



PERAWATAN TURBIN SEBELUM DAN SESUDAH *COMBUSTION INSPECTION* DI PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK GAS

Nabilah Mahfuzah^{a*}, Semilir Tara Difpa^a, Husin Ibrahim^b

^aProgram Studi Teknik Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 2015, Indonesia

^bProgram Studi Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 2015, Indonesia

*Corresponding authors at: E-mail: nabilahmahfuzah@students.polmed.ac.id (N. Mahfuzah) Tel.: +62 812-6287-9052

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 01 Oktober 2023

Direvisi pada 13 November 2023

Disetujui pada 13 Desember 2023

Tersedia daring pada 02 Maret 2024

Kata kunci:

Combustion inspection, overhaul, nozel, turbin gas, efisiensi.

Keywords:

Combustion inspection, overhaul, nozlee turbine gas, efficiency

ABSTRAK

PT PLN Nusantara Power PLTG Glugur merupakan perusahaan listrik negara yang memiliki pembangkit listrik tenaga gas unit *Jhon Brown Engineering*. Penggunaan unit dalam jangka panjang dan dilakukan terus menerus akan menyebabkan penurunan efisiensi kinerja unit tersebut. Maka dari itu dibutuhkan pemeliharaan dan perbaikan terhadap unit agar unit kembali ke efisiensi kinerja normal. Pada unit turbin gas *Jhon Brown Engineering* ini dilakukan kegiatan *overhaul* salah satunya yaitu *combustion inspection*. *Combustion inspection* yang dilakukan adalah pengecekan terhadap *combuster*. Perawatan yang dilakukan adalah pembersihan dan perbaikan yang dilakukan adalah *penggantian (roll in dan roll out)* pada pipa *Nozzle*, *nozle* gas dan minyak, *combuster*, *transition piece*, *manhole*, dan *ignitor*. Daya yang dihasilkan turbin mengalami kenaikan sebesar 25912,16 Kj/s. Data ini merupakan data dengan nilai yang tertinggi apabila dibandingkan dengan daya konsumsi bahan bakar. Konsumsi bahan bakar mengalami penurunan sebesar 0,0196 kg/kWh.

ABSTRACT

In addition to being a state-owned electricity utility, PT PLN Nusantara Power PLTG Glugur is also the owner of a gas power plant unit created by *Jhon Brown Engineering*. Using the unit for an extended period of time and in a continuous manner will result in a deterioration in the device's performance efficiency. In order for the unit to recover to its usual level of performance efficiency, necessary maintenance and repairs are required to be performed on the unit. Overhaul activities were carried out at the gas turbine unit owned and operated by *Jhon Brown Engineering*. One of the activities that was carried out was a combustion inspection. An examination of the combuster is part of the combustion inspection that is carried out. Cleaning and repairs are performed on the nozzle pipe, gas and oil nozzle, combuster, transition piece, manhole and ignitor. The maintenance that is performed includes cleaning, and the repairs that are performed include replacement (*roll in and roll out work*). A 25912.16 kJ/s increase was observed in the power that was generated by the turbine. This data is the data that has the largest value when compared to the power consumption during fuel use. The amount of fuel consumed dropped by 0.0196 kg/kWh.

1. PENGANTAR

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan sebuah pembangkit listrik yang menggunakan peralatan atau mesin turbin gas sebagai penggerak generatornya. Turbin gas dirancang dan dibuat dengan prinsip kerja yang sederhana dimana energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar diubah menjadi energi mekanis dan selanjutnya diubah menjadi energi listrik atau energi lainnya sesuai dengan kebutuhannya (Leda, 2010). PLTG atau turbin gas merupakan mesin dengan proses pembakaran dalam (*internal combustion*). Bahan bakar berupa minyak dibakar di dalam ruang pembakaran (*combustor*). Udara bertekanan dan bahan bakar secara bersamaan disemprotkan ke ruang pembakaran untuk melakukan proses pembakaran. Gas panas ini berfungsi sebagai fluida kerja yang memutar roda turbin bersudu yang terkopel dengan generator sinkron kemudian mengubah energi mekanis menjadi energi listrik (Leda, 2010).

Pembangkit listrik tenaga gas di Indonesia salah satunya berada di Glugur. Turbin gas beroperasi pada suhu yang sangat tinggi untuk jangka waktu yang sangat lama, dengan kondisi tersebut, kinerja turbin gas akan terus menurun. Untuk menjaga kestabilan peralatan turbin gas perlu dilakukan perawatan secara maksimal yaitu dengan melakukan *preventive maintenance*, *predictive maintenance* dan *overhaul*. Tiga hal ini dapat didekati dan dihitung dengan pengujian efisiensi gas dan riwayat proses pemeliharaan yang telah dan akan dilakukan. Untuk menjaga kestabilan pembangkit listrik, maka pemeliharaan harus bersifat preventif, prediktif dan menyeluruh untuk mengetahui kondisi *engine* sebenarnya.

Umumnya proses pembangkitan listrik di PLTG adalah menggunakan siklus yaitu siklus *brayton* untuk PLTG. Berdasarkan observasi yang dilakukan di Unit Layanan Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Glugur, maka penulis mengambil topik “Analisis Kinerja *Combustion Inspection* di PLTG Glugur”. Alasan dipilihnya judul ini adalah untuk mengetahui kinerja turbin gas yang pada PLTG Glugur sebelum dan sesudah dilakukan *combustion inspection*. Proses *combustion inspection* merupakan bagian dari pemeliharaan untuk menjaga kinerja turbin PLTG agar tetap stabil pada daya maksimumnya.

1.1. Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) adalah salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan turbin sebagai penggerak utama dan gas sebagai fluida kerjanya. Turbin gas adalah sebuah mesin yang menggunakan gas panas hasil pembakaran bahan bakar dan udara bertekanan tinggi untuk menggerakkan turbin. Turbin gas bekerja dengan mengubah energi kinetik dari gas dengan tekanan tinggi menjadi energi mekanik yang akan memutar sudu-sudu yang terdapat pada turbin. Turbin dirancang pada poros yang sejajar dengan generator, sehingga akibat perputaran poros menimbulkan energi mekanik yang akan diubah menjadi energi listrik (Matius, 2015).

Pada proses pembakaran membutuhkan tiga unsur utama, yaitu: udara, bahan bakar, dan panas. Bahan bakar untuk PLTG tidak harus selalu berbentuk gas, namun juga bisa berbentuk *liquid*. Bahan bakar tersebut terkadang mengandung unsur kimia yang bersifat korosif, sehingga dapat merusak material komponen turbin gas. Temperatur pembakaran yang lebih tinggi akan menghasilkan efisiensi yang tinggi juga. Faktor yang membatasi tingginya temperatur pada PLTG adalah kemampuan material yang membentuk komponen turbin gas tersebut. Maka jenis material yang digunakan pada komponen turbin gas haruslah tahan korosi dan tahan menghadapi temperatur yang tinggi

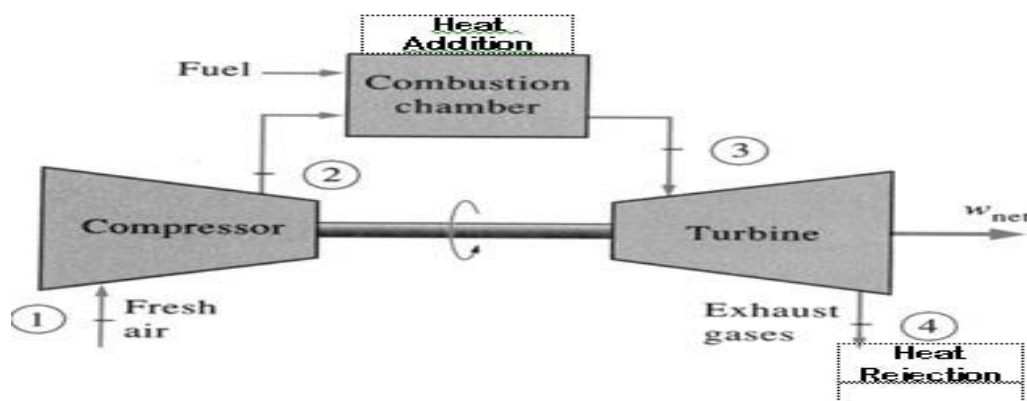
1.2. Prinsip Kerja PLTG

Turbin gas pada PLTG berfungsi untuk mengubah energi yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi mekanis. Fluida kerja untuk memutar turbin gas adalah gas panas yang diperoleh dari proses pembakaran. Proses pembakaran memerlukan tiga unsur utama yaitu:

- a) Bahan Bakar
- b) Udara
- c) Panas

Dalam proses pembakaran ini bahan bakar disuplai oleh pompa bahan bakar (*fuel oil pump*) apabila digunakan bahan bakar minyak, atau oleh kompresor gas apabila menggunakan bahan bakar gas alam (Moran, 2012). Pada umumnya kompresor gas disediakan oleh pemasok gas tersebut. Udara untuk pembakaran diperoleh dari kompresor udara, sedangkan panas untuk awal pembakaran dihasilkan oleh *ignitor* (busi). Proses pembakaran dilaksanakan didalam *combustion chamber* (ruang bakar). Energi mekanis yang dihasilkan oleh turbin gas digunakan untuk memutar generator listrik, sehingga diperoleh energi listrik. Tentu saja untuk dapat berjalannya operasi PLTG dengan baik perlu dilengkapi dengan alat-alat bantu, kontrol, instrumentasi, proteksi, dan sebagainya (Marsudi, 2011).

Udara masuk ke kompresor dinaikkan tekanannya menjadi kira-kira 13 kg/cm^2 kemudian udara tersebut dialirkan ke ruang bakar. Dalam ruang bakar, udara bertekanan 13 kg/cm^2 ini dicampur dengan bahan bakar dan dibakar. Apabila digunakan bahan bakar gas (BBG), maka gas dapat langsung dicampur dengan udara untuk dibakar, tetapi apabila digunakan bahan bakar minyak (BBM), maka BBM ini harus dijadikan kabut terlebih dahulu kemudian baru dicampur dengan udara untuk dibakar. Teknik mencampur bahan bakar dengan udara dalam ruang bakar sangat mempengaruhi efisiensi pembakaran Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 berikut ini :



Gambar 1: Prinsip kerja PLTG

Selain masalah pendinginan, operasi turbin gas yang menggunakan gas hasil pembakaran dengan suhu sekitar 1.300°C memberi risiko korosi suhu tinggi, yaitu bereaksinya logam *kalium*, *vanadium*, dan *natrium* yang terkandung dalam bahan bakar dengan bagian-bagian turbin seperti sudu dan saluran gas panas (*hot gas path*). Oleh karena itu, bahan bakar yang digunakan tidak boleh mengandung logam-logam tersebut di atas melebihi batas tertentu (Marsudi, 2011). Pada umumnya, pabrik pembuat turbin gas mensyaratkan bahan bakar dengan kandungan logam *kalium*, *vanadium*, dan *natrium* tidak boleh melampaui 1 *part per million* (ppm). Di Indonesia, BBM yang bisa memenuhi syarat ini hanya minyak Solar, *high speed diesel oil*, atau yang sering disebut minyak HSD yang disediakan oleh PERTAMINA. Sedangkan BBG umumnya dapat memenuhi syarat tersebut (Marsudi, 2011).

1.3. Komponen- Komponen PLTG

- a) Kompresor

Kompresor mengambil udara atmosfer dan merubahnya menjadi udara bertekanan tinggi untuk membantu proses pembakaran di ruang bakar. Kompresor terdiri dari *intake air filter*, *Inlet Guide Van (IGV)*, sudu-sudu tetap dan sudu-sudu jalan yang berjumlah 19 *stages*. Adapun fungsinya untuk menarik udara luar masuk ke ruang bakar sebagai proses pembakaran dan media pendingin.

Kompresor berfungsi untuk mengompresikan udara yang berasal dari *air inlet* untuk proses pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar (Aeroengineering, 2016).

b) Ruang Bakar (*Combustion Chamber*)

Pada ruang bakar terjadi proses pembakaran antara bahan bakar dengan fluida kerja yang berupa udara bertekanan tinggi dan bertemperatur tinggi dan bertemperatur tinggi. Perubahan energi kimia ke energi panas. Hasil pembakaran ini berupa kalor yang diubah menjadi energi kinetik. Fungsi dari keseluruhan sistem adalah untuk mensuplai energi panas ke siklus turbin *combustion liner* berbentuk silinder yang terdiri dari segmen-segmen berlubang (Purwanto, 2012). Lubang-lubang ini yang berfungsi sebagai mengalirkan udara sekunder sekaligus sebagai pendingin dinding dan gas yang dihasilkan pembakaran kedalam *combustion liner* inilah dialirkan udara aliran menjadi *turbulen combustion liner* disambungkan dengan *transition piece* yang mengarahkan aliran gas panas ke *nozzle* turbin Berikut ini adalah bagian-bagian dari ruang bakar (Wheelen, dkk, 2012).

c) Turbin Gas

Turbin merupakan tempat terjadinya konversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak kompresor dan perlengkapan lainnya. 60% dari daya turbin akan digunakan untuk memutar kompresor dan sisanya digunakan untuk menggerakkan generator. Turbin gas memiliki rasio kompresi 0,5 sehingga efisiensi yang dihasilkan adalah efisiensi yang paling baik diantara mesin-mesin pembakaran dalam yang lain (Aldium, 2018). Tidak salah apabila turbin jenis ini adalah yang paling banyak digunakan di berbagai kebutuhan termasuk untuk pembangkit listrik. Turbin yang paling sederhana terdiri dari bagian yang berputar atau sering disebut rotor, yang terdiri dari sebuah poros atau shaft dengan sudu-sudu atau blade yang terpasang pada poros tersebut. Rotor tersebut berputar akibat dari tumbukan aliran fluida atau berputar sebagai reaksi dari aliran fluida tersebut (Sunarwa, 2016). Berdasarkan putaran rotor itulah turbin terbagi atas 2 jenis yaitu:

- 1) Turbin Impuls Turbin ini merubah arah dari aliran fluida berkecepatan tinggi menghasilkan putaran impuls dari turbin dan penurunan energi kinetik dari aliran fluida. Tidak ada perubahan tekanan yang terjadi pada fluida, dan penurunan tekanan terjadi pada nozzle
- 2) Turbin Reaksi Turbin ini menghasilkan torsi dengan menggunakan tekanan atau massa fluida. Tekanan dari fluida berubah pada saat melewati sudu rotor. Pada turbin jenis ini diperlukan semacam sudu pada casing untuk mengontrol fluida kerja seperti yang bekerja pada turbin tipe multistage atau turbin ini harus terendam penuh pada fluida kerja.

1.4. Combustion Inspection

Inspeksi ini diperlukan untuk mengganti *fuel nozzles* dan mengecek *combustion liners transition pieces* dan *crossfire tubes*. karena jika di operasikan gas turbin dengan sistem pembakaran yang buruk dapat menyebabkan bagian bagian hilir (*downstream*) seperti *turbine nozzles* dan *buckets* umurnya jauh lebih pendek. *Part-part* sistem pembakaran tersebut juga didesain merupakan part yang pertama kali harus diganti atau *direpair*. Inspeksi visual terhadap leading edge dari tiap-tiap (*partition*) *turbine nozzle stage* 1 dan *buckets-nya* untuk mengetahui adanya keausan (*wear*) atau kerusakan part-part ini. Inspeksi ini juga akan membantu menentukan jadwal *hot gas path inspection.combustion liners, transition pieces, crossfire tubes, dan fuel nozzles* harus dilepas dan diganti dengan liners baru atau *repairing*. Prosedur ini akan mengurangi *downtime* menjadi *minimum liners, transition pieces, crossfire tubes dan fuel nozzles* yang sudah dilepas dapat dibersihkan, diinspeksi, dan diperbaiki kemudian. (Pusdiklat, 2017). *Combustion inspection* lebih sering dilakukan daripada 2 *major inspection dan hot gas path inspection* karena *combustion section* harus bisa menjaga putaran turbin selalu konstan 5100 rpm, dengan cara melakukan perawatan yaitu dengan menambah atau mengurangi penyediaan bahan bakar (Rashid, 2011).

Pelaksanaan *combustion inspection* pada 4 kenyataannya lebih cepat selesainya dari pada perencanaan yang ada. Jika dalam perencanaan dibutuhkan 14 hari, kenyataannya bisa diselesaikan dalam durasi 12 hari. Kenyataan ini membuktikan bahwa pekerjaan akan bisa lebih cepat terselesaikan dengan perencanaan yang lebih baik lagi. Jika proses pelaksanaan lebih cepat maka *shutdown* akan lebih pendek dan kerugian waktu produksi dapat dikurangi (Ridzki, 2013). Proses pelaksanaan *combustion inspection* tentu mempunyai banyak sekali risiko. Pekerja dituntut untuk dapat menyelesaikan pengerjaan tepat pada waktu yang ditentukan serta mengutamakan kualitas pengerjaan, sehingga perlu adanya pengendalian risiko untuk mengurangi kecelakaan kerja. Setiap pekerja harus mengetahui manajemen risiko pada pelaksanaan *combustion inspection* ini, agar mereka paham resiko apa saja yang mereka hadapi dari pekerjaan yang mereka lakukan dan cara mengendalikan risiko tersebut. (Aldium, 2018).

Adapun tahapan yang dilakukan saat pengerjaan *combustion inspection* adalah:

- a) *Disassembly*
 - 1) Melepas *fuel gas & oil nozzle dan nozzle holder*
 - 2) Buka *manhole* turbin
 - 3) Buka *combustor shell (basket, cross flame, marman coupling)*
 - 4) Buka *transition piece*
 - 5) Rubbing check
- b) *Inspection, Cleaning, dan Repair*
 - 1) Pembersihan *fuel gas & oil nozzle*
 - 2) *Visual inspection*
 - 3) Periksa *vane segment*
 - 4) *Roll in & roll out transition piece*
 - 5) Pembersihan dan pengecekan IGV
- c) *Assembly*
 - 1) Memasang *transition piece & alignment*
 - 2) Memasang *combustor basket*
 - 3) Memasang *fuel gas & oil nozzle*

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif. Lokasi penelitian berada di Jl. K.L Yos Sudarso Lorong XII Glugur Kota, Medan Barat, Sumatera Utara. Pembangkit ini memakai unit *Jhon Brown Engineering* dengan daya output 10 MW. *Jhon Brown Engineering* telah identik dengan kualitas teknik dan layanan di industri tenaga listrik dengan kesuksesan lebih dari tiga puluh tahun dalam bidang teknik,

manufaktur, dan layanan pembangkit listrik turbin gas di seluruh dunia. Teknik pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah kajian pustaka, observasi dan wawancara. Adapun data spesifikasi turbin gas PLTG Glugur terdapat pada tabel berikut:

Tabel 1: Spesifikasi Turbin Gas PLTG Glugur

Pabrik	General Electric
Type/model	PG 5341
No pabrik	GT 270
No.seri	226371
Daya terpasang base	19980 KW
Daya terpasang peak	21600 KW
Bahan bakar	HSD
Minyak pelumas	DTE LIGHT
Sistem kontrol	Speed Tronic
Tahun pembuatan	1973
Mulai beroperasi	15 Februari 1975
Tingkat/putaran	2/5100 RPM

Tabel 2: Spesifikasi Kompresor PLTG Glugur

Jenis	Axial Flow
Tingkat	17
Tingkat dengan IGV	-
Putaran	5100 RPM

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari segi pemeliharaan pada unit PLTG mempunyai interval waktu pemeliharaan yang cukup pendek, yaitu sekitar 4.000-5.000 jam operasi. Mesin yang telah beroperasi selama 12.000 jam maka akan dilakukan pemeliharaan *combustion inspection* yaitu berupa pemeriksaan pada ruang bakar yaitu melakukan pemeriksaan pada *combuster*. Pemeliharaan yang dilakukan adalah pembersihan atau penggantian (*roll in & roll out*) pada pipa *nozzle*, *nozzle* gas dan minyak, *combuster*, *transition piece*, *manhole*, dan *igniter*.

Combustion Inspection adalah pemeliharaan yang dilakukan dalam waktu jangka pendek yang dilakukan untuk memeriksa bagian ruang bakar, *transition piece* dan *cross fire tube*. Komponen-komponen ini membutuhkan pemeriksaan secara berkala, karena kerja yang dilakukan oleh turbin secara terus menerus, sehingga sistem pembakaran yang buruk akan menyebabkan pendeknya umur dari komponen-komponen tersebut.

3.1 Performance Test

Tabel 3 adalah data *performance test sheet* turbin gas PLTG Glugur sebelum dilakukannya *combustion inspection* pada 16 Maret 2016.

Tabel 3: Data Performance Test Sebelum *Combustion Inspection*

Deskripsi	Satuan	Data
<i>Ambient temperature</i>	°C	33,0
<i>Compressor inlet temperature</i>	°C	33,0
<i>Compressor outlet Temperature</i>	°C	333
<i>Compressor outlet Pressure</i>	Bar	8,3
<i>Calculation turbine outlet</i>	°C	503
<i>Gas upstream pressure</i>	Bar	21,0
<i>Gas downstream pressure</i>	Bar	16,0
Ghv	BTU/SCF	1064,01
<i>Gas flow rate</i>	MMSCF	1,147
<i>Energy</i>	MMBTU	1220,83
<i>Power output</i>	kW	100,000
<i>Auxiliary power</i>	kW	120
<i>Efficiency thermal</i>	%	27,95

Tabel 4 adalah data *performance test sheet* turbin gas PLTG Glugur sesudah dilakukannya *Combustion Inspection* pada 04 Mei 2016.

Tabel 4: Data Performance Test Sesudah *Combustion Inspection*

Deskripsi	Satuan	Data
<i>Ambient temperature</i>	°C	35,0
<i>Compressor inlet temperature</i>	°C	35,0
<i>Compressor outlet Temperature</i>	°C	330
<i>Compressor outlet Pressure</i>	Bar	8,3

Calculation turbine outlet	°C	330
Gas upstream pressure	Bar	21,0
Gas downstream pressure	Bar	16,0
Ghv	BTU / SCF	1048,90
Gas flow rate	MMSCF	1,112
Energy	MMBTU	1166.56338
Power output	kW	100.000
Auxiliary power	kW	120
Efficiency thermal	%	29,25

3.2 Perhitungan Kinerja Turbin Gas

Perhitungan Kinerja Turbin Gas sebelum *combustion inspection* pada 21 Maret 2016 di PLTG Glugur. Waktu yang dibutuhkan dalam *combustion inspection* adalah 14 hari. Akan tetapi pelaksanaan ini bisa saja berubah sesuai dengan kondisi yang ada di lapangan. Pada penelitian ini hanya membutuhkan 12 hari dalam melakukan *combustion inspection*.

1. Perhitungan daya yang dibutuhkan kompresor.

Untuk menghitung \dot{W} kompresor kita menggunakan persamaan 1:

$$\dot{W}_{\text{kompresor}} = \dot{m}_{\text{udara}} \times (h_2 - h_1) \tag{1}$$

Persamaan memerlukan data \dot{m}_{udara} yang dapat dihitung dari persamaan 2:

$$\dot{m}_{\text{udara}} = \frac{A}{F} \times \dot{m}_{bb} \tag{2}$$

Untuk mendapatkan harga \dot{m}_{bb} maka dapat digunakan persamaan 3:

$$\dot{m}_{bb} = Q_{bb} \times \rho_{bb} \tag{3}$$

Berdasarkan data komposisi bahan bakar, didapatkan harga *specific gravity* bahan bakar yaitu sebesar 0,60248 pada kondisi 14,7 psia. Massa jenis bahan bakar dapat dihitung dengan persamaan 4 sebagai berikut :

$$\rho_{\text{udara}} = 1,2 \text{ kg/m}^3 \text{ pada } 14,7 \text{ Psia}$$

$$\rho_{bb} = 56 \times \rho_{\text{udara}} \tag{4}$$

$$\rho_{bb} = 0,60248 \times 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{bb} = 0,722976 \text{ kg/m}^3$$

Dari hasil perhitungan massa jenis bahan bakar maka harga \dot{m}_{bb} dapat dihitung melalui persamaan 5:

$$\dot{m}_{bb} = Q_{bb} \times \rho_{bb} \tag{5}$$

$$\dot{m}_{bb} = \frac{32,23 \text{ kNm}^3}{h} \times 0,722976 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1h}{3600 \text{ s}} \times \frac{1000}{k}$$

$$\dot{m}_{bb} = 6,4726 \text{ kg/s}$$

Sementara untuk perhitungan \dot{m}_{udara} dibutuhkan harga *air fuel ratio* terlebih dahulu, perhitungan AFR dapat dihitung melalui persamaan 6 :

$$W_{GT_{\text{nett}}} = (W_T - W_C) - \text{mechanical losses} \tag{6}$$

$$\frac{W_{\text{gen}}}{\eta_{\text{gen}}} = [(\dot{m}_{bb} + \dot{m}_{\text{udara}}) \times (h_3 - h_4)] - (\dot{m}_{\text{udara}} \times (h_2 - h_1)) \text{ mech loss}$$

$$\frac{W_{\text{gen}}}{\eta_{\text{gen}}} = \left[\left(1 + \frac{A}{F} \right) \dot{m}_{bb} \times (h_3 - h_4) \right] - \left(\frac{A}{F} \right) \dot{m}_{bb} \times (h_2 - h_1) - \text{mech loss}$$

$$\frac{A}{F} = \frac{\left[\frac{W_{\text{gen}}}{\eta_{\text{gen}}} + \text{mech loss} - (\dot{m}_{bb} \times (h_3 - h_4)) \right]}{(\dot{m}_{bb} \times (h_3 - h_4)) - (\dot{m}_{bb} \times (h_2 - h_1))}$$

$$\frac{A}{F} = \frac{98110 \text{ kJ}}{0,9875} + 1100 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \left[\frac{6,4726 \times (3123,26 - 1721,92)}{6,4726 \times (613,326 - 306,224)} \right]$$

$$\frac{A}{F} = 10,4370$$

Sehingga \dot{m}_{udara} :

$$\dot{m}_{\text{udara}} = \frac{A}{F} \times \dot{m}_{bb}$$

$$\dot{m}_{\text{udara}} = 10,4370 \times 6,4726$$

$$\dot{m}_{\text{udara}} = 67,55 \text{ kg/s}$$

Sehingga $W_{\text{kompresor}}$ dapat dihitung :

$$W_{kompresor} = \dot{m}_{udara} \times (h_2 - h_1)$$

$$W_{kompresor} = 67,55 \times (613,326 - 306,224)$$

$$W_{kompresor} = 20744,7401 \frac{kJ}{kg}$$

2. Perhitungan daya yang dihasilkan turbin

Untuk menghitung daya turbin pada turbin gas dapat dihitung menggunakan persamaan 7:

$$W_{turbin} = (\dot{m}_{udara} + \dot{m}_{bb}) \times h_3 - h_4 \quad (7)$$

$$W_{turbin} = (67,55 + 6,4726) \times (3123,26 - 1721,92)$$

$$W_{turbin} = 103730,83 \frac{kJ}{s}$$

3. Daya Netto

Daya netto adalah selisih antara daya yang dihasilkan turbin dengan daya yang dibutuhkan kompresor. Daya netto selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai efisiensi siklus persamaan 8. Sehingga nilai dari daya netto adalah :

$$W_{netto} = W_{turbin} - W_{kompresor} \quad (8)$$

$$W_{netto} = 103730,83 - 20744,7401$$

$$W_{netto} = 82986,08 \text{ kJ/s}$$

4. *Specific Fuel Consumption*

Untuk menghitung konsumsi bahan bakar dapat menggunakan persamaan 9 sebagai berikut :

$$SFC = \frac{\dot{m}_{bb}}{W_{netto}} \quad (9)$$

$$SFC = \frac{6,4726}{82986,08}$$

$$SFC = 0,07996 \text{ kg/kWh}$$

5. *Back Work Ratio*

Back Work Ratio adalah nilai presentase kerja spesifik yang digunakan untuk menggerakkan kompresor, yang dapat dihitung dengan persamaan 10 membagi daya kompresor dengan daya turbin seperti berikut:

$$BWR = \frac{W_{kompresor}}{W_{turbin}} \quad (10)$$

$$BWR = \frac{20744,7401}{103730,83}$$

$$BWR = 0,1999$$

6. Efisiensi Kompresor dengan persamaan 11

$$\eta_{kompresor} = \frac{T_2s - T_1}{T_2 - T_1} \times 100\% \quad (11)$$

$$\eta_{kompresor} = \frac{612,82 - 306}{606 - 306} \times 100\%$$

$$\eta_{kompresor} = 82,73 \%$$

7. Efisiensi Turbin dengan persamaan 12

$$\eta_{turbin} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{us}} \times 100\% \quad (12)$$

$$\eta_{turbin} = \frac{1432,92 - 790}{1432,92 - 715,46} \times 100\%$$

$$\eta_{turbin} = 89,61 \%$$

8. Kalor yang dihasilkan ruang bakar persamaan 13

$$Q_{in} = LHV \times \dot{m}_{bb} \quad (13)$$

$$Q_{in} = 8815,67 \times 6,4726$$

$$Q_{in} = 57060,30 \text{ kJ/s}$$

9. Efisiensi siklus persamaan 14

$$\eta_{siklus} = \frac{W_{netto}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (14)$$

$$\eta_{siklus} = \frac{82986,08}{57060,30} \times 100\%$$

$$\eta_{siklus} = 14,54\%$$

Perhitungan Kinerja Turbin Gas sesudah *combustion inspection* pada 21 Mei 2016 di PLTG Glugur.

1. Perhitungan daya yang dibutuhkan kompresor.

Untuk menghitung $\dot{W}_{\text{kompresor}}$ kita menggunakan persamaan 15:

$$\dot{W}_{\text{kompresor}} = \dot{m}_{\text{udara}} \times (h_2 - h_1) \quad (15)$$

Persamaan memerlukan data \dot{m}_{udara} yang dapat dihitung dari persamaan 16:

$$\dot{m}_{\text{udara}} = \frac{A}{F} \times \dot{m}_{\text{bb}} \quad (16)$$

Untuk mendapatkan harga \dot{m}_{bb} maka dapat digunakan persamaan 17 :

$$\dot{m}_{\text{bb}} = Q_{\text{bb}} \times \rho_{\text{bb}} \quad (17)$$

Berdasarkan data komposisi bahan bakar, didapatkan harga *specific gravity* bahan bakar yaitu sebesar 0,60248 pada kondisi 14,7 psia. Massa jenis bahan bakar dapat dihitung dengan persamaan 18:

$$\rho_{\text{udara}} = 1,2 \text{ kg/m}^3 \text{ pada } 14,7 \text{ Psia}$$

$$\rho_{\text{bb}} = 56 \times \rho_{\text{udara}} \quad (18)$$

$$\rho_{\text{bb}} = 0,60248 \times 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{bb}} = 0,722976 \text{ kg/m}^3$$

Dari hasil perhitungan massa jenis bahan bakar maka harga \dot{m}_{bb} dapat dihitung melalui persamaan 19:

$$\dot{m}_{\text{bb}} = Q_{\text{bb}} \times \rho_{\text{bb}} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{\text{bb}} = \frac{32,23 \text{ kNm}^3}{h} \times 0,722976 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1h}{3600 s} \times \frac{1000}{k}$$

$$\dot{m}_{\text{bb}} = 6,4726 \text{ kg/s}$$

Sementara untuk perhitungan \dot{m}_{udara} dibutuhkan harga *air fuel ratio* terlebih dahulu, perhitungan AFR dapat dihitung melalui persamaan 20 :

$$W_{GT_{\text{nett}}} = (W_T - W_C) - \text{mechanical losses} \quad (20)$$

$$\frac{W_{\text{gen}}}{\eta_{\text{gen}}} = [(\dot{m}_{\text{bb}} + \dot{m}_{\text{udara}}) \times (h_3 - h_4)] - (\dot{m}_{\text{udara}} \times (h_2 - h_1)) \text{ mech loss}$$

$$\frac{W_{\text{gen}}}{\eta_{\text{gen}}} = \left[\left(1 + \frac{A}{F} \right) \dot{m}_{\text{bb}} \times (h_3 - h_4) \right] - \left(\frac{A}{F} \right) \dot{m}_{\text{bb}} \times (h_2 - h_1) - \text{mech loss}$$

$$\frac{A}{F} = \left[\frac{\left(\frac{W_{\text{gen}}}{\eta_{\text{gen}}} \right) + \text{mech loss} - (\dot{m}_{\text{bb}} \times (h_3 - h_4))}{(\dot{m}_{\text{bb}} \times (h_3 - h_4)) - (\dot{m}_{\text{bb}} \times (h_2 - h_1))} \right]$$

$$\frac{A}{F} = \frac{98110 \text{ kJ}}{0,9875} + 1100 \frac{\text{kJ}}{s} \left[\frac{6,4726 \times (3541,75 - 1802,57)}{6,4726 \times (636,58 - 308,232)} \right]$$

$$\frac{A}{F} = 10,5177$$

Sehingga \dot{m}_{udara} :

$$\dot{m}_{\text{udara}} = \frac{A}{F} \times \dot{m}_{\text{bb}}$$

$$\dot{m}_{\text{udara}} = 10,5177 \times 6,4726$$

$$\dot{m}_{\text{udara}} = 68,07 \text{ kg/s}$$

Sehingga $W_{\text{kompresor}}$ dapat dihitung :

$$W_{\text{kompresor}} = \dot{m}_{\text{udara}} \times (h_2 - h_1)$$

$$W_{\text{kompresor}} = 68,07 \times (636,58 - 308,232)$$

$$W_{\text{kompresor}} = 22350,64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

2. Perhitungan daya yang dihasilkan turbin

Untuk menghitung daya turbin pada turbin gas dapat dihitung menggunakan persamaan 21 :

$$W_{\text{turbin}} = (\dot{m}_{\text{udara}} + \dot{m}_{\text{bb}}) \times h_3 - h_4 \quad (21)$$

$$W_{\text{turbin}} = (68,07 + 6,4726) \times (3541,75 - 1802,57)$$

$$W_{\text{turbin}} = 129642,991 \frac{\text{kJ}}{s}$$

3. Daya Netto
 Daya netto adalah selisih antara daya yang dihasilkan turbin dengan daya yang dibutuhkan kompresor. Daya netto selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai efisiensi siklus. Sehingga nilai dari daya netto dengan persamaan 22:

$$W_{netto} = W_{turbin} - W_{kompresor} \quad (22)$$

$$W_{netto} = 129642,991 - 22350,64$$

$$W_{netto} = 107292,35 \text{ kJ/s}$$
4. *Specific Fuel Consumption*
 Untuk menghitung konsumsi bahan bakar dapat menggunakan persamaan 23 sebagai berikut :

$$SFC = \frac{\dot{m}_{bb}}{W_{netto}} \quad (23)$$

$$SFC = \frac{6,4726}{107292,351}$$

$$SFC = 0,0603 \text{ kg/kWh}$$
5. *Back Work Ratio*
Back Work Ratio adalah nilai presentase kerja spesifik yang digunakan untuk menggerakkan kompresor, yang dapat dihitung dengan persamaan 24 yaitu membagi daya kompresor dengan daya turbin seperti berikut :

$$BWR = \frac{W_{kompresor}}{W_{turbin}} \quad (24)$$

$$BWR = \frac{22350,64}{129642,991}$$

$$BWR = 0,17$$
6. Efisiensi Kompresor dengan persamaan 25:

$$\eta_{kompresor} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \times 100\% \quad (25)$$

$$\eta_{kompresor} = \frac{637,56 - 308}{628 - 308} \times 100\%$$

$$\eta_{kompresor} = 92,98 \%$$
7. Efisiensi Turbin dengan persamaan 26:

$$\eta_{turbin} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} \times 100\% \quad (26)$$

$$\eta_{turbin} = \frac{1624,92 - 827}{1624,92 - 783,32} \times 100\%$$

$$\eta_{turbin} = 94,80 \%$$
8. Kalor yang dihasilkan ruang bakar dengan persamaan 27:

$$Q_{in} = LHV \times \dot{m}_{bb} \quad (27)$$

$$Q_{in} = 16993,08 \times 6,4726$$

$$Q_{in} = 109989,46 \text{ kJ/s}$$
9. Efisiensi siklus dengan persamaan 28:

$$\eta_{siklus} = \frac{W_{netto}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (28)$$

$$\eta_{siklus} = \frac{109989,46}{57715,46} \times 100\%$$

$$\eta_{siklus} = 19,05\%$$

3.3 Hasil perhitungan Kinerja Turbin Gas PLTG Glugur sebelum dan sesudah combustion inspection dalam bentuk tabel.

Hasil perhitungan tiap properties dan perhitungan data *performance test* dibuat dalam bentuk tabel guna mempermudah dalam pembacaan dan perbandingan. Perhitungan properties dan perhitungan *performance tes* dapat dilihat pada tabel 5.

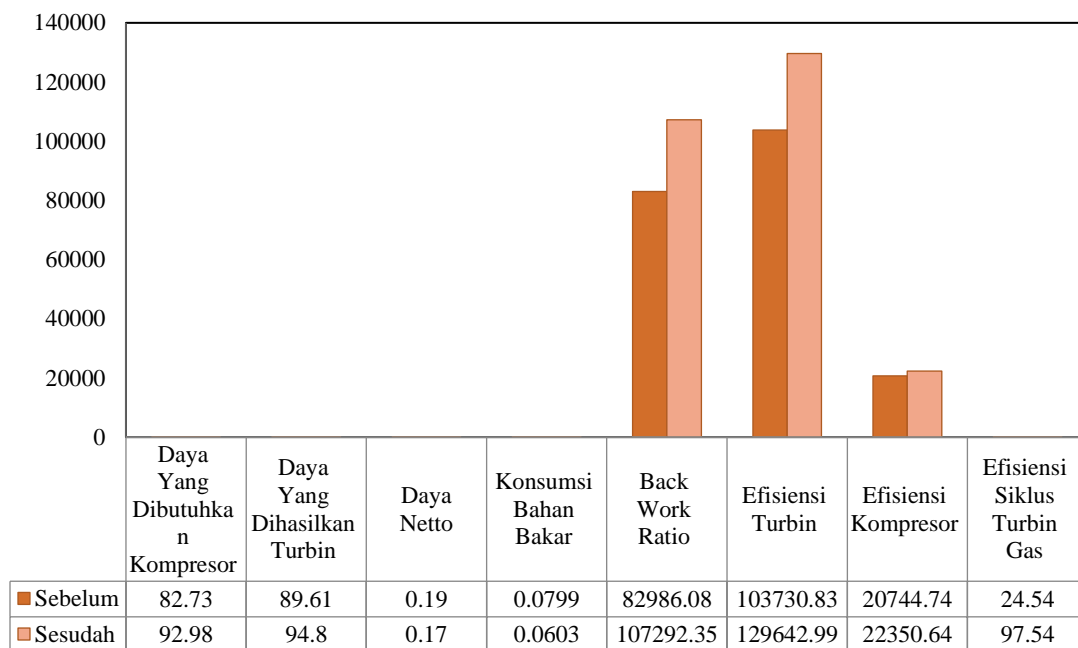
Tabel 5: Perhitungan Kinerja *Combustion Inspection*

Parameter	Perhitungan kinerja <i>combustion inspection</i>	
	Sebelum	Sesudah
W Kompresor	20744,74	22350,64
W Turbin	103780,83	129642,99
W netto	82986,08	107292,35
SFC	0,0799	0,0603

Parameter	Perhitungan kinerja <i>combustion inspection</i>	
	Sebelum	Sesudah
<i>Back work ratio</i>	0,19	0,17
Efisiensi turbin	89,61	94,8
Efisiensi kompresor	82,73	92,98
Efisiensi siklus	14,54	19,05

3.4 Grafik hasil perhitungan kinerja *Combustion Inspection*

Berdasarkan gambar 2 dapat diketahui bahwa daya yang dihasilkan turbin sebelum *combustion inspection* adalah 103730,83 Kj/s sedangkan sesudah dilakukan *combustion inspection* adalah 129642,99 Kj/s sehingga daya yang dihasilkan turbin mengalami kenaikan sebesar 25912,16 Kj/s. Data ini merupakan data dengan nilai yang tertinggi apabila dibandingkan dengan daya konsumsi bahan bakar. Konsumsi bahan bakar sebelum *combustion inspection* adalah 0,0799 kg/kWh sedangkan sesudah dilakukan *combustion inspection* adalah 0,0603 kg/kWh. Sehingga konsumsi bahan bakar mengalami penurunan sebesar 0,0196 kg/kWh.



Gambar 2: Grafik hasil perhitungan kinerja *Combustion Inspection*

4. KESIMPULAN

Berdasarkan data performance test serta hasil perhitungan dan analisis kinerja PLTG sebelum dan sesudah *combustion inspection*, beberapa kesimpulan dapat diambil. Pertama, terjadi peningkatan daya yang dibutuhkan oleh kompresor sebesar 1605,9 kW, sementara daya yang dihasilkan oleh turbin meningkat sebesar 25862,16 kW, menghasilkan peningkatan daya netto sebesar 24306,27 kW. Selain itu, terjadi penurunan konsumsi bahan bakar sebesar 0,0196 kg/kWh, serta penurunan back work ratio sebesar 0,02%. Efisiensi turbin meningkat sebesar 5,19%, efisiensi kompresor naik sebesar 10,25%, dan efisiensi siklus turbin gas mengalami peningkatan yang signifikan sebesar 73%. Kesimpulan ini menunjukkan bahwa hasil *combustion inspection* berdampak positif terhadap kinerja keseluruhan PLTG, dengan peningkatan efisiensi dan daya yang dihasilkan, serta penurunan konsumsi bahan bakar dan *back work ratio*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan rasa syukur atas berkat dan rahmat-Nya karena penulis telah menyelesaikan jurnal ini serta terima kasih atas dukungan finansial yang diberikan oleh Direktorat Akademik Pendidikan Tinggi Vokasi Direktorat Jenderal Pendidikan Vokasi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, Teknologi melalui Pusat Penelitian Pengabdian Masyarakat Politeknik Negeri Medan.

DAFTAR PUSTAKA

Aeroengineering. (2016). Diakses Juni 2016, dari <https://aeroengineering.co.id/2016/06/cara-kerja-turbin-gas-propulsi-mesin-pesawat-terbang/>

Aldium, A.-T. A. (2018). Pengaruh Combustion Inspection, Turbine. Gresik: Institut Teknologi Sepuluh Noverber.

Leda, J. (2010). Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Ujung Pandang. Makasar.

Marsudi. (2011). Pembangkitan Energi Listrik. Jakarta: Erlangga.

Matius. (2015). Tranmisi Daya Elektrik. Yogyakarta: Andi.

Moran, J. R. (2012). Fundamental of Thermodynamics Aplied to Thermal Power Plant. London: G.F.F. de Souza .

Purwanto, E. (2012). Analisa Vibrasi Turbin Pltg Duri Unit 2. Jakarta: PT PLN (Persero).

- Pusdiklat. (2017). Manajemen Overhaul. Surabaya: PT PLN (Persero).
- Rashid, M. H. (2011). Power Electronics Hnadbook. USA: Jordan Hill.
- Ridzki, I. (2013). Analisis Pengaruh Perubahan Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator. Yogyakarta.
- Sukmahadi, A. A. (2018). Simulasi Permodelan System Eksitasi Statis Pada Generator Sinkron Terhadap Perubahan Beban. Yogyakarta.
- Sunarwo, T. H. (2016). Analisa Efisiensi Turbin Gas Unit 1 Sebelum Dan Setelah Overhaul Combustor Inspection Di PT PLN Persero Sektor Pembangkitan PLTGU Cilegon. *Eksergi*, 50-57.
- Wheelen, T. L., & Hunger, J. D. (2012). Strategic Management and Business Policy: Toward Global Sustainability (Thirteenth Edition). New Jersey: Pearson Education.