

## **Analisis Kinerja Turbin Gas MS7001EA**

**Valentin Andi Mulyono**

Program Profesi Insinyur, Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang

email: andi.mulyono@gmail.com

### **Abstrak**

Turbin gas adalah salah satu komponen utama di dalam proses pencairan gas alam yang digunakan untuk menggerakkan kompresor pendingin sehingga kinerja dari turbin gas sangat mempengaruhi kinerja proses pencairan gas alam secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan pemantauan kinerja dari turbin gas untuk memastikan bahwa kinerjanya masih optimal dan turbin gas beroperasi dalam batas desain operasinya. Tujuan penelitian ini adalah untuk menerapkan suatu metode pemantauan kinerja turbin gas yang mencakup kinerja termodinamika dan parameter rotordinamika. Kinerja termodinamika pada turbin gas dihitung dengan menggunakan pendekatan siklus termodinamika ideal untuk turbin gas, yaitu siklus Brayton; sedangkan parameter rotordinamika dipantau melalui parameter getaran, posisi aksial rotor, dan temperatur bantalan dari turbin gas. Metode pemantauan kinerja termodinamika turbin gas ini diterapkan dengan menggunakan perangkat lunak Microsoft® Excel® untuk turbin gas MS7001EA. Data-data yang diperlukan untuk menghitung kinerja termodinamika dan untuk memantau parameter rotordinamika ini didapatkan melalui perangkat lunak P2® Explorer yang terhubung secara daring ke sensor-sensor yang terpasang pada turbin gas. Metode pemantauan kinerja ini berhasil diterapkan pada turbin gas MS7001EA sehingga bisa mendapatkan kinerja termodinamika dan parameter rotordinamika.

**Kata Kunci : turbin gas, termodinamika, rotordinamika, Brayton, getaran.**

### **Abstract**

*Gas turbine is one of the main components in the natural gas liquefaction process which is used to drive the refrigeration compressors and its performance greatly affects the overall performance of the natural gas liquefaction process. Therefore, it is necessary to monitor the performance of the gas turbine to ensure that it is performing optimally and that the gas turbine is operating within the design limits. The objective of this research is to apply a method for gas turbine performance monitoring that includes thermodynamic performance and rotordynamic parameters. The thermodynamic performance of a gas turbine is calculated using the ideal thermodynamic cycle approach for gas turbines, Brayton cycle; while, the rotordynamic parameters are monitored through the vibration, rotor axial position, and bearing temperature of the gas turbine. This gas turbine thermodynamic performance monitoring method is applied using Microsoft® Excel® software for gas turbine MS7001EA. The data needed to calculate thermodynamic performance and to monitor rotordynamic parameters are obtained through the P2® Explorer software which is connected online to the instrumentation that installed on the gas turbine. This performance monitoring method has been successfully applied to the MS7001EA gas turbine so that it can obtain thermodynamic performance and rotordynamic parameters.*

**Keywords: gas turbines, thermodynamic, rotor dynamic, Bryton, vibration.**

## PENDAHULUAN

Proses pencairan gas alam melibatkan proses pendinginan, di mana gas alam akan didinginkan ke temperatur minus 160 °C di tekanan atmosfer sehingga fasanya akan berubah dari fasa gas ke fasa cair yang dinamakan gas alam cair atau *liquified natural gas* (LNG). Tergantung pada prosesnya, jenis pendingin (*refrigerant*) yang digunakan untuk mendinginkan akan berbeda tetapi peralatan utama yang digunakan akan serupa. Peralatan utama yang digunakan adalah penukar panas (*heat exchanger*), kompresor, ekspander, dan katup. Selain itu, terdapat peralatan yang digunakan untuk menggerakkan kompresor, yaitu turbin gas, turbin uap, dan motor listrik.

Oleh karena turbin gas adalah salah satu komponen utama di dalam proses pencairan gas alam yang digunakan untuk menggerakkan kompresor, maka diperlukan pemantauan kinerja dari turbin gas tersebut sehingga proses pencairan gas alam dapat selalu dijaga agar bisa berlangsung sesuai dengan desainnya. Turbin gas MS7001EA adalah salah satu turbin gas buatan Baker Hughes (sebelumnya bernama General Electric) yang banyak dipakai di kilang pencairan gas alam. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan digunakan data-data dari turbin gas MS7001EA untuk menerapkan metode pemantauan kinerja turbin gas.

## METODE PENELITIAN

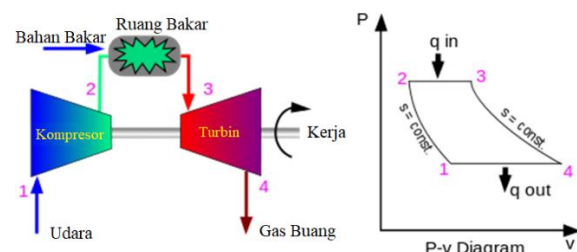
Pada penelitian ini, pemantauan kinerja turbin gas akan dilakukan berdasarkan kinerja termodinamika dan parameter rotordinamika. Metode yang dipakai untuk memantau kinerja termodinamika maupun parameter rotordinamika dari turbin gas akan ditentukan terlebih dahulu, kemudian akan dilakukan verifikasi terhadap ketersediaan data-data yang diperlukan

untuk memantau kinerja tersebut. Jika ada data-data yang tidak tersedia, maka akan dilakukan tinjauan mengenai kemungkinan menggunakan metode atau pendekatan yang lain. Setelah menentukan metode dan verifikasi data-data yang diperlukan, maka khusus untuk kinerja termodinamika, perhitungannya akan diterapkan dalam bentuk spreadsheet di Microsoft® Excel® untuk menghitung kinerja termodinamika.

## KINERJA TERMODINAMIKA

Turbin gas terdiri dari tiga bagian utama, yaitu bagian kompresor, ruang bakar dan turbin. Kompresor berfungsi untuk menaikkan tekanan udara yang kemudian akan dimasukan ke ruang bakar. Di dalam ruang bakar udara bertekanan akan dicampur dengan bahan bakar yang kemudian dibakar. Gas hasil pembakaran akan diteruskan ke bagian turbin yang menghasilkan kerja mekanikal yang bisa digunakan untuk menggerakkan beban, misalnya menggerakkan generator ataupun kompresor yang lain.

Siklus termodinamika ideal untuk turbin gas yang umum digunakan untuk industri adalah siklus Brayton yang dapat dilihat pada Gambar 1. Siklus ini dimulai dengan proses kompresi isentropik, pembakaran pada tekanan konstan, ekspansi isentropik, dan diakhiri dengan proses pelepasan panas pada tekanan konstan.



**Gambar 1**  
**Siklus Brayton**  
([id.wikipedia.org/wiki/Turbin\\_gas](https://id.wikipedia.org/wiki/Turbin_gas))

Kinerja dari kompresor dapat dipantau berdasarkan efisiensi proses kompresi isentropik dan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) berikut.

$$\eta_c = \frac{\left[ R_c^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} - 1 \right]}{\left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)} \quad (1)$$

di mana:

$\eta_c$  = efisiensi isentropik kompresor (%)

$R_c$  = rasio kompresi dari titik 1 ke 2

$k$  = *specific heat ratio* dari udara

$T_2$  = temperatur udara setelah kompresi (K)

$T_1$  = temperatur udara sebelum kompresi (K)

Untuk menghitung energi yang masuk ke dalam ruang bakar, dapat dilakukan dengan menggunakan nilai *heat capacity* pada tekanan konstan ( $c_p$ ) dan kenaikan temperatur di ruang bakar. Persamaan (2) berikut ini digunakan untuk menghitung energi yang masuk ke ruang bakar.

$$W_{cb} = (\dot{m}_c + \dot{m}_f)c_p(T_3 - T_2) \quad (2)$$

di mana:

$W_{cb}$  = *heat input* ke ruang bakar (kW)

$\dot{m}_c$  = laju massa udara (kg/s)

$\dot{m}_f$  = laju massa bahan bakar (kg/s)

$T_2, T_3$  = temperatur di titik 2 dan 3 (K)

$c_p$  = *heat capacity* pada tekanan konstan (kJ/kg.K)

Daya neto turbin gas adalah selisih dari daya yang dihasilkan dari proses ekspansi di bagian turbin dan daya yang diperlukan untuk proses kompresi di bagian kompresor seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (3) sampai (5) berikut.

$$P_{net} = P_t - P_c \quad (3)$$

$$P_t = (\dot{m}_c + \dot{m}_f)c_p(T_3 - T_4) \quad (4)$$

$$P_c = \dot{m}_c c_p(T_2 - T_1) \quad (5)$$

di mana:

$P_{net}$  = daya neto turbin gas (kW)

$P_c$  = daya yang diperlukan kompresor (kW)

$P_t$  = daya yang dihasilkan turbin (kW)

$T_1, T_4$  = temperatur di titik 1 dan 4 (K)

$c_p$  = *heat capacity* pada tekanan konstan (kJ/kg.K)

Laju massa udara dihitung dengan menggunakan persamaan (6) yang didapat dari pembuat turbin gas MS7001A. Persamaan ini diturunkan berdasarkan dimensi dari saluran udara masuk kompresor yang disebut dengan bagian *bellmouth*.

$$\dot{m}_c = 0,45 \sqrt{\frac{2gP_{bar}\Delta P}{\Re T_1}} \left( \frac{A_{bellmouth} X_{corr}}{(1+q) Y_{corr}} \right) \quad (6)$$

di mana:

$\dot{m}_c$  = laju masa udara (kg/sec)

$2g$  = dua kali konstanta gravitasi (ft/sec<sup>2</sup>)

$P_{bar}$  = tekanan atmosfer (psi)

$\Delta P$  =  $P_{bar} - P_{bell}$  (psi)

$P_{bell}$  = Tekanan setelah bagian *bellmouth* kompresor (psi)

$\Re$  = konstanta gas

$T_1$  = temperatur udara masuk kompresor (Rankine)

$A_{bellmouth}$  = luas area bagian *bellmouth* (in<sup>2</sup>)

$X_{corr}$  = koefisien koreksi bagian *bellmouth*

$q$  = *specific humidity*

$Y_{corr}$  = koefisien koreksi *air flow humidity*

Berdasarkan nilai energi yang masuk ke ruang bakar ( $W_{cb}$ ) dan daya neto turbin gas ( $P_{net}$ ), maka efisiensi keseluruhan dari turbin gas dan efisiensi *power turbine* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (7) dan (8) berikut.

$$\eta_{th} = \frac{P_{net}}{W_{cb}} \quad (7)$$

$$Power\ Turbine\ Eff = \frac{P_t}{W_{cb}} \quad (8)$$

di mana:

$\eta_{th}$  = efisiensi keseluruhan (%)

### PARAMETER ROTORDINAMIKA

Turbin gas beroperasi pada kecepatan dan beban yang tinggi. Oleh karena itu, selain pemantauan kinerja termodinamika, juga diperlukan pemantauan parameter rotordinamika. Analisis secara keseluruhan diperlukan untuk memastikan bahwa turbin gas beroperasi dengan optimal dan di dalam batas desain operasinya.

Parameter rotordinamika di turbin gas umumnya tercermin dari ciri getaran yang muncul. Oleh karena itu terdapat hubungan antara berbagai penyebab karakteristik rotordinamika dengan ciri getaran yang muncul. Contoh faktor-faktor yang dapat menyebabkan getaran pada turbin gas adalah sebagai berikut:

- *Rotor Unbalance*
- *Hydraulic or aerodynamic unbalance*
- *Rotor rub*
- *Bearings*
- *Casing deformation*
- *Whirling motion*

Pemantauan parameter rotor-dinamika turbin gas dilakukan berdasarkan parameter-parameter berikut:

- Getaran *seismic* dari *casing* turbin gas
- Getaran relatif dari turbin gas
- Gerakan aksial dari turbin gas
- Temperatur bantalan turbin gas

Dalam prakteknya, setiap parameter di atas akan mempunyai dua nilai batas, yaitu:

- Batas *alarm* yang akan memberi peringatan ke operator turbin gas bahwa ada sesuatu yang tidak normal dan harus dicek lebih detail.
- Batas *trip* yang merupakan batas di mana turbin gas akan dimatikan secara otomatis oleh sistem proteksi untuk keamanan turbin gas dan keselamatan personel di sekitarnya.

### DATA

Tabel 1 menunjukkan data yang tersedia di lapangan yang bisa digunakan untuk menghitung efisiensi kompresor dengan menggunakan persamaan (1). Data-data tersebut bisa didapatkan melalui perangkat lunak P2<sup>®</sup> Explorer yang terhubung secara daring ke instrumentasi yang terpasang pada turbin gas. Selanjutnya, *specific heat ratio* (k) pada persamaan (1) dihitung dari nilai k rata-rata pada kondisi  $T_1$  dan  $T_2$ . Dari hasil perhitungan tersebut, didapat nilai k rata-rata sebesar 1,39. Berdasarkan verifikasi data-data yang tersedia, maka perhitungan efisiensi kompresor dan rasio kompresi kemudian diterapkan ke dalam *spreadsheet* di Microsoft<sup>®</sup> Excel<sup>®</sup> untuk mendapatkan nilainya.

**Tabel 1**  
**Data Perhitungan Efisiensi Kompresor**

Data	Deskripsi	Nomor Instrumentasi	Satuan
$P_{bar}$	Tekanan atmosfer	XXX-PI-4195 A/B/C	kg/cm <sup>2</sup> A
$P_{s1}$	Tekanan udara masuk (perbedaan terhadap tekanan atmosfer)	XXX-PDIC-4025	mmH <sub>2</sub> O
$P_{t1}$	Tekanan udara keluar kompresor	XXX-PI-4027 A/B/C	kg/cm <sup>2</sup> G
$T_1$	Temperatur udara masuk kompresor	XXX-TI-4083 A/B	°C
$T_2$	Temperatur udara keluar kompresor	XXX-TI-4082 A/B/C	°C

(Pignone, 2010)

**Tabel 2**  
**Data Perhitungan Efisiensi Turbin Gas**

Data	Deskripsi	Nomor Instrumentasi	Satuan
$P_{bar}$	Tekanan atmosfer	XXX-PI-4195-A/B/C	kg/cm <sup>2</sup> A
$P_{bell}$	Tekanan setelah <i>bellmouth</i> kompresor	XXX-PDI-4026	mmH <sub>2</sub> O
$T_3$	Temperatur gas hasil pembakaran	XXX-TI-RF1	°C
$T_4$	Temperatur gas keluar turbin	XXX-TI-4086 A/B/C	°C
$m_f$	Laju masa bahan bakar gas	XXX-FI-1081	m <sup>3</sup> /jam

(Pignone, 2010)

Tabel 2 menunjukkan data yang tersedia di lapangan yang digunakan untuk menghitung menggunakan persamaan (2) sampai (8). Data-data tersebut bisa didapatkan melalui perangkat lunak P2<sup>®</sup> Explorer yang terhubung secara daring ke instrumentasi yang terpasang pada turbin gas. Sementara itu, asumsi yang dipakai untuk nilai  $c_p$  pada proses di kompresor adalah 1,005 kJ/kg.K dan pada proses di turbin adalah 1,148 kJ/kg.K. Selain itu, nilai masa jenis bahan bakar yang dipakai adalah 0,73 kg/m<sup>3</sup>. Berdasarkan verifikasi data-data yang tersedia, maka perhitungan efisiensi turbin gas keseluruhan dan efisiensi *power turbine* diterapkan ke dalam *spreadsheet* di Microsoft<sup>®</sup> Excel<sup>®</sup> untuk mendapatkan nilainya.

Parameter-parameter rotordinamika yang tersedia di lapangan dapat dilihat pada Tabel 3, sedangkan Tabel 4 menunjukkan batas alarm dan trip dari tiap parameter-parameter tersebut. Parameter-parameter tersebut bisa didapatkan melalui perangkat lunak P2<sup>®</sup> Explorer yang terhubung secara daring ke instrumentasi yang terpasang pada turbin gas.

**Tabel 3**  
**Parameter Rotordinamika Turbin Gas**

Deskripsi	Nomor Instrumentasi	Satuan
Getaran <i>seismic</i> roda gigi aksesoris	XXX-VI-4047 / 4048	mm/s Pk
Getaran <i>seismic</i> bantalan radial no 1	XXX-VI-4055 /4056	mm/s Pk
Getaran <i>seismic</i> bantalan radial no 2	XXX-VI-4059	mm/s Pk
Getaran <i>seismic</i> bantalan radial no 3	XXX-VI-4051 /4052	mm/s Pk
Getaran relatif bantalan radial no 1	XXX -VI-4100 X/Y	µm pp
Getaran relatif bantalan radial no 2	XXX -VI-4101 X/Y	µm pp
Getaran relatif bantalan radial no 2	XXX -VI-4102 X/Y	µm pp
Getaran relatif bantalan radial no 3	XXX -VI-4103 X/Y	µm pp
Posisi aksial turbin gas	XXX -ZI-4098 A/B	mm
Temperatur bantalan radial no 1	XXX -TI-4106 A/B	°C
Temperatur bantalan radial no 1	XXX -TI-4111 A/B	°C
Temperatur bantalan radial no 2	XXX -TI-4107 A/B	°C
Temperatur bantalan radial no 2	XXX -TI-4110 A/B	°C
Temperatur bantalan radial no 3	XXX -TI-4108 A/B	°C
Temperatur bantalan radial no 3	XXX -TI-4109 A/B	°C
Temperatur bantalan aksial sisi aktif	XXX -TI-4104 A/B	°C
Temperatur bantalan aksial sisi aktif	XXX -TI-4113 A/B	°C
Temperatur bantalan aksial sisi non aktif	XXX -TI-4105 A/B	°C
Temperatur bantalan aksial sisi non aktif	XXX -TI-4112 A/B	°C

(Pignone, 2010)

**Tabel 4**  
**Batas Alarm dan Trip Parameter Rotordinamika Turbin Gas**

Nomor Instrumentasi	Satuan	Batas Alarm	Batas Trip
XXX-VI-4047 / 4048	mm/s Pk	12,7	25,4
XXX -VI-4055 /4056	mm/s Pk	12,7	25,4
XXX -VI-4059	mm/s Pk	12,7	25,4
XXX -VI-4051 /4052	mm/s Pk	12,7	25,4
XXX -VI-4100 X/Y	µm pp	150	Tidak ada
XXX -VI-4101 X/Y	µm pp	150	Tidak ada
XXX -VI-4102 X/Y	µm pp	150	Tidak ada
XXX -VI-4103 X/Y	µm pp	150	Tidak ada
XXX -ZI-4098 A/B	mm	< -0,5 dan > 0,5	< -0,7 dan > 0,7
XXX -TI-4106 A/B	°C	115	Tidak ada
XXX -TI-4111 A/B	°C	115	Tidak ada
XXX -TI-4107 A/B	°C	115	Tidak ada
XXX -TI-4110 A/B	°C	115	Tidak ada
XXX -TI-4108 A/B	°C	115	Tidak ada
XXX -TI-4109 A/B	°C	115	Tidak ada
XXX -TI-4104 A/B	°C	115	Tidak ada
XXX -TI-4113 A/B	°C	115	Tidak ada
XXX -TI-4105 A/B	°C	115	Tidak ada
XXX -TI-4112 A/B	°C	115	Tidak ada

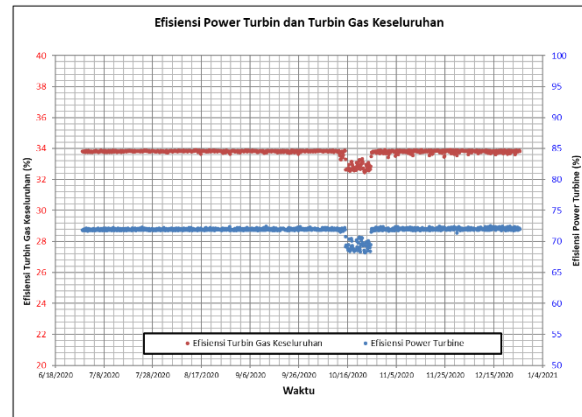
(Pignone, 2007)

## HASIL PEMANTAUAN

Gambar 2 dan 3 menunjukkan *trending* efisiensi kompresor dan rasio kompresi yang diplot bersama dengan posisi IGV selama 6 bulan terakhir. Terlihat bahwa efisiensi kompresor stabil di antara 87,5% sampai 88,5% dan tidak terlihat adanya

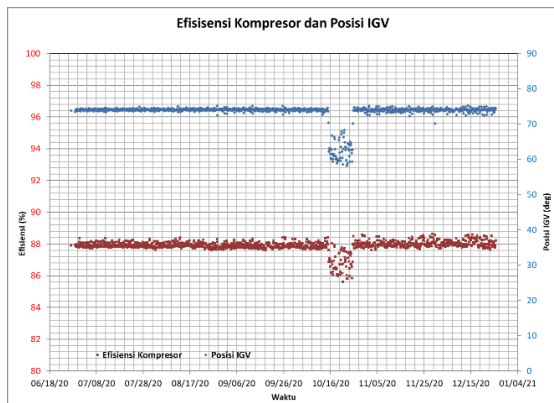
indikasi penurunan efisiensi. Hal yang sama juga terlihat pada nilai rasio kompresi yang stabil antara 11 sampai 11,5. Penurunan yang terlihat pada periode 15 Oktober 2020 sampai 25 Oktober 2020 disebabkan karena beban turbin gas sengaja diturunkan untuk keperluan proses.

Gambar 4 menunjukkan *trending* efisiensi power turbine dan efisiensi keseluruhan dari turbin gas selama 6 bulan terakhir. Terlihat bahwa efisiensi power turbine stabil di antara 71,8% sampai 72,5%; sedangkan efisiensi keseluruhan turbin gas stabil di antara 33,5% sampai 34%. Selain itu, selama 6 bulan terakhir tidak terlihat adanya indikasi penurunan efisiensi. Sama halnya dengan kompresor, penurunan yang terlihat pada periode 15 Oktober 2020 sampai 25 Oktober 2020 disebabkan karena beban turbin gas sengaja diturunkan untuk keperluan proses.

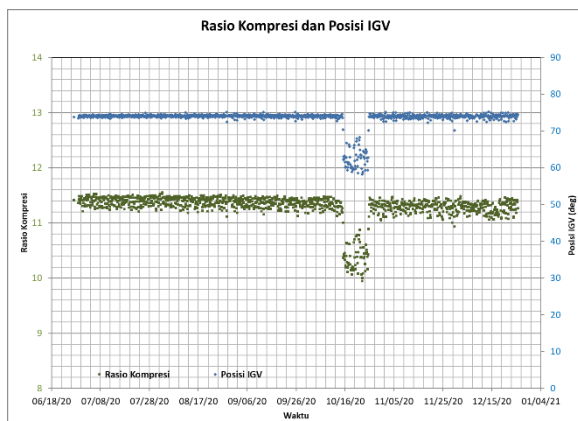


**Gambar 4**  
**Efisiensi Power Turbine dan Turbin Gas Keseluruhan**

*Trending* getaran *seismic* selama 6 bulan terakhir dapat dilihat pada Gambar 5, di mana terlihat bahwa nilai getaran *seismic* selalu di bawah batas alarm dan tidak ada indikasi peningkatan. Hal lain yang bisa dilihat adalah fluktuasi terbesar terjadi pada bacaan sensor 051-VI-4051 yang berlokasi di bantalan nomor 3 dari turbin gas. Akan tetapi, dengan mempertimbangkan bacaan yang rendah dan stabil dari sensor 051-VI-4052 yang lokasinya berjarak sekitar 20 cm dari 051-VI-4051 dan terletak pada permukaan yang sama, maka hal ini mengindikasikan adanya masalah instrumentasi di sensor 051-VI-4051.



**Gambar 2**  
**Efisiensi Kompresor dan Posisi IGV**



**Gambar 3**  
**Rasio Kompresi dan Posisi IGV**

Gambar 6 menunjukkan *trending* getaran relatif di mana nilainya selalu di bawah batas alarm selama 6 bulan terakhir dan tidak ada indikasi peningkatan. Akan tetapi, terindikasi adanya dua sensor yang rusak yaitu 051-VI-4101Y dan 051-VI-4102Y di mana bacaannya mendekati nol. Indikasi getaran yang rendah dan stabil ini juga diperkuat dengan *trending* temperatur bantalan radial yang juga rendah dan stabil yang dapat dilihat pada Gambar 7. Hal lain yang bisa dilihat adalah bacaan temperatur 051-TI-4108A dan B relatif lebih rendah sekitar 12°C dari 051-TI-4109A dan 051-TI-4109B yang keempatnya membaca temperatur bantalan nomor 3 dari turbin gas. Hal ini perlu

diklarifikasi pada saat inspeksi berikutnya pada turbin gas dengan pengecekan lokasi pemasangan dan melakukan kalibrasi sensor.

Posisi aksial dari turbin gas juga menunjukkan posisi yang stabil dan selalu di dalam batas alarm. Hal ini diperkuat juga dengan bacaan temperatur bantalan aksial yang stabil dan di bawah batas alarm. Gambar 8 menunjukkan *trending* kedua parameter di atas selama 6 bulan terakhir.

## KESIMPULAN

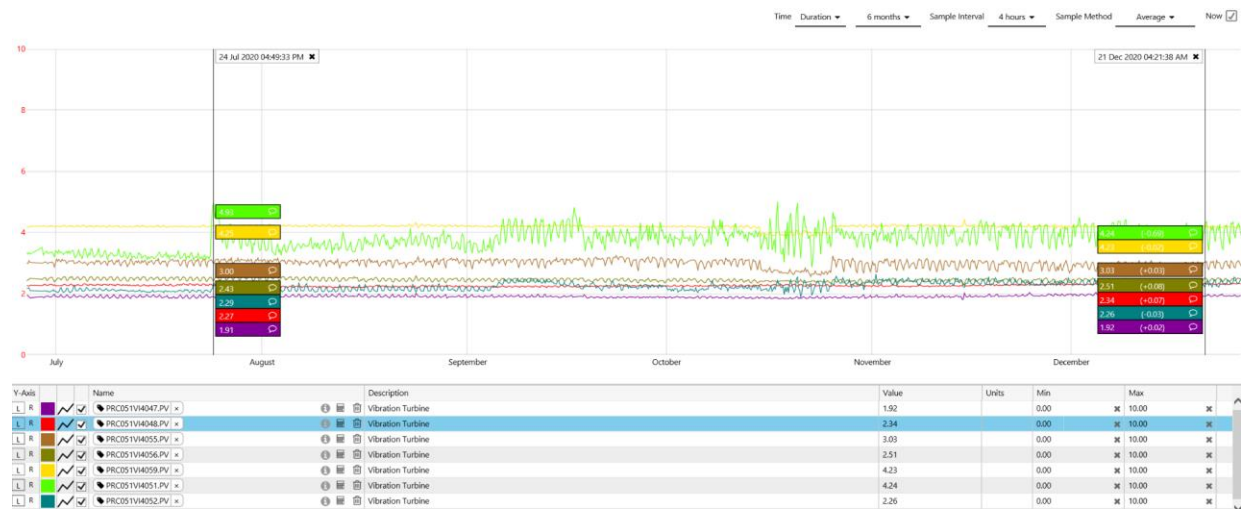
Metode pemantauan kinerja turbin gas yang mencakup kinerja termodinamika dan parameter rotordinamika berhasil diterapkan pada turbin gas MS7001EA. Dengan menggunakan metode tersebut, kinerja termodinamika dan parameter rotordinamika berhasil dipantau. Data turbin gas yang digunakan pada penelitian ini menunjukkan kondisi turbin gas yang stabil dan dalam batas desain operasinya. Untuk perbaikan berkelanjutan disarankan untuk menggunakan perangkat lunak Palantir<sup>®</sup> dalam pemantauan kinerja turbin gas baik kinerja termodinamika maupun

parameter rotordinamika sehingga perhitungan selalu dapat dilakukan secara langsung tanpa melalui transfer data ke dalam spreadsheet di Microsoft<sup>®</sup> Excel<sup>®</sup>.

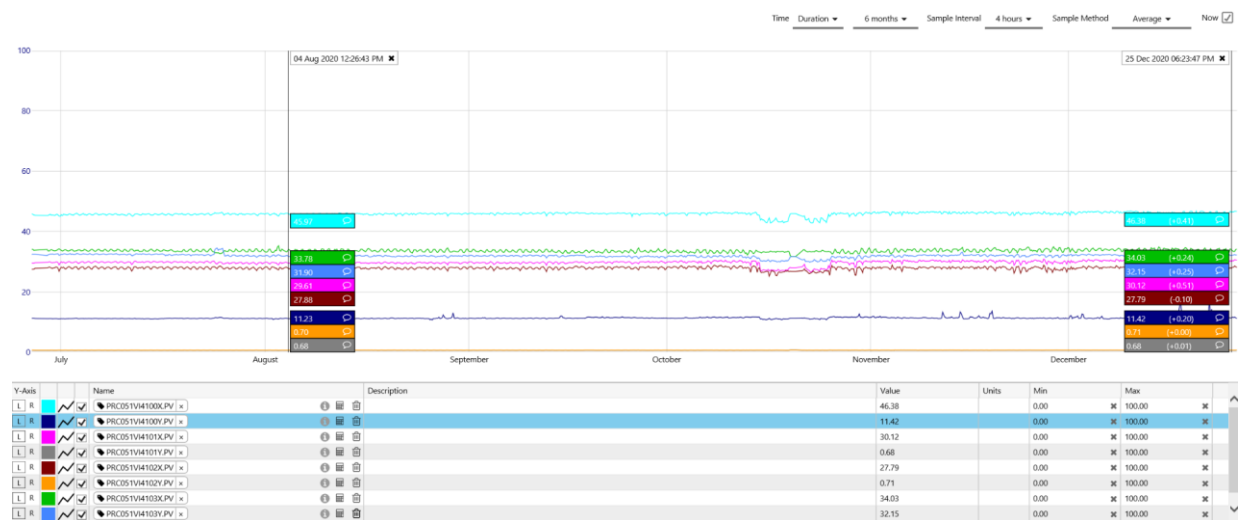
## DAFTAR PUSTAKA

- Boyce, M. P. (2012): *Gas Turbine Engineering Handbook*, Elsevier, 869.
- Gambar contoh turbin gas industri diperoleh dari situs internet: <https://www.ge.com/power/gas/gas-turbines/7f-05>. Diunduh pada tanggal 12 Desember 2020 pukul 12:00 WIT.
- Gambar Siklus Brayton diperoleh dari situs internet: [https://id.wikipedia.org/wiki/Turbin\\_gas](https://id.wikipedia.org/wiki/Turbin_gas). Diunduh pada tanggal 12 Desember 2020 pukul 12:15 WIT.
- Pignone, N. (2010): 51-NPC-091 *Gas Turbine Schematic Piping Diagrams*.
- Pignone, N. (2007): 51-NPC-129 *Instrument List*.
- Rivera, V., Aduku, A., dan Harris, O. (2008): *Evaluation of LNG Technologies*, Chemical Engineering, University of Oklahoma, 27.
- Saravanamuttoo, H.I.H., Rogers, G.F.C., Cohen, H., Straznicky P.V. (2009): *Gas Turbine Theory*, Prentice Hall.

## Lampiran

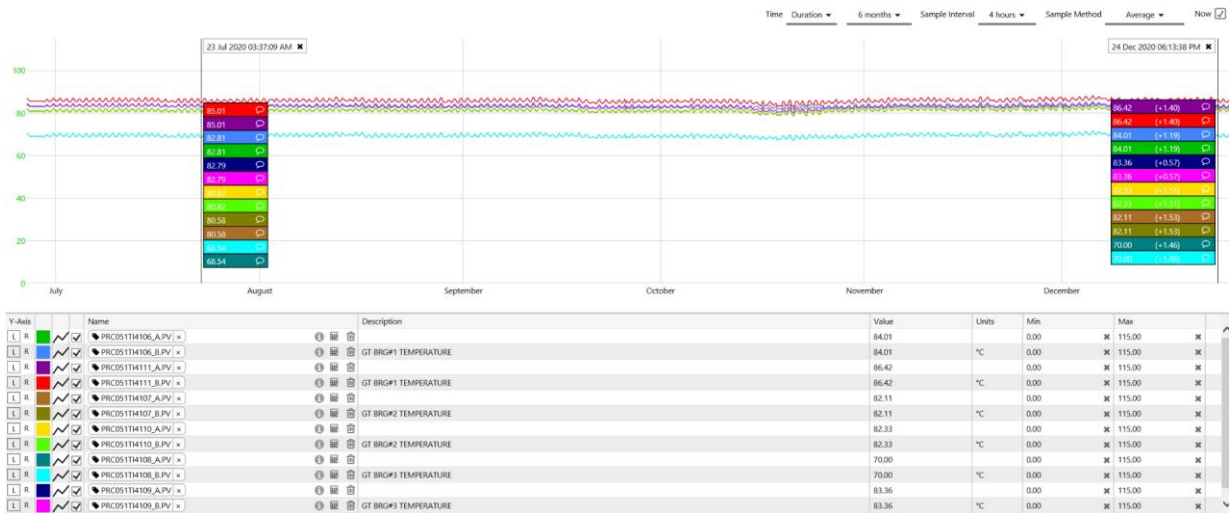


**Gambar 5**  
**Getaran Seismic**

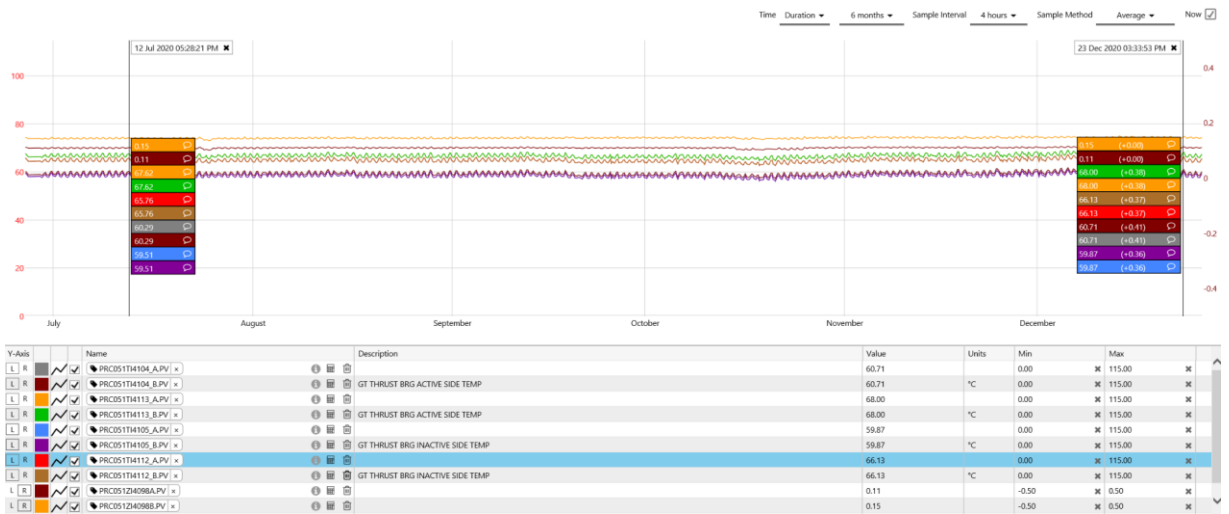


**Gambar 6**  
**Getaran Relatif**





**Gambar 7**  
**Temperatur Bantalan Radial**



**Gambar 8**  
**Posisi Aksial dan Temperatur Bantalan Aksial**