197-200.

- [8] N. Chirara, "Investigate the Effect of Speed on Two Stage Air Compressor Performance," dalam *Prosiding 2023 IEEE 14th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*, Cape Town, South Africa, Aug. 2023, pp. 316-321.
- [9] R. K. Wardana, "Optimalisasi Kinerja Main Air Compressor Guna Menunjang Kelancaran Pengoperasian Mesin Induk di Kapal KM. Oriental Gold," *Journal of Artificial Intelligence and Digital Business*, vol. 4, no. 2, pp. 2461-2465, Jul. 2025.
- [10] T. Ren, "Experiments on Air Compression with an Isothermal Piston for Energy Storage," *MDPI Journal Energies*, vol. 12, no. 19, pp. 1-13, Sept. 2019.
- [11] V. C. Patil, "Development of an Efficient Compressor for Ocean Compressed Air Energy Storage," dalam *Prosiding OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*, SC, USA, Jan. 2019, pp. 1-6.

Daftar Simbol

η_{iso}	=	Efisiensi Isothermal, %
W_{iso}	=	Usaha Isothermal, kWh
$power_{input}$	=	Konsumsi Daya, kWh
P_1	=	Tekanan Masuk, bar A
P_2	=	Tekanan Keluar, bar A
V_1	=	Volume, m ³
n	=	Molar, kmol
R	=	Konstanta Gas Ideal, J/mol Kelvin
T	=	Suhu, Kelvin