

Contents list available at [Sinta](https://sinta)**A R M A T U R**

: Artikel Teknik Mesin &amp; Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>**Pengaruh temperatur bahan bakar LNG terhadap kinerja turbin gas GT 1.2 di PLTGU Muara Karang****Muhammad Fadly Purwanto<sup>1\*</sup>, Muhammad Ridwan<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi, Institut Teknologi PLN, Menara PLN, Jl. Lkr. Luar Barat Lantai 2, RT.1/RW.1, Duri Kosambi, Kecamatan Cengkareng, Kota Jakarta Barat, Daerah Khusus Jakarta 11750

**A R T I C L E  
I N F O****Keywords:**

Efisiensi,  
Temperatur Bahan Bakar,  
Turbin Gas,  
Fuel Pre-Heating

**A B S T R A C T**

*Efficiency enhancement in Combined Cycle Power Plants (CCPP) is a crucial factor for reducing operational costs and optimizing energy production. One of the key parameters influencing the performance of a gas turbine is the fuel temperature at the combustor inlet. This research aims to quantitatively analyze the effect of fuel temperature variations on the power output, specific fuel consumption (SFC), and thermal efficiency of the GT 1.2 gas turbine. The analysis was conducted using operational data from the Block 1 CCPP of PT Nusantara Power UP Muara Karang under maximum load conditions, with fuel temperature varied from 22°C to 300°C, and validated using Cycle-Tempo software simulation. The results indicate that pre-heating the fuel consistently improves the gas turbine's performance. It was found that the thermal efficiency increased from 32.25 % to 33.19 %, while the specific fuel consumption (SFC) was successfully reduced from 388.21 g/kWh to 376.65 g/kWh. It is concluded that fuel pre-heating is a proven and effective strategy for enhancing efficiency and optimizing gas turbine operations in a CCPP.*

**Pendahuluan**

Peningkatan kebutuhan energi listrik di Indonesia mendorong optimalisasi kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) sebagai salah satu penyokong

utama sistem ketenagalistrikan nasional. Efisiensi operasi menjadi isu penting karena berhubungan langsung dengan konsumsi bahan bakar dan biaya produksi listrik [1]. Salah satu pendekatan yang banyak dikaji adalah pemanfaatan strategi *fuel pre-heating*

\*Corresponding author: [fadly2112047@itpln.ac.id](mailto:fadly2112047@itpln.ac.id)

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i1.10223>

Received 11 September 2025; Received in revised form 24 Oktober 2025; Accepted 27 Desember 2025

Available online 1 Maret 2026

atau pemanasan bahan bakar sebelum masuk ruang bakar turbin gas. Strategi ini terbukti dapat meningkatkan homogenitas pencampuran bahan bakar dengan udara serta menurunkan konsumsi bahan bakar spesifik *specific fuel consumption* (SFC) [2], [3].

PLTGU merupakan pembangkit listrik yang memadukan dua sistem konversi energi, yaitu siklus gas (*gas turbine cycle*) dan siklus uap (*steam turbine cycle*). Pada bagian turbin gas, bahan bakar—umumnya berupa gas alam—dicampurkan dengan udara bertekanan tinggi hasil kompresor dan dibakar di ruang bakar (*combustion chamber*) untuk menghasilkan gas panas berenergi tinggi yang memutar turbin gas. Gas buang turbin gas yang masih memiliki temperatur tinggi kemudian dimanfaatkan untuk memanaskan air di *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG), menghasilkan uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Proses kombinasi ini memungkinkan peningkatan efisiensi pembangkitan secara signifikan dibandingkan sistem *simple cycle*, karena energi panas sisa dari turbin gas tidak terbuang percuma [3]. Grigore et al. [4] menekankan pentingnya optimasi operasi turbin gas melalui pengendalian parameter suhu dan tekanan untuk meningkatkan efisiensi siklus gabungan

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variasi temperatur bahan bakar memengaruhi efisiensi pembakaran dan performa turbin gas. Marin et al. [5] melaporkan bahwa pemanasan bahan bakar mampu meningkatkan efisiensi termal pada sistem *simple cycle*, sementara Antono et al. [6] menegaskan adanya potensi penghematan konsumsi bahan bakar melalui optimalisasi fuel gas heater di PLTGU Grati. Namun, studi yang secara khusus menginvestigasi pengaruh pemanasan bahan bakar pada unit GT 1.2 PLTGU Blok 1 PT PLN Nusantara Power UP Muara Karang masih terbatas. Penelitian Antono et al. [6] di PLTGU Grati menunjukkan bahwa penggunaan *fuel gas heater* meningkatkan efisiensi hingga 1,2%,

menegaskan peran pemanasan bahan bakar dalam penghematan energi. Studi serupa oleh Hendri dan Syammary [7] menegaskan bahwa kestabilan operasi turbin gas sangat dipengaruhi oleh temperatur bahan bakar pada beban tinggi. Namun hingga saat ini belum terdapat kajian kuantitatif yang secara khusus menganalisis pengaruh pemanasan bahan bakar terhadap unjuk kerja turbin gas GT 1.2 di PLTGU Muara Karang menggunakan pendekatan siklus Brayton aktual. Hal ini menjadi dasar perlunya penelitian lebih lanjut untuk memberikan pemahaman mendalam mengenai efek termodinamika pemanasan bahan bakar terhadap performa turbin gas di unit tersebut.

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi secara kuantitatif pengaruh perubahan temperatur bahan bakar terhadap efisiensi termal dan *specific fuel consumption* (SFC) pada turbin gas GT 1.2 di PLTGU Muara Karang. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan siklus Brayton aktual yang divalidasi melalui simulasi perangkat lunak Cycle-Tempo. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi acuan dalam upaya optimasi sistem pemanasan bahan bakar pada unit-unit PLTGU di Indonesia guna meningkatkan efisiensi operasional serta menekan konsumsi bahan bakar.

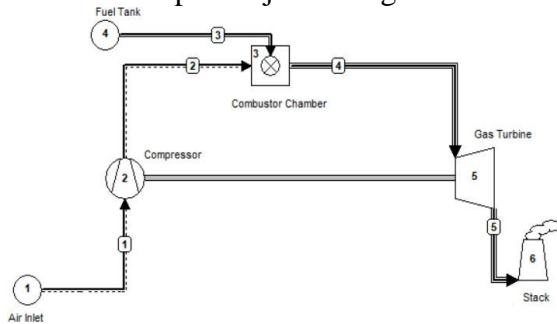
## Metode Penelitian

Jenis, Waktu dan Tempat. Penelitian ini merupakan studi analisis kuantitatif berbasis data sekunder dengan pendekatan perhitungan termodinamika dan simulasi numerik. Penelitian dilaksanakan di PT PLN Nusantara Power UP Muara Karang pada unit PLTGU Blok 1 yang berlokasi di Pluit Karang Ayu No.1, Jakarta Utara. Kegiatan penelitian berlangsung selama empat bulan, yaitu mulai bulan April hingga Juli 2025.

## Tahapan Penelitian.

Tahapan penelitian ini diawali dengan studi literatur dan observasi awal. Studi literatur dilakukan untuk mengkaji teori dasar mengenai turbin gas, prinsip

kerja *Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap* (PLTGU), serta konsep siklus Brayton yang menjadi dasar perhitungan. Observasi awal difokuskan pada kondisi operasi turbin gas GT 1.2 di PLTGU Blok 1 UP Muara Karang, khususnya pada pengaruh temperatur bahan bakar terhadap efisiensi. Hasil studi literatur dan observasi digunakan untuk merumuskan fokus penelitian, yaitu menganalisis efek variasi temperatur bahan bakar terhadap kinerja turbin gas.



Gambar 1 Siklus Bryton

Setelah fokus penelitian ditetapkan, dilakukan pengumpulan data. Data yang digunakan berupa data sekunder hasil *performance test* dan catatan operasi turbin pada kondisi beban maksimum 90 MW. Selain itu, diperoleh pula data tambahan dari spesifikasi teknis turbin gas serta manual book pembangkit. Variasi temperatur bahan bakar yang dianalisis adalah 22°C (aktual), 100°C, 200°C, dan 300°C. Temperatur bahan bakar yang tinggi memperbaiki kestabilan nyala api dan efisiensi pembakaran, namun perlu dikontrol untuk mencegah peningkatan emisi Nox[8].

Tahap berikutnya adalah pengolahan data. Perhitungan dilakukan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel* dengan menerapkan persamaan siklus Brayton untuk memperoleh parameter termodinamika, seperti entalpi ( $h_1-h_4$ ), kerja kompresor, kerja turbin, daya bersih, efisiensi termal, *heat rate*, dan *specific fuel consumption* (SFC). Validasi hasil perhitungan manual dilakukan dengan perangkat lunak *Cycle-Tempo* untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih representatif terhadap kondisi aktual.

Selanjutnya dilakukan analisis data dengan cara membandingkan hasil

perhitungan manual dan hasil simulasi. Analisis difokuskan pada tren perubahan efisiensi termal, *heat rate*, SFC, dan daya keluaran akibat variasi temperatur bahan bakar. Dari analisis ini dapat diketahui sejauh mana pemanasan bahan bakar berpengaruh terhadap kinerja turbin gas.

Tahap akhir adalah penarikan kesimpulan, yang merangkum hasil penelitian sekaligus memberikan rekomendasi teknis bagi pengoperasian PLTGU. Kesimpulan menekankan pada potensi penerapan pemanasan bahan bakar sebagai strategi peningkatan efisiensi energi dan penghematan konsumsi bahan bakar di PLTGU Muara Karang.

### Rumus dan Parameter Perhitungan

Efisiensi termal turbin gas dihitung dengan membandingkan kerja bersih terhadap masukan kalor, sebagaimana pada Persamaan (1):

$$\eta_{ttg} = \frac{W_{netto}}{\dot{Q}_{in}} \times 100 \% \quad (1)$$

Konsumsi bahan bakar spesifik (*Specific Fuel Consumption*, SFC) dihitung dari rasio laju aliran massa bahan bakar terhadap daya keluaran turbin gas, sesuai Persamaan (2):

$$SFC = \frac{m_{fuel}}{p} \quad (2)$$

Untuk memasukkan pengaruh variasi temperature bahan bakar membutuhkan nilai  $\Delta h$ .  $\Delta h$  merupakan perubahan entalpi yang terjadi ketika suatu zat dipanaskan atau didinginkan tanpa mengubah wujud atau komposisi kimianya. Energi yang diserap atau dilepaskan ini disebut kalor sensibel. Prosesnya sebagai berikut:

Menghitung  $C_p$  dari tiap variasi temperature bahan bakar dengan menggunakan table *A-2 Ideal-gas specific heats of various common gases* dari buku *THERMODYNAMICS: An Engineering Approach* [3] dengan rumus

$$Cp = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (3)$$

Cp adalah kapasitas kalor spesifik pada tekanan konstan (*Specific Heat Capacity at Constant Pressure*). Cp adalah ukuran yang menunjukkan berapa banyak energi panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu 1 kilogram suatu zat sebesar 1 derajat Celcius, sementara tekanan pada zat tersebut dijaga agar tetap konstan.

Setelah mendapatkan nilai Cp untuk setiap komponen, selanjutnya menghitung Cp dengan persentase komposisi bahan bakarnya (yi. Cp).

$$yi. Cp = yi \times Cp \quad (4)$$

Selanjutnya menghitung persentase komponen dengan massa mol nya.

$$yi. M = yi \times M \quad (5)$$

Setelah mendapatkan nilai Cp per persentase dan massa mol perpersentase, selanjutnya menghitung Cp<sub>mix</sub>. Cp<sub>mix</sub> adalah total dari yi.Cp dengan satuan kJ/kmol.K. Cara untuk mengkonversi satuannya adalah

$$Cp_{mix} = \frac{Cp_{mix} (kj.kmol.k)}{yi.M(kg/kmol)} \quad (6)$$

Berikutnya kita dapat mencari perubahan energi dari hasil pemanasan bahan bakar gas. Setiap kilogram bahan bakar yang lebih panas kini membawa energi total yang lebih tinggi. Energi panas tambahan yang diserap oleh bahan bakar ini disebut entalpi sensible ( $\Delta h$ ). Rumus untuk mencari  $\Delta h$  adalah

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} Cp(T)dT \quad (7)$$

Namun menghitung integral secara manual bisa jadi rumit karena fungsi Cp(T) seringkali berbentuk polinomial kompleks. Maka dari itu rumus  $\Delta h$  disederhanakan menggunakan pendekatan nilai rata-rata. Maka  $\Delta h$  dapat dihitung dengan rumus:

$$\Delta h = Cp_{avg} \times \Delta T \quad (8)$$

dengan

$$Cp_{avg} = \frac{Cp_{mix \text{ suhu aktual}} + Cp_{mix \text{ variasi}}}{2} \quad (9)$$

Nilai  $\Delta h$  yang diperoleh kemudian dijadikan dasar untuk menghitung perubahan laju alir massa bahan bakar ( $\dot{m}_{fuel}$ ) pada tiap variasi temperatur, yang selanjutnya digunakan dalam analisis efisiensi termal dan SFC.

Menghitung *flow* bahan baru yang sudah diperhitungkan penghematan

$$\dot{m}_{hemat} = \frac{\dot{m}_{fuel} \times \Delta h}{LHV} \quad (10)$$

dan

$$\dot{m}_{fuel \text{ baru}} = \dot{m}_{fuel} - \dot{m}_{hemat} \quad (11)$$

Jadi untuk memasukkan perhiungan variasi temperatur bahan bakar adalah dengan mengurangi laju aliran massa bahan bakar.

## Hasil dan Pembahasan

Data sekunder dalam penelitian ini diperoleh dari data *Performance Test* pada bulan Oktober tahun 2025 di Blok 1 PT PLN Nusantara Power UP Muara Karang, khususnya pada unit GT 1.2, yang menggunakan bahan bakar gas alam (LNG). Penelitian ini difokuskan pada kondisi operasi beban maksimal (90 MW), serta variasi temperature bahan bakar yaitu 22°C (aktual), 100°C, 200°C dan 300°C

Tabel 1 Data *Performance Test*

No	Parameter	Simbol	Satuan	Temperatur Bahan Bakar (22 °C)
1	Temperatur masuk kompresor	T1	°C	34.070
			K	307.220
2	Tekanan masuk kompresor	P1	Bar	1
			Mbar	1004.638
3	Temperatur keluar kompresor	T2	°C	365.910
			K	639.060
4	Tekanan keluar kompresor	P2	Bar	9.540
5	Temperatur keluar turbin	T4	°C	555.040
			K	828.190

No	Parameter	Simbol	Satuan	Temperatur
				Bahan Bakar (22 °C)
6	Low Heating Value	LHV	kJ/kg	44978.111
			mmbtu/scf	1203836.391
7	Tekanan Bahan bakar	$P_{fuel}$	Bar	22.300
8	Laju Aliran Massa Bahan Bakar	$m_{fuel}$	kg/s	9.705

Dan tabel komposisi bahan bakar LNG sebagai berikut:

Tabel 2 Komposisi Bahan Bakar LNG

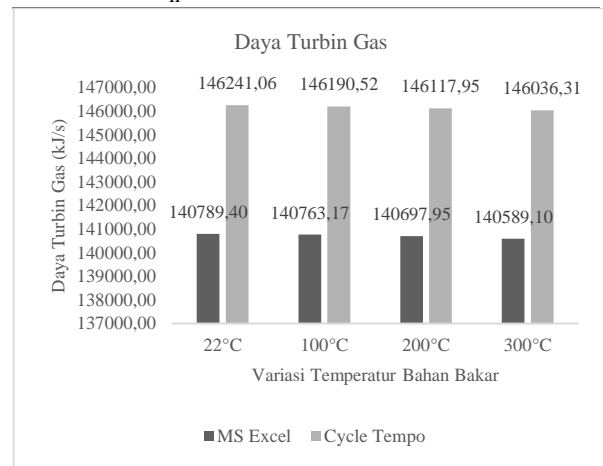
Komponen	$y_i$ (awal)	M (kg/kmol)
<b>C3H8</b>	0.01041334	44.097
<b>i-C4H10</b>	0.00195209	58.123
<b>n-C4H10</b>	0.00244321	58.123
<b>C5H12</b>	0.00123155	72.150
<b>CO2</b>	0.00620436	44.010
<b>C2H6</b>	0.02551361	30.070
<b>N2</b>	0.00300919	28.014
<b>CH4</b>	0.94923278	16.040

Dari data *Performance Test* dan tabel komposisi bahan bakar diatas, maka didapatkan hasil sebagai berikut

Tabel 3 Hasil Perhitungan

No	Parameter	Satuan	Temperatur Bahan Bakar			
			22°C	100°C	200°C	300°C
1.	$Q_{in}$	kJ/s	436524.020	434822.480	430592.117	423531.3044
2.	$\dot{m}_{gas}$	kg/s	444.1028	444.065	443.971	4
3.	$Q_{out}$	kJ/s	242294.100	242273.460	242222.150	242136.5
4.	$W_{ta}$	kJ/s	307934.070	307907.840	307842.630	307733.78
5.	$W_{netto}$	kJ/s	140789.400	140763.170	140697.950	140589.1
6.	Efisiensi turbin gas	%	32.252	32.373	32.675	33.1945
7.	Back to	%	54.279	54.284	54.295	54.3147

No	Parameter	Satuan	Temperatur Bahan Bakar			
			22°C	100°C	200°C	300°C
8.	Work Ratio Heat Rate Netto Aktual	kJ/kWh	11161.966	11120.529	11017.443	10845.1698
9.	SFC	gr/kWh	388.210	386.697	382.935	376.655483



Gambar 2 Grafik Daya Turbin

Gambar 2 menunjukkan perbandingan daya keluaran turbin gas ( $W_{netto}$ ) pada setiap variasi temperatur. Terdapat dua tren yang kontras namun sama-sama penting untuk dianalisis:

- Hasil Perhitungan Manual:

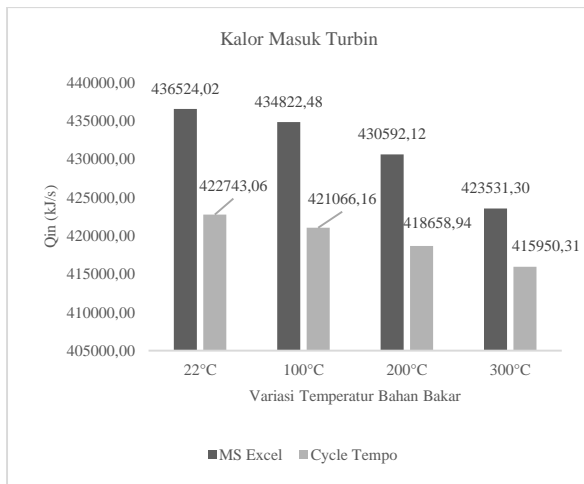
Menunjukkan adanya sedikit penurunan daya seiring kenaikan temperatur bahan bakar, dengan total penurunan sebesar 200,3 kW. Penurunan ini secara teoritis terjadi karena laju alir massa bahan bakar ( $\dot{m}_{fuel}$ ) yang lebih rendah menyebabkan total laju alir massa gas ( $\dot{m}_{gas}$ ) yang berekspansi di turbin juga ikut berkurang.

- Hasil Simulasi *Cycle-Tempo*:

Menunjukkan adanya penurunan daya, dengan total penurunan sebesar 204,75 kW. Hasil simulasi ini dianggap lebih akurat karena modelnya yang lebih kompleks memperhitungkan bahwa energi yang ditambahkan melalui pemanasan bahan bakar adalah energi berkualitas tinggi.

Dikarenakan laju aliran massa bahan bakar yang merurun maka terjadilah pengurangan massa gas buang. Oleh karena itu, kesimpulan yang diambil adalah

pemanasan bahan bakar memberikan penurunan terhadap daya keluaran.



Gambar 3 Grafik Kalor Masuk Turbin

Gambar 3 menunjukkan tren penurunan kalor yang masuk ( $Q_{in}$ ) pada kedua metode perhitungan.

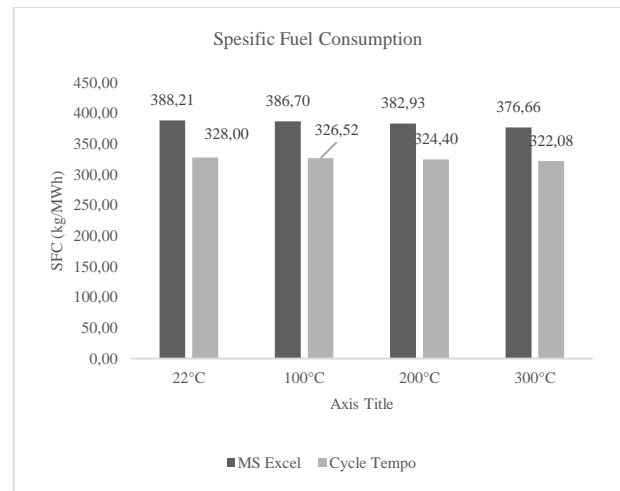
- Hasil Perhitungan Manual:

Menunjukkan penurunan sebesar 12.992,72 kJ/s. Penurunan kalor masuk ( $Q_{in}$ ) disebabkan oleh laju aliran massa bahan bakar ( $\dot{m}_{fuel}$ ) yang menurun setiap kenaikan temperature bahan bakar

- Hasil Simulasi *Cycle-Tempo*:

Juga menunjukkan penurunan yang signifikan sebesar 6.792,5 kJ/s.

Tren penurunan  $Q_{in}$  ini merupakan konsekuensi langsung dari peningkatan efisiensi termal. Ketika sistem menjadi lebih efisien, energi panas yang diperlukan dari bahan bakar untuk menghasilkan daya bersih ( $W_{netto}$ ) menjadi lebih kecil. Dengan kata lain, strategi pemanasan bahan bakar memungkinkan sistem menghasilkan output kerja yang sama dengan pasokan energi yang lebih rendah, sehingga konsumsi energi total berkurang. Hal ini menjadi indikasi kuat bahwa metode optimasi tersebut mampu meningkatkan pemanfaatan energi secara lebih efektif.



Gambar 4 Grafik Konsumsi Bahan Bakar

Gambar 4 menunjukkan salah satu hasil paling signifikan dari penelitian ini, yaitu penurunan konsumsi bahan bakar spesifik (SFC).

$$SFC = \frac{m_{fuel}}{p} \quad (2)$$

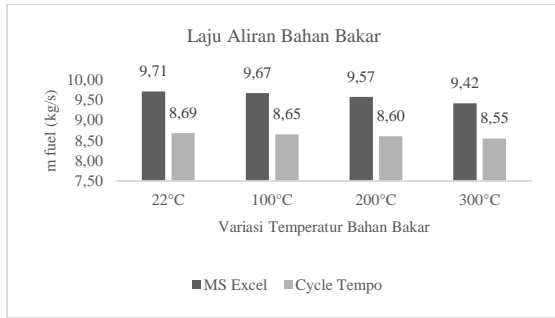
- Hasil Perhitungan Manual:

Menunjukkan penurunan SFC sebesar 11,55 g/kWh atau 2,97% ketika menggunakan bahan bakar bertemperatur 300°C.

- Hasil Simulasi *Cycle-Tempo*:

Menunjukkan penurunan SFC sebesar 5,56 g/kWh atau 1,80% ketika menggunakan bahan bakar bertemperatur 300°C.

SFC adalah indikator langsung dari kehematan sebuah pembangkit, yang mengukur berapa banyak bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu unit energi listrik. Penurunan nilai SFC membuktikan bahwa setelah bahan bakar dipanaskan, turbin gas menjadi lebih hemat. Ini terjadi karena laju alir bahan bakar ( $\dot{m}_{fuel}$ ) turun secara signifikan sementara daya keluaran ( $W_{netto}$ ) relatif stabil. Penurunan SFC ini berimplikasi langsung pada penghematan biaya operasional pembangkit.[5], [9]



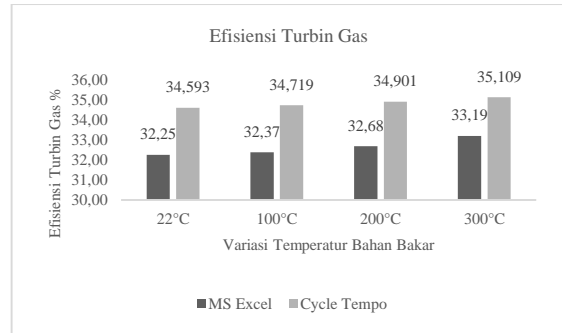
Gambar 5 Grafik Laju Aliran Bahan Bakar

Gambar 5 menampilkan akar penyebab dari semua perubahan kinerja yang diamati, yaitu penurunan laju alir massa bahan bakar ( $\dot{m}_{fuel}$ ) seiring kenaikan temperatur.

$$\eta_{ttg} = \frac{W_{netto}}{\dot{Q}_{in}} \times 100 \% \quad (1)$$

- Hasil Perhitungan Manual:  
Menunjukkan penurunan total sebesar 0,29 kg/s.
- Hasil Simulasi *Cycle-Tempo*:  
Menunjukkan penurunan total sebesar 0,139 kg/s.

Penurunan ini terjadi karena energi yang ditambahkan ke bahan bakar melalui proses pemanasan awal ( $\Delta h$ ) berfungsi sebagai substitusi energi yang seharusnya didapat dari pembakaran. Dengan kata lain, karena bahan bakar sudah "membawa" sebagian energi dalam bentuk panas, maka massa bahan bakar yang perlu dibakar untuk mencapai target energi yang sama menjadi lebih sedikit[9]. Konsep singkatnya adalah Ketika bahan bakar di panaskan maka bahan bakar tersebut akan memuai. Ketika bahan bakar memuai itu berarti bahan bakar tersebut memiliki volume yang lebih banyak namun dengan massa jenis atau densitas yang lebih rendah. Gambar 5 memvalidasi langkah perhitungan fundamental dan menjadi dasar untuk semua analisis selanjutnya.



Gambar 6 Grafik Efisiensi Termal

Gambar 6 merangkum kesimpulan utama dari penelitian ini. Kedua metode perhitungan secara konsisten menunjukkan adanya kenaikan efisiensi termal turbin gas.

- Hasil Perhitungan Manual:  
Menunjukkan kenaikan efisiensi total sebesar 0,942%.
- Hasil Simulasi *Cycle-Tempo*:  
Menunjukkan kenaikan efisiensi total sebesar 0,516%.

Efisiensi termal, yang merupakan rasio antara daya bersih yang dihasilkan ( $W_{netto}$ ) terhadap energi panas dari bahan bakar yang dikonsumsi ( $Q_{in}$ ), meningkat karena penurunan  $Q_{in}$  jauh lebih signifikan secara persentase dibandingkan perubahan pada  $W_{netto}$ . Namun pada Simulasi menggunakan *Cycle Tempo*, efisiensi dihitung dari *gross power output* generator yang di bagi dengan  $Q_{in}$  sedangkan jika menggunakan rumus efisiensi thermal menggunakan daya turbin atau  $W_{netto}$ . Maka ada perbedaan hasil efisiensi dari perhitungan manual menggunakan *MS. Excel* dan simulasi menggunakan *Cycle Tempo*. Fenomena ini membuktikan hipotesis utama penelitian yaitu, pemanasan bahan bakar adalah strategi yang efektif dan terbukti secara termodinamika untuk meningkatkan efisiensi siklus Brayton pada unit GT 1.2. Analisis termodinamika siklus gabungan menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi turbin gas berdampak langsung pada efisiensi total sistem PLTGU[10].

## Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemanasan bahan bakar (*fuel pre-heating*) berpengaruh nyata terhadap kinerja turbin

gas GT 1.2 di PLTGU Muara Karang. Hasil perhitungan manual dengan *Microsoft Excel* memperlihatkan peningkatan efisiensi termal sebesar 0,94%, dari 32,25% pada temperatur 22°C menjadi 33,19% pada 300°C, disertai penurunan *Specific Fuel Consumption* sekitar 11,5 g/kWh. Hasil simulasi *Cycle-Tempo* juga menunjukkan tren serupa, dengan peningkatan efisiensi sebesar 0,48% dan penurunan laju massa bahan bakar dari 8,69 kg/s menjadi 8,55 kg/s. Daya keluaran turbin relatif stabil, dengan sedikit perbedaan arah tren antara hasil manual dan simulasi.

Namun, perlu diperhatikan bahwa peningkatan temperatur bahan bakar hingga 300°C memerlukan suplai energi tambahan untuk proses pemanasannya. Oleh karena itu, meskipun efisiensi termal turbin meningkat, secara keseluruhan perlu dilakukan evaluasi terhadap keseimbangan energi total untuk memastikan bahwa keuntungan efisiensi tidak terkompensasi oleh kebutuhan energi pemanas.

Secara umum, hasil penelitian ini membuktikan bahwa pemanasan bahan bakar dapat meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan konsumsi bahan bakar, sehingga berpotensi menjadi strategi optimasi operasi PLTGU. Penelitian lanjutan disarankan mencakup analisis neraca energi sistem pemanas dan studi keekonomian untuk menilai kelayakan implementasi *fuel pre-heating* secara praktis di lapangan.

. Penelitian lanjutan dapat difokuskan pada verifikasi eksperimental di lapangan dan analisis keekonomian untuk menilai kelayakan implementasi secara praktis.

## Referensi

[1] K. Abudu, U. Igie, O. Minervino, and R. Hamilton, "Gas turbine efficiency and ramp rate improvement through compressed air injection," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol.

- 235, no. 4, pp. 866–884, Jun. 2021, doi: 10.1177/0957650920932083.
- [2] H. K. Wiest and S. D. Heister, "Experimental Study of Gas Turbine Combustion With Elevated Fuel Temperatures," *J Eng Gas Turbine Power*, vol. 136, no. 12, Dec. 2014, doi: 10.1115/1.4027907.
- [3] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *THERMODYNAMICS: An Engineering Approach*, 8th ed. McGraw-Hill Education, 2015.
- [4] R. Grigore, A. Hazi, I. V. Banu, S. E. Popa, and S. G. Vernica, "Enhancing the Energy Performance of a Gas Turbine: Component of a High-Efficiency Cogeneration Plant," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 19, p. 4860, Sep. 2024, doi: 10.3390/en17194860.
- [5] G. Marin, D. Mendeleev, B. Osipov, and A. Akhmetshin, "Study of the effect of fuel temperature on gas turbine performance," *E3S Web of Conferences*, vol. 178, p. 01033, Jul. 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202017801033.
- [6] V. Antono, R. A. Diantari, and Y. Kriswanto, "Kajian Kelayakan Penambahan Fuel Gas Heatergas Turbin Tipe M701D Untuk Meningkatkan Efisiensi PLTGU Grati," *Jurnal Powerplant*, vol. 3(1), pp. 56–61, 2019.
- [7] Hendri and R. Syammary, "Analisis Efisiensi Turbin Gas Tipe V94.2 Sebelum Dan Sesudah Minor Inspection Pada Blok 4 Unit 3 Pltgu Muara Tawar," *JURNAL POWERPLANT*, vol. 8, no. 2, pp. 71–81, Nov. 2020, doi: 10.33322/powerplant.v8i2.1077.
- [8] A. Liu, Q. Liu, X. Wang, L. Xi, and K. Liu, "Study on combustion performance of microgas turbine combustor with different fuels," *Energy Sci Eng*, vol. 11, no. 7, pp. 2642–2653, Jul. 2023, doi: 10.1002/ese3.1480.

- [9] D. M. Erickson, S. A. Day, and R. Doyle, *GE Power System: Design Consideration for Heated Gas Fuel*. General Electric, 2003.
- [10] V. Mrzljak, I. Poljak, J. Prpić-Oršić, and M. Jelić, “Exergy analysis of marine waste heat recovery CO<sub>2</sub> closed-cycle gas turbine system,” 2020.