

Analisis Generator Sinkron Unit 2 Akibat Overheating Di Pembangkit Listrik Tenaga Gas MPP Balai Pungut

Abrar Tanjung¹, Zafid Maulana², Hazra Yuvendius³

Jl. Yos Sudarso Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning Pekanbaru

Email : abrar@unilak.ac.id¹, zafidmaulana13@gmail.com², [fazra_yuvendius@unilak.ac.id](mailto:hazra_yuvendius@unilak.ac.id)³

Submitted : Agustus 2022

Accepted: 29 Juni 2023

DOI: <https://doi.org/10.31849/sainetin.v7i2.10840>

Abstrak

Generator sinkron adalah mesin sinkron pengubah energi mekanik menjadi energi listrik yang memiliki frekuensi putar rotor sama dengan frekuensi tegangan yang dibangkitkan. Generator sinkron yang ditinjau adalah generator sinkron pada PLTG MPP Balai Pungut. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kenaikan temperatur akibat perubahan generator sinkron serta menganalisis efisiensi generator sinkron terhadap rugi-rugi daya akibat *overheating*. Kenaikan temperatur disebabkan oleh pengaruh beban, arus jangkar, rugi-rugi total yang bervariasi. Dari hasil analisa dan perhitungan yang dirata-ratakan pada bulan April, Mei, Juni 2021 dapat dilihat bahwa, kenaikan temperatur disebabkan oleh pengaruh beban yang bervariasi. Temperatur tertinggi terjadi pada bulan April dengan temperatur 85,43°C pada beban 23,05 MW dan arus jangkar 1160,146 A, serta temperatur terendah terjadi pada bulan Mei dengan temperatur 52,47°C pada beban 12,60 MW dan arus jangkar 641,915 A. Efisiensi generator sinkron unit 2 PLTG MPP Balai Pungut dipengaruhi oleh rugi-rugi total generator yang menyebabkan terjadinya *overheating*. Semakin meningkat efisiensi nya maka rugi-rugi total nya juga meningkat, efisiensi terendah yang terjadi pada bulan April, Mei, Juni 2021 terdapat pada bulan Mei dengan efisiensi 93,03% dan rugi-rugi total nya 0,930 kW, serta efisiensi tertinggi terdapat pada bulan April dengan efisiensi 95,05% dan rugi-rugi total nya 1,190 kW.

Kata Kunci: Generator Sinkron, Overheating, Temperatur, Efisiensi, Rugi-rugi Total.

Abstract

A synchronous generator is an synchronous machine that converts mechanical energy into electrical energy which has a rotor rotation frequency equal to the generated voltage frequency. The synchronous generator under review is the synchronous generator at the PLTG MPP Balai Pungut. The purpose of this study is to analyze the temperature rise due to changes in the synchronous generator and to analyze the efficiency of the synchronous generator against power losses due to overheating. The increase in temperature is caused by the influence of the load, armature current, variable total losses. From the results of the analysis and calculations which are averaged in April, May, June 2021 it can be seen that the increase in temperature is caused by the influence of varying loads. The highest temperature occurs in April with a temperature of 85.43°C at a load of 23.05 MW and an armature current of 1160.146 A, and the lowest temperature occurs in May with a temperature of 52.47°C at a load of 12.60 MW and an armature current 641,915 A. The efficiency of the synchronous generator unit 2 PLTG MPP Balai Pungut is affected by the total losses of the generator which causes overheating. As the efficiency increases, the total losses also increase, the lowest efficiency that occurred in April, May, June 2021 was in May with an efficiency of 93.03% and a total loss of 0.930 kW, and the highest efficiency was in April with an efficiency of 95.05% and a total loss of 1.190 kW.

Keywords: Synchronous Generator, Overheating, Temperature, Efficiency, Total Loss.

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) MPP (Mobile Power Plant) Balai Pungut Mobile Power Plant yaitu sebuah pembangkit yang bisa berpindah

pindah tempat sesuai dengan kebutuhan dayanya. PLTG MPP Balai Pungut yang berlokasi di Desa Balai Pungut, Kecamatan Pinggir, Kabupaten Bengkalis, Riau. Pada Pusat Listrik Balai Pungut terbagi menjadi 2 area yaitu PLTG MPP yang

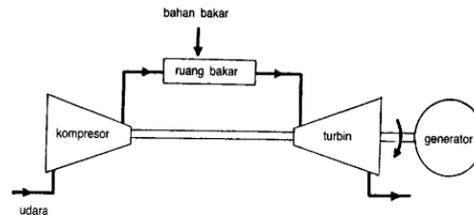
bersinergi dengan PT. Pelayanan Listrik Nasional Batam (PLNB), PT. Haleyora Power Indo (HPI), dan PT. Pelayanan Energi Batam (PEB). PLTG MPP Balai Pungut memiliki 3 unit generator dengan daya 3 X 25 MW. Dan PLTMG (Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas) yang memiliki 7 unit generator dengan daya 7 X 14,5 MW.

Pembangkit Listrik Tenaga Gas khususnya PLTG MPP Balai Pungut memiliki komponen penting penyusunnya, salah satunya adalah generator. Generator adalah salah satu komponen yang sangat vital dalam sistem pembangkitan. Generator yang biasa digunakan dalam sistem pembangkitan adalah jenis generator sinkron berfungsi mengkonversikan energi mekanis (putaran) menjadi energi listrik. Generator dioperasikan secara terus-menerus untuk memenuhi kebutuhan beban yang bervariasi tergantung sifat bebannya, baik beban yang bersifat kapasitif ataupun induktif. Hal tersebut mengharuskan tiap-tiap unit generator yaitu unit 1, unit 2, dan unit 3 harus siap dalam menghadapi kondisi beban yang terus berubah sewaktu-waktu tergantung kebutuhan pelanggannya. Pengaruh dari pada permintaan pelanggan akan listrik dengan sifat beban yang bervariasi baik bersifat resistif, induktif ataupun kapasitif yang dibutuhkan oleh kebutuhan rumah tangga, industri, ataupun umum selalu diikuti oleh suplai daya aktif (MW) dan daya reaktif (MVAR) oleh generator. Arus beban akan mengalir akibat adanya kebutuhan beban tersebut sehingga menimbulkan efek variasi terhadap temperatur generator sinkron.

Hal ini dapat mempengaruhi besarnya rugi-rugi daya yang ditimbulkan dan apabila panas tersebut dibiarkan akan menyebabkan generator mengalami panas berlebih (*overheating*). Panas yang berlebih diakibatkan oleh berubah-ubahnya beban yang berlebih pada generator serta area peletakan 3 unit generator di PLTG MPP Balai Pungut yang berada diluar ruangan (*outdoor*) sehingga menimbulkan efek terhadap suhu temperatur generator sinkron yang mengakibatkan terjadinya *shutdown* untuk beberapa jam. Mengingat pentingnya generator pada pembangkit, maka diperlukan analisa generator sinkron unit 2 akibat *overheating* di PLTG MPP Balai Pungut agar pembangkit bisa menyalurkan energi listrik secara optimal dengan spesifikasi generator yang sesuai dengan kapasitasnya.

PLTG adalah pembangkitan listrik yang mengkonversikan energi kinetik. dari gas untuk

menghasilkan putaran pada turbin gas sehingga menggerakkan generator dan kemudian menghasilkan energi listrik. Pada PLTG tidak terdapat bagian mesin yang bergerak bolak balik karena merupakan mesin yang bebas dari getaran. Meskipun temperatur turbin gas jauh lebih tinggi dari pada temperatur turbin uap, namun efisiensi konversi termalnya hanya yang tinggi, maka PLTG berfungsi memikul beban puncak [1]–[3].



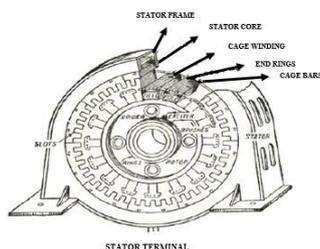
Gambar 1. Siklus turbin gas PLTG

Generator adalah mesin-mesin listrik yang mengkonversi energi mekanis (gerak) menjadi energi elektrik (listrik). Generator dapat menghasilkan listrik dengan memutar rotor yang diputar oleh penggerak mula prime mover [1]. Pada pusat pembangkit listrik biasanya menggunakan turbin sebagai penggerak mula. Sumber energi untuk menggerakkan turbin terdiri dari berbagai macam sumber antara lain uap, air, gas dan mesin diesel [4]. Generator bekerja berdasarkan hukum Faraday. Ahli fisika Michael Faraday menemukan apabila suatu penghantar diputar dalam sebuah medan magnet sehingga memotong garis-garis gaya magnet maka pada ujung penghantar tersebut akan timbul Gaya Gerak Listrik (GGL) yang mempunyai satuan Volt (V).

Generator sinkron atau (sering disebut alternator) adalah mesin listrik arus bolak balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak balik (*Alternating Current, AC*) yang bekerja dengan cara merubah energi mekanis (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Pergerakan relatif adalah terjadinya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator) karena pergerakan medan magnet terhadap kumparan jangkar atau sebaliknya. Dikatakan generator sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet (medan putar) pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan

kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Mesin sinkron tidak dapat start sendiri karena kutub-kutub yang berat dan tidak dapat tiba-tiba mengikuti kecepatan medan putar. Ada dua jenis generator sinkron, yaitu generator sinkron 1 fasa dan generator sinkron 3 fasa [1], [4]–[6].

Secara umum konstruksi pada generator sinkron terdiri dari stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak). Keduanya merupakan rangkaian magnetik yang berbentuk simetris dan silindris. Selain itu generator sinkron memiliki celah udara ruang antara stator dan rotor yang berfungsi sebagai tempat terjadinya fluksi atau induksi energi listrik dari rotor ke stator seperti pada Gambar 2 [7].



Gambar 2. Kontruksi Generator Sinkron

Prinsip kerja generator sinkron berdasar kann induksi elektromagnetik setelah rotor diputar oleh penggerak mula (prime mover) dengan demikian kutub-kutub yang ada pada rotor akan berputar jika kumparan kutub di suplai oleh tegangan searah maka dipermukaan kutub akan timbul medan magnet (garis-garis gaya magnet) yang berputar kecepatannya sama dengan putaran kutub sesuai dengan persamaan [1], [4].

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1)$$

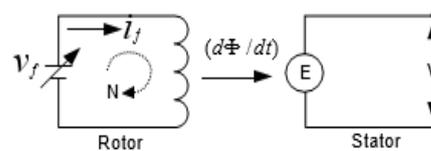
Keterangan :

n_s = Kecepatan putar rotor (rpm).

p = Jumlah kutub rotor

f = Frekuensi (Hz)

Berdasarkan hukum faraday apabila lilitan penghantar atau konduktor diputar memotong garis-garis gaya magnet yang berputar maka pada penghantar tersebut timbul *Electro Motive Force* (EMF) atau GGL atau tegangan induksi. GGL yang dibangkitkan pada penghantar jangkar adalah tegangan bolak-balik. Arus yang mengalir pada penghantar jangkar karena beban tersebut akan membangkitkan medan yang berlawanan atau mengurangi medan utama sehingga tegangan terminal turun, hal ini disebut reaksi jangkar, seperti pada Gambar 3 [4][8].



Gambar 3. Prinsip Kerja Generator Sinkron

GGL induksi (E_{ind}) pada alternator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator ketika rotor diputar mengelilingi stator. Besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan mengatur arus medan (I_f) yang diberikan pada rotor. Besarnya ggl induksi rata-rata (E_{ind}) yang dihasil kan oleh kumparan jangkar alternator ini dapat dilihat pada persamaan berikut [4]–[6].

$$E_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Keterangan :

E = GGL induksi (Volt)

N = Jumlah lilitan

$d\phi$ = Perubahan fluks magnetik (weber)

dt = Selang waktu (s)

Perhitungan Generator Sinkron

a) Menghitung $\cos\phi$ seperti persamaan [4]:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{Q}{P} \quad (3)$$

Keterangan :

Q = Daya reaktif (VAR)

P = Daya aktif (Watt)

b) Menghitung Arus jangkar seperti persamaan [10]:

$$I_a = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos\phi} \quad (4)$$

Keterangan :

I_a = Arus jangkar (Ampere)

P = Beban (Watt)

V = Tegangan Terminal Jangkar (Volt)

c) Menghitung daya *output* generator sinkron seperti persamaan [11]:

$$P_{out} = \sqrt{3} \times V_{\phi} \times I_A \times \cos\phi \quad (5)$$

Keterangan :

P_{out} = Daya (Watt)

V_{ϕ} = Tegangan (Volt)

I_A = Arus Jangkar (Ampere)

e) Menghitung daya generator (P_{in}) digunakan persamaan [4]:

$$P_{in} = P_{out} + \sum_{\text{rugi-rugi}} \quad (6)$$

Keterangan :

P_{in} = Daya Input (Watt)
 P_{out} = Daya Output (Watt)
 $\sum_{\text{rugi-rugi}} = P_{ag} + P_i + P_{ij} + P_{\text{stray}} + P_{tm} + P_{\text{brush}}$

f) Menghitung efisiensi generator menggunakan persamaan [12]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan:

η = Efisiensi (%)
 P_{out} = Daya Output (Watt)
 P_{in} = Daya Output (Watt)

Overheating adalah kondisi dimana mesin mengalami panas yang berlebih. Pada umumnya *overheat* terjadi pada generator yang mempunyai mesin dengan pendingin, namun tidak berfungsi secara maksimal. Kondisi generator yang mengalami *overheat* akan kehilangan tenaga saat digunakan. Pada generator akan mengeluarkan suhu jika generator sedang bekerja dibatas aman temperatur operasional suhu ideal generator adalah 80 °C. Hal ini disebabkan jika generator bekerja dengan beban penuh dari kapasitas generator secara terus menerus tanpa istirahat atau jeda [13]–[16].

Generator dilengkapi dengan sistem pendingin udara siklus terbuka, sistem pendingin udara terbuka biasanya digunakan pada generator skala kecil atau di bawah 60 MW. Udara dari luar masuk melewati filter untuk membuang partikel debu ataupun kontaminan, udara yang masuk kemudian diarahkan melalui celah pada rotor fan pendingin yang terpasang pada sisi rotor ketika rotor berputar udara pendingin bersirkulasi melalui lubang udara yang terdapat pada sisi rotor dan stator untuk selanjutnya udara dihembuskan keluar [17], [18].

Temperatur Stator

Salah satu contoh terbaik indikator yang dibuat dari pembacaan sensor menjadi model matematika adalah pengukuran temperatur keluaran pendingin belitan stator. Untuk membuat indikator ini dalam bentuk yang paling sederhana, salah satu yang harus dilihat apa yang mempengaruhi temperatur belitan stator selama beroperasi [19]. Kita tidak dapat mengukur temperatur belitan stator saat generator offline (tidak terhubung ke sistem) karena tidak ada arus yang mengalir pada belitan, akan tetapi khususnya ketika generator terhubung ke sistem dan berbeban.

Temperatur rata-rata pada belitan stator seperti persamaan [19].

$$T_{out} = T_{in} + dT_{ref} \left(\frac{I_s}{I_{ref}} \right)^2 \quad (8)$$

Keterangan:

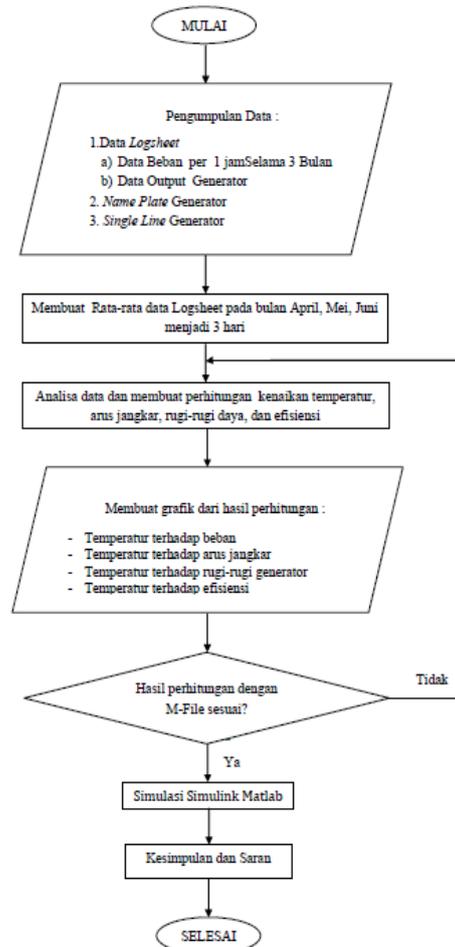
T_{out} = Temperatur keluar (°C)
 T_{in} = Temperatur pendingin masuk (°C)
 dT_{re} = Perbedaan antara temperatur masuk dan keluar (°C)
 I_s = Arus ketika beroperasi (Ampere)
 I_{ref} = Arus maksimum ketika beroperasi (Ampere)

2. METODE PENELITIAN

Data Teknis

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) MPP Balai Pungut PT. PLN (Persero). PLTG MPP Balai Pungut 3x25 MW memakai 3 unit generator, data yang digunakan yaitu data *logsheet* generator tm 2.

Untuk melengkapi data diperlukan data *logsheet* PLTG MPP Balai Pungut, Data penelitian menggunakan data *logsheet* bulan April, Mei, Juni 2021 dan dirata ratakan setiap bulannya.



Gambar 4. Flowchart Pelaksanaan Penelitian

Data Logsheet Generator

Tabel 1 Data Logsheet Generator Unit 2 Bulan April 2021

Jam	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)	Tegangan Output (kV)	Arus Eksitasi (If)	Tegangan Eksitasi (Vf)	T _m (°C)	T _{out} (°C)
00.00	16,16	1,41	11,4	3,80	18,51	52,08	67,76
01.00	14,65	1,46	11,4	3,44	17,31	49,33	62,49
02.00	14,85	1,39	11,4	3,40	17,41	49,78	62,60
03.00	14,54	1,41	11,4	3,34	18,43	49,12	62,42
04.00	14,03	1,31	11,4	3,21	16,25	49,10	62,20
05.00	14,89	1,31	11,4	4,12	19,37	50,73	63,16
06.00	16,98	1,49	11,4	4,38	21,85	51,79	67,67
07.00	17,01	1,25	11,5	3,71	19,20	51,70	69,96
08.00	17,03	1,57	11,5	4,23	22,73	52,30	70,57
09.00	19,16	1,45	11,5	3,98	23,57	54,92	72,19
10.00	22,27	1,33	11,5	4,60	24,14	64,01	84,45
11.00	23,05	1,64	11,5	4,87	25,35	64,26	85,43
12.00	22,97	1,54	11,5	5,07	26,89	64,21	84,68
13.00	20,9	1,46	11,5	5,01	25,97	63,06	82,92
14.00	21,35	1,42	11,5	5,11	25,74	63,5	83,62
15.00	22,3	1,51	11,5	4,77	25,13	64,15	84,58
16.00	21,14	1,52	11,5	4,64	24,39	63,13	84,02
17.00	20,73	1,44	11,5	3,89	24,03	63,02	80,29
18.00	19,56	1,32	11,5	3,24	24,86	59,86	78,12
19.00	19,14	1,48	11,5	4,01	25,90	59,87	74,12
20.00	19,11	1,46	11,5	5,25	24,87	59,59	72,82
21.00	19,07	1,43	11,4	4,19	23,03	55,11	72,34
22.00	18,87	1,42	11,4	4,17	21,71	55,03	71,76
23.00	18,05	1,40	11,4	4,03	21,01	52,89	70,83

Data teknis karakteristik dari rugi-rugi generator seperti Tabel 2.

Tabel 2 Data karakteristik rugi-rugi generator berdasarkan persentase beban (kW)

Persentase Beban	100	95	90	85	80	60
Friction and Windage Loss	460	460	460	460	460	460
Core Loss	293	293	293	293	293	293
Armature I ² R Loss	216,7	195,6	175,5	156,6	138,7	78
Stray Load Loss	179	162	147	130	115	63
Field I ² R Loss	177,1	167,6	159	149,9	141,8	112,3
Brush Electrical Loss	2,1	2	1,9	1,9	1,8	1,6

Besar rugi-rugi angin dan gesekan serta rugi-rugi inti besi adalah konstan selama generator beroperasi. Untuk rugi-rugi tembaga kumparan jangkar, rugi-rugi tembaga kumparan medan, rugi-rugi *stray* dan rugi-rugi *brush* bervariasi tergantung pada beban generator [15].

Spesifikasi Teknis Generator yang diteliti adalah seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi Teknis Generator

Parameter	Spesifikasi
Merk	Brush Synchronous Machine
Type	Turbo Generator
Tegangan	11500 / 13800 V
Arus	1718 / 1627 A
Rev/Min	3000 / 3600 Rpm
Pf	0,9
Resistansi Stator	0,00314 Ohm
Power	34222 / 38889 kVA
Frequensi	50/60 Hz

Conection	Y
Coolant	Air at 15°C
Tegangan Eksitasi	165/148 V
Arus Eksitasi	1031/986 A

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari data teknis Generator Sinkron didapatkan, kecepatan medan putar generator adalah

$$n_s = \frac{120 (f)}{p} = \frac{120 (50)}{2} = 3000 \text{ rpm}$$

Dari data logsheet Generator Sinkron didapatkan : Menghitung *cosφ* generator adalah

$$\phi = \tan^{-1} \frac{Q}{P} = \tan^{-1} \frac{1,41}{16,16} = 4,999$$

$$\cos 4,999 = 0,996$$

Tabel 4. Rugi-rugi total generator unit 2 PLTG MPP Balai Pungut bulan April

Jam	Daya Aktif (MW)	T _{out} (°C)	Pa&g (kW)	Pi (kW)	Ptj (kW)	Pstray (kW)	Ptm (kW)	Pbrush (kW)	ΣPloss (kW)
00.00	16,16	59,94	460	293	63,579	75,064	119,121	1,646	1,012
01.00	14,65	54,77	460	293	52,374	59,360	110,242	1,586	0,977
02.00	14,85	55,21	460	293	53,751	61,440	111,418	1,594	0,981
03.00	14,54	54,53	460	293	51,563	58,216	109,593	1,582	0,974
04.00	14,03	54,06	460	293	47,976	52,912	106,596	1,561	0,962
05.00	14,89	56,02	460	293	53,985	61,836	111,653	1,596	0,982
06.00	16,98	60,58	460	293	70,201	71,424	117,063	1,632	1,013
07.00	17,01	61,65	460	293	69,070	84,112	124,236	1,681	1,032
08.00	17,03	62,31	460	293	69,448	79,536	121,649	1,664	1,025
09.00	19,16	66,86	460	293	87,663	106,264	136,861	1,766	1,086
10.00	22,27	83,06	460	293	118,175	143,872	157,326	1,900	1,174
11.00	23,05	85,43	460	293	126,787	154,480	163,004	1,944	1,199
12.00	22,97	84,53	460	293	125,837	153,392	162,422	1,938	1,197
13.00	20,9	79,38	460	293	104,219	125,800	147,632	1,872	1,133
14.00	21,35	80,75	460	293	108,706	131,200	150,548	1,908	1,145
15.00	22,3	83,26	460	293	118,614	144,280	157,544	1,900	1,175
16.00	21,14	80,70	460	293	106,657	128,680	149,187	1,891	1,139
17.00	20,73	76,99	460	293	102,525	123,760	146,530	1,858	1,128
18.00	19,56	73,00	460	293	91,254	145,096	157,981	1,900	1,149
19.00	19,14	69,70	460	293	87,502	169,800	172,072	2,052	1,184
20.00	19,11	68,69	460	293	87,215	141,968	156,306	1,900	1,140
21.00	19,07	67,12	460	293	88,362	120,520	144,781	1,837	1,108
22.00	18,87	66,45	460	293	86,522	107,512	137,566	1,771	1,086
23.00	18,05	64,10	460	293	79,194	94,720	130,334	1,722	1,059

Arus jangkarnya adalah

$$I_a = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos \phi} = \frac{16,16}{\sqrt{3} \times 11,4 \times 0,996} = 821,545 \text{ A}$$

Menghitung daya *output* generator sinkron adalah

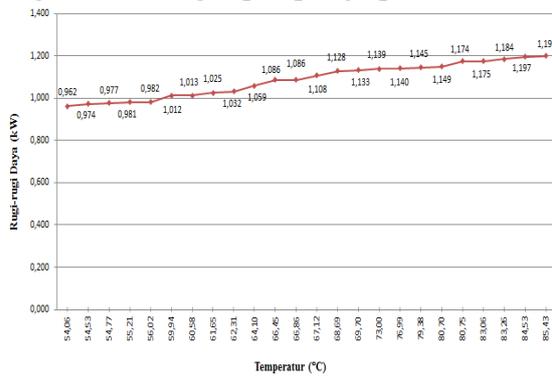
$$P_{out} = \sqrt{3} \times V_{\phi} \times I_A \times \cos \phi$$

$$= \sqrt{3} \times 11,4 \times 821,545 \times 0,996$$

$$= 16.156 \text{ MW}$$

Dari data teknis karakteristik rugi-rugi generator pada Tabel 2 didapatkan hasil perhitungan rugi rugi generator. Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 4 diatas diperoleh grafik untuk melihat perubahan temperatur terhadap rugi-

rugi generator. Gambar 5 menunjukkan perubahan temperatur terhadap rugi-rugi daya generator.



Gambar 5. Temperatur Terhadap Rugi-rugi Total Bulan April 2021.

Berdasarkan Gambar 5 maka kenaikan temperatur di bulan april 2021 disebabkan oleh rugi-rugi daya, semakin tinggi temperatur nya maka rugi-rugi daya nya meningkat, dimana temperatur terendah adalah 54,06°C dengan rugi-rugi daya 0.962 kW dan temperatur tertinggi adalah 85,43°C dengan rugi-rugi daya 1.199 kW.

Berdasarkan data *logsheet* besarnya nilai arus, temperatur udara yang masuk, dan temperatur udara keluar yang telah diukur, temperatur rata-rata pada belitan stator dapat menggunakan persamaan berikut:

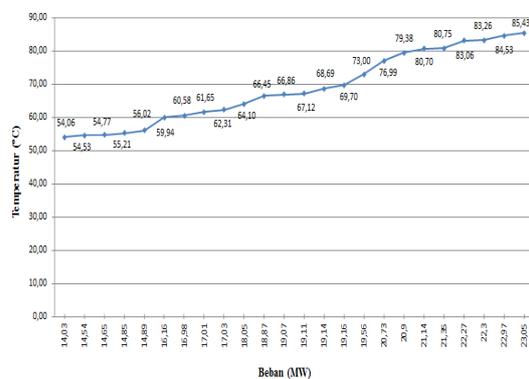
$$T_{out} = T_{in} + dT_{ref} \left(\frac{I_s}{I_{ref}} \right)^2$$

$$T_{out} = 52,08 + (67,7 - 52,08) \left(\frac{821,545}{1122,129} \right)^2$$

$$T_{out} = 52,08 + (15,68) \times (0,536)$$

$$T_{out} = 60,48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Untuk hasil perhitungan T_{out} pada bulan April di jam 00.00 sampai 23.00, maka didapat hasil T_{out} dalam. Tabel 5.



Gambar 6. Temperatur Terhadap Beban Bulan April 2021.

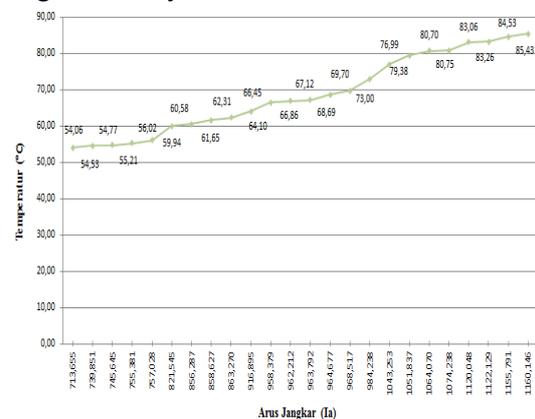
Dari Tabel 5 dapat dibuat grafik untuk melihat perbandingan perubahan temperatur akibat perubahan beban dan arus jangkar generator per

jamnya. Gambar 6 dan 7 menunjukkan perubahan temperatur akibat perubahan beban dan arus jangkarnya.

Tabel 5. Hasil Perhitungan T_{out} Bulan April.

Jam	Daya Aktif (MW)	Ia (A)	T_{out} (°C)
00.00	16,16	821,545	59,94
01.00	14,65	745,645	54,77
02.00	14,85	755,381	55,21
03.00	14,54	739,851	54,53
04.00	14,03	713,655	54,06
05.00	14,89	757,028	56,02
06.00	16,98	863,270	60,58
07.00	17,01	856,287	61,65
08.00	17,03	858,627	62,31
09.00	19,16	964,677	66,86
10.00	22,27	1120,048	83,06
11.00	23,05	1160,146	85,43
12.00	22,97	1155,791	84,53
13.00	20,9	1051,837	79,38
14.00	21,35	1074,238	80,75
15.00	22,3	1122,129	83,26
16.00	21,14	1064,070	80,70
17.00	20,73	1043,253	76,99
18.00	19,56	984,238	73,00
19.00	19,14	963,792	69,70
20.00	19,11	962,212	68,69
21.00	19,07	968,517	67,12
22.00	18,87	958,379	66,45
23.00	18,05	916,895	64,10

Berdasarkan Gambar 6 maka kenaikan temperatur di bulan april 2021 disebabkan oleh beban, semakin besar bebannya maka temperaturnya meningkat, dimana temperatur yang terendah adalah 54,06 °C dengan beban nya 14,03 MW dan temperatur tertinggi adalah 85,43 °C dengan beban nya 23,05 MW.



Gambar 7. Temperatur Terhadap Arus Jangkar Bulan April 2021.

Berdasarkan Gambar 7 maka dapat di jelaskan bahwa kenaikan temperatur di bulan april 2021

disebabkan arus jangkar, semakin besar arus jangkar yang dihasilkan maka temperatur nya meningkat, dimana temperatur terendah adalah 54,06 °C dengan arus jangkar 713,655 A dan temperatur tertinggi adalah 85,43 °C dengan arus jangkar 1160,146 A. Perbandingan temperatur Data Logsheet dengan hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Temperatur Data Logsheet dengan Hasil Perhitungan Bulan April.

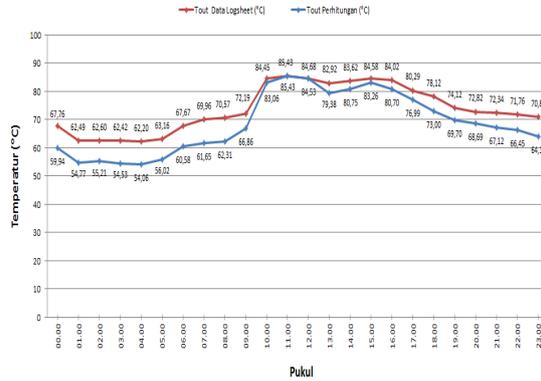
Jam	Daya Aktif (MW)	Temperatur (°C)	
		Data Logsheet	Hasil Perhitungan
00.00	16,16	67,76	59,94
01.00	14,65	62,49	54,77
02.00	14,85	62,60	55,21
03.00	14,54	62,42	54,53
04.00	14,03	62,20	54,06
05.00	14,89	63,16	56,02
06.00	16,98	67,67	60,58
07.00	17,01	69,96	61,65
08.00	17,03	70,57	62,31
09.00	19,16	72,19	66,86
10.00	22,27	84,45	83,06
11.00	23,05	85,43	85,43
12.00	22,97	84,68	84,53
13.00	20,90	82,92	79,38
14.00	21,35	83,62	80,75
15.00	22,30	84,58	83,26
16.00	21,14	84,02	80,70
17.00	20,73	80,29	76,99
18.00	19,56	78,12	73,00
19.00	19,14	74,12	69,70
20.00	19,11	72,82	68,69
21.00	19,07	72,34	67,12
22.00	18,87	71,76	66,45
23.00	18,05	70,83	64,10

Dari hasil tabel 6 diatas dapat dibuat grafik untuk melihat perbandingan temperatur data Logsheet dengan hasil perhitungan generator per jam nya sesuai pada Gambar 8. Berdasarkan Gambar 8 maka didapat perbandingan temperatur data Logsheet dengan hasil perhitungan. Dimana temperatur terendah pada data logsheet adalah 62,20°C sedangkan pada hasil perhitungan adalah 54,06°C dan temperatur tertinggi pada data logsheet adalah 85,43°C sedangkan pada hasil

perhitungan adalah 85,43°C. Untuk menghitung efisiensi generator menggunakan persamaan berikut.

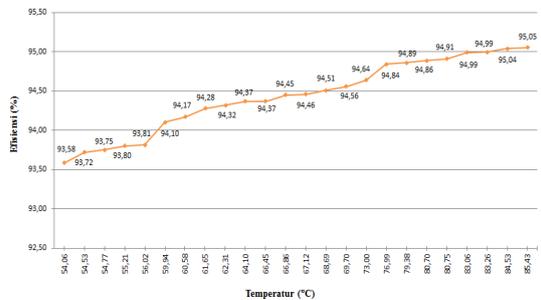
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{losses}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{16,16}{16,16 + 1,012} \times 100\% = 94,10 \%$$

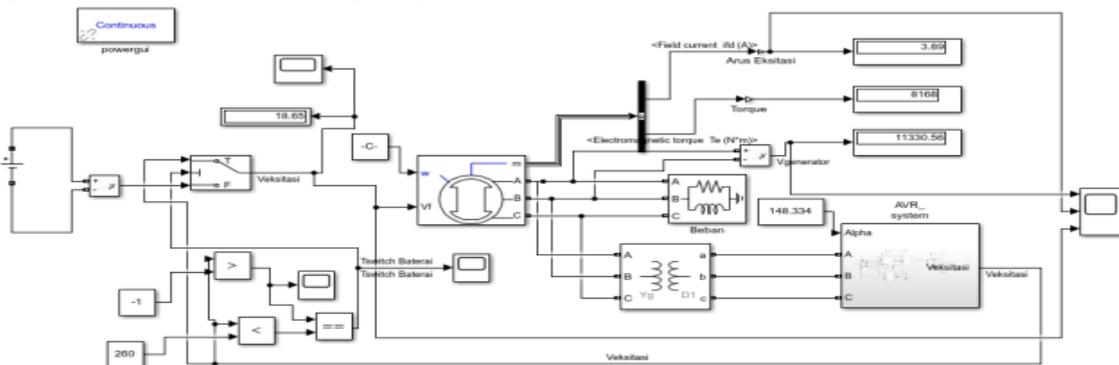


Gambar 8. Perbandingan Data Logsheet Temperatur dengan Hasil Perhitungan Temperatur Bulan April 2021

Dari hasil perhitungan di atas maka diperoleh efisiensi generator unit 2 PLTG MPP Balai Pungut dari bulan april 2021 yang di tunjukkan dalam Tabel 7. Dari hasil Tabel 7 dapat dibuat grafik untuk melihat perbandingan perubahan temperatur terhadap efisiensi generator. Gambar 9 menunjukan perubahan temperatur dibawah ini.



Gambar 9. Temperatur Terhadap Efisiensi Bulan April 2021.



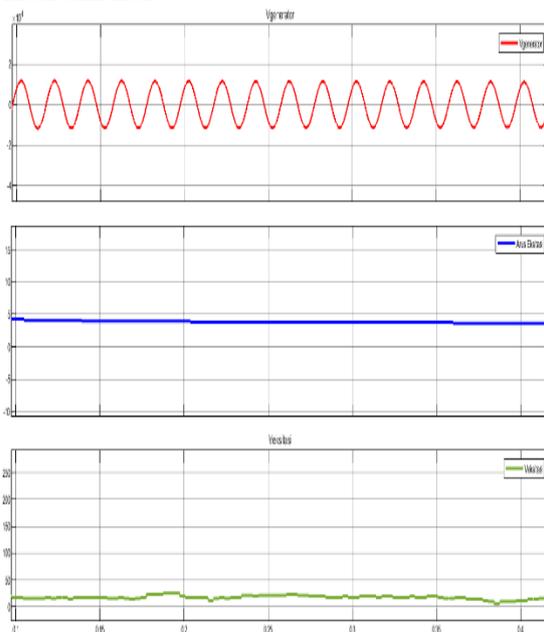
Gambar 10. Simulasi Simulink Generator Sinkron Tiga Fasa pada Pengujian Beban P = 16,16 MW, Q = 1,41 MVAR

Tabel 7. Efisiensi Generator Unit 2 Bulan April 2021
 PLTG MPP Balai Pungut.

Jam	Daya Aktif (MW)	Σ Ploss (kW)	Efisiensi %
00.00	16,16	1,012	94,10
01.00	14,65	0,977	93,75
02.00	14,85	0,981	93,80
03.00	14,54	0,974	93,72
04.00	14,03	0,962	93,58
05.00	14,89	0,982	93,81
06.00	16,98	1,013	94,37
07.00	17,01	1,032	94,28
08.00	17,03	1,025	94,32
09.00	19,16	1,086	94,64
10.00	22,27	1,174	94,99
11.00	23,05	1,199	95,05
12.00	22,97	1,197	95,05
13.00	20,90	1,133	94,86
14.00	21,35	1,145	94,91
15.00	22,30	1,175	94,99
16.00	21,14	1,139	94,89
17.00	20,73	1,128	94,84
18.00	19,56	1,149	94,45
19.00	19,14	1,184	94,17
20.00	19,11	1,140	94,37
21.00	19,07	1,108	94,51
22.00	18,87	1,086	94,56
23.00	18,05	1,059	94,46

Berdasarkan Gambar Grafik 9 maka dapat dijelaskan bahwa kenaikan temperatur terhadap efisiensi dibulan april 2021 dimana temperatur terendah adalah 54,06°C dengan efisiensi nya 93,58 % dan temperatur tertinggi adalah 85,43°C dengan efisiensi nya 95,05 %.

Hasil Simulasi



Gambar 11. Gelombang tegangan eksitasi V_f , arus eksitasi I_f , dan tegangan output generator V_{out}

Gambar 11 menunjukkan gelombang:

- Gelombang pertama (warna merah) menunjukkan gelombang tegangan output yang dihasilkan generator sebesar 11,33 kV.
- Gelombang kedua (warna biru) menunjukkan gelombang arus eksitasi I_f , sebesar 3,89 Ampere yang dihasilkan generator.
- Gelombang ketiga (warna hijau) menunjukkan gelombang tegangan eksitasi V_f , yang masuk keblok generator sebesar 18,65 VDC.

```

=====
Bulan April 2021 Jam 00.00 WIB
=====
-----
Perhitungan Generator Sinkron
-----
Daya Generator           = P           = 16160000 W
Tegangan Terminal Generator = Vt          = 11400 V
Kecepatan Putaran Sinkron = ns          = 3000 rpm
Daya Output              = Pout        = 16160 MW
Resistansi Stator        = Rl          = 0.00314 ohm
Arus Jangkar              = Ia          = 821.545 A
Impedansi Sinkron        = Zs          = 13.8736 Ohm
Reaktansi Sinkron         = Xs          = 13.8736 Ohm
Tegangan Induksi         = Ea          = 11402.5802+11399.9997i V
Magnitud Tegangan Induksi = Ea_mag      = 16123.859 V
Sudut Tegangan Induksi   = sudut_Ea   = 44.9935 derajat
-----
Perhitungan Kenaikan Temperatur
-----
Temperatur Masuk         = Tin         = 52.08 derajat
Temperatur Keluar        = Tout        = 67.76 derajat
Arus Ketika Beroperasi   = Is          = 821.545 A
Arus Max Ketika Beroperasi = Iref        = 1160.146 A
Kenaikan Temperatur      = Toutput    = 59.9429 derajat
-----
Perhitungan Rugi-rugi Total dan Efisiensi
-----
Daya Output              = Pout        = 16160 MW
Rugi Angin dan Gesekan   = Pag         = 460 kW
Rugi Inti Besi            = Pi          = 292 kW
Rugi Kumparan Jangkar     = Ptj         = 63.579 kW
Rugi Stray                = Pstray      = 75.064 kW
Rugi Tembaga Kumparan Medan = Ptm         = 119.1208 kW
Rugi Brush                = Pbrush      = 1.6464 kW
Rugi Total                = Ptotal      = 1011.4102 kW
Efisiensi                 = Eff         = 94.1099 %
-----
    
```

4. KESIMPULAN

Kenaikan temperatur disebabkan oleh pengaruh beban dan arus jangkar yang bervariasi. Temperatur tertinggi terjadi pada bulan April dengan temperatur 85,43°C pada beban 23,05 MW dan arus jangkar 1160,146 A, serta temperatur terendah terjadi pada bulan Mei dengan temperatur 53,47°C pada beban 12,60 MW dan arus jangkar 641,915 A. Efisiensi generator sinkron unit 2 PLTG MPP Balai Pungut dipengaruhi oleh rugi-rugi total yang menyebabkan terjadinya *overheating*. Semakin meningkat efisiensi nya maka rugi-rugi

total nya juga meningkat, efisiensi terendah yang terjadi pada bulan April, Mei, Juni 2021 terdapat pada bulan Mei dengan efisiensi 93,03% dan rugi-rugi total nya 0,930 kW, serta efisiensi tertinggi terdapat pada bulan April dengan efisiensi 95,05% dan rugi-rugi total nya 1.199 kW.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. D. Marsudi, *Pembangkit Energi Listrik*. Ciracas, Jakarta: Erlangga, 2005.
- [2] P. R. H. Marpaung, H. Eteruddin, and D. Setiawan, "Studi Perubahan Beban Terhadap Kinerja AVR pada Generator Sinkron Unit 2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT. Ubjom Tenayan Raya," in *Seminar Nasional Karya Ilmiah Multidisiplin*, 2021, pp. 96–109.
- [3] H. Eteruddin, M. Ridwan, Monice, Zulfahri, Y. Z. Arief, and F. Hasanti, "Coal Fuel Efficiency with Mixed Palm Shell Biomass for Steam Power Plant," in *2021 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 2021, pp. 148–153.
- [4] Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 2000.
- [5] I. H. Berahim, *Pengantar Teknik Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Andi Offset, 1996.
- [6] R. A. Sinaga, H. Eteruddin, and A. Tanjung, "Pengaruh Kapasitor Terhadap Faktor Daya Motor Induksi Tiga Fasa di PT. Malindo Karya Lestari," *Jurnal Teknik*, vol. 15, no. 2, pp. 85–93, 2021.
- [7] A. K. T. B.L. Theraja, *A Text Book Of Electrical Technology In S.I. Unit Volume II*, First Mult. New Delhi: S.Chand And Company Limited, 2001.
- [8] T. Wildi, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems Fifth Edition Upper Saddle River*, Fifth. Columbus, Ohio: Prentice Hall, 2002.
- [9] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [10] Y. Rijono, *Dasar Teknik Tenaga Listrik*, Edisi Revi. Yogyakarta: Andi Offset, 2014.
- [11] H. S. Muslim, *Teknik Pembangkit Listrik*, vol. 4. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008.
- [12] B. S. Guru and H. R. Hiziroglu, *Electric Machinery and Transformers*, 3rd ed. New York: Oxford University Press, 2001.
- [13] A. Abdullah and I. H. Rosma, "Proteksi Panas Lebih Pada Generator Berbasis Smart Relay," *Jom FTeknik Vol 5. No.1 April 2018*, vol. 5, no. 1, pp. 1–5, 2018.
- [14] A. D. Augustama and Sujono, "Kontrol Suhu Pada Generator Set Dengan Menggunakan Mikrokontroler," *J. Maest. Vol.3 No.2. Oktober 2020, ISSN 2655 - 3430*, vol. 3, no. 2, pp. 413–418, 2020.
- [15] D. G. Ferdyeputra, *Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur Belitan Terhadap Kinerja Generator Pada PLTA Siguragura*. Medan: Departemen Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara, 2018.
- [16] IEEE Std 1-1969, *IEEE General Principles For Temperature Limits In The Rating Of Electric Equipment*, no. 1. New York, USA: The Institute of Electrical Engineers, Inc, 1969.
- [17] A. N. Sandrayanto and K. F. Mauladi, "Sistem Pakar Diagnosa Overheating Pada Kendaraan Bersistem Pendingin Air," *J. Tek. A Vol .9. No.1. ISSN 2085-0859*, vol. 9, no. 1, pp. 1–5, 2017.
- [18] K. Y. Taufik, "Analisis Pengaruh Temperatur Stator terhadap Rugi-Rugi Daya Generator Unit 2 PLTP Kamojang," *J. Algoritm. Vol.19, No.1, P-ISSN1412-3622, E-ISSN2302-7339*, vol. 19, pp. 204–215, 2021.
- [19] G. Klemptner and I. Kerszenbaum, *IEEE Handbook Of Large Turbo Generator Operation And Maintenance*, Second. Hoboken: A Jonh Wiley & Sons, Inc., 2008.