

Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator 55 MW Unit 3 di PLN Indonesia Power UBP Kamojang

Rafli Fadilah¹, Sofian Yahya², Sofyan Muhammad Ilman³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559

E-mail : ¹rafli.fadilah.tlis21@polban.ac.id ;

²sofianyahya@polban.ac.id ;

³sofyan.muhammad@polban.ac.id

ABSTRAK

Kebutuhan energi yang meningkat menempatkan tekanan besar pada infrastruktur pembangkit listrik. Generator adalah komponen utama dalam pembangkit listrik, dan kinerjanya dipengaruhi oleh efisiensi. Standar efisiensi generator sinkron di atas 85% menurut IEC 60034-1 tahun 2017. Efisiensi generator dapat berubah karena rugi-rugi saat pembebanan. Penelitian ini bertujuan menghitung data pembebanan, rugi-rugi, dan efisiensi pada generator unit 3 di PLN Indonesia Power UBP Kamojang, serta menguji kapasitas pembebanan 10–95%, dan menganalisis pengaruhnya terhadap efisiensi. Metode penelitian melibatkan pengumpulan data dari 2023–2024 selama 9 bulan dan dihitung menggunakan simulasi aritmatika Matlab dan simulasi *loadflow* pada ETAP. Hasil menunjukkan pembebanan rata-rata 43,8 MW dengan efisiensi 99,05%, pembebanan terbesar Januari 2023 sebesar 46,40 MW dengan efisiensi 99,06%, dan pembebanan terkecil Februari 2024 sebesar 41,9 MW dengan efisiensi 99,06%. Pengujian beban 95%-10% menunjukkan efisiensi lebih besar pada pembebanan 95% dibandingkan beban 80%-10%, karena efisiensi generator meningkat dengan pembebanan besar meskipun rugi tembaga bertambah, sementara rugi mekanik dan besi tetap konstan. Peningkatan daya keluaran lebih signifikan dibandingkan peningkatan rugi-rugi, sehingga efisiensi keseluruhan meningkat. Sebaliknya, rugi tembaga yang menurun dengan rugi besi dan mekanik konstan menyebabkan efisiensi turun.

Kata Kunci

Pltp; Pembebanan; Generator; Rugi-rugi; Efisiensi.

Increasing energy demand puts enormous pressure on power generation infrastructure. The generator, a key component in power plants, has performance influenced by efficiency, with the standard for synchronous generators being above 85% according to IEC 60034-1 of 2017. Generator efficiency varies due to losses during loading. This research aims to calculate loading, losses, and efficiency for the unit 3 generator at PLN Indonesia Power UBP Kamojang, test the loading capacity of 10–95%, and analyze its effect on efficiency. The method includes collecting data for 2023–2024 and using Matlab arithmetic and ETAP load flow simulations. Results show an average loading of 43.8 MW with 99.05% efficiency, the highest loading in January 2023 at 46.40 MW with 99.06% efficiency, and the lowest in February 2024 at 41.9 MW with 99.06% efficiency. The 95%-10% load test shows greater efficiency at 95% load compared to 80%-10% load. Generator efficiency increases with large loads despite rising copper losses, as mechanical and iron losses remain constant. The significant increase in output power outweighs the increase in losses, boosting overall efficiency. Conversely, decreasing copper losses with constant iron and mechanical losses reduces efficiency.

Keywords

Pltp; Loading; Generator; Losses; Efficiency.

1. PENDAHULUAN

Unit Bisnis Pembangkitan Kamojang terdapat 7 unit Pembangkit Tenaga Listrik Panas Bumi dengan kapasitas sebesar 375 MW. Dengan 3 Sub Unit terpisah, yaitu PLTP Kamojang (3 Unit) di Kabupaten Bandung, PLTP Darajat (1 Unit) di

Kabupaten Garut, dan PLTP Gunung Salak (3 Unit) di Kabupaten Sukabumi. Panas bumi adalah sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan. Uap panas bumi di PLN Indonesia Power Kamojang diperoleh dari sumur-sumur produksi PT. Pertamina *Geothermal Energy*. Uap yang

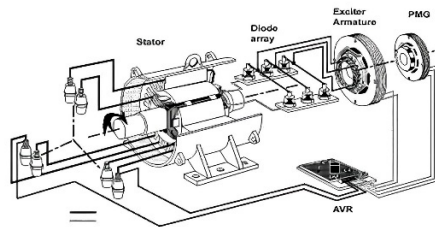
dihasilkan memiliki keunggulan, yaitu uap yang sangat kering (very dry) dengan kelembapan uap yang rendah, sehingga uap tersebut dapat langsung masuk ke turbin yang dikopel dengan generator.

1.1 Generator Sinkron

Generator berfungsi mengubah gaya gerak mekanik menjadi daya listrik, Energi mekanik dihasilkan oleh putaran rotor yang digerakkan oleh turbin, energi listrik dihasilkan oleh proses induksi yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya. Ini dikenal sebagai generator sinkron karena jumlah putaran rotor yang dibuat oleh turbin setara dengan jumlah putaran medan magnet yang dihasilkan pada stator dalam generator sinkron.

1.2 Cara Kerja Generator Sinkron

Dua komponen utama generator adalah rotor dan stator. Stator adalah komponen stasioner generator yang menghasilkan ggl untuk menghasilkan output tegangan. Rotor bertindak sebagai komponen yang bergerak dari generator dan menghasilkan medan magnet yang bergesekan dengan kumparan stator. Generator umumnya terdapat sistem eksitasi yang mana sistem eksitasi pada PLTP Kamojng ini adalah Sistem eksitasi *Brushless Excitation*.



Gambar 1 Kontruksi Generator Sinkron dan Sistem Eksitasi Dalam (Sumber gambar : Generator AC – Imam Nugroho)

Prinsip kerja Generator Sinkron dengan eksitasi dalam

- 1) PMG berputar dan menghasilkan tegangan AC lalu disearahkan dan dimasukkan ke AVR untuk diatur besaran teganganya.
- 2) Tegangan yang sudah disearahkan dan diatur di AVR selanjutnya dimasukkan ke generator *exciter* untuk menghasilkan ggl 3 fasa.
- 3) Tegangan 3 fasa yang dihasilkan generator *exciter* disearahkan oleh *diode array* sebelum di alirkan menuju rotor pada generator utama.
- 4) Tegangan yang sudah disearahkan kemudian di alirkan menuju rotor untuk membuat medan magnet yang nantinya koil rotor

berpotongan dengan koil stator lalu akan menghasilkan tegangan listrik 3 fasa.

Sistem eksitasi yang digunakan di PLN Indonesia Power UBP Kamojang unit 3 ini adalah Sistem eksitasi tanpa sikat (*Brushless Excitation*). Kinerja dari generator ini di pengaruhi oleh nilai efisiensi dalam konteks seberapa baik generator tersebut bekerja. Oleh karena itu, generator harus beroperasi dengan efisiensi yang tinggi agar energi listrik yang dihasilkan bisa berkualitas. Efisiensi generator adalah perbandingan antara daya keluaran yang dihasilkan dengan daya masukan yang diperlukan. Agar energi listrik yang dihasilkan berkualitas, generator harus beroperasi dengan efisiensi tinggi. Menurut standar “IEC 60034-1 tahun 2017 (1)“, efisiensi generator sinkron sebaiknya di atas 85%, sedangkan manual book generator unit 3 PLTP Kamojang dalam jurnal “M. Muharrir, I. Hajar, (2)“, mencatat efisiensi sebesar 98,4%. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi generator, menghitung rugi-rugi dan efisiensi saat pembebanan generator, serta membandingkan hasil analisis efisiensi bulanan akibat perubahan pembebanan generator. Dengan memahami dinamika efisiensi dalam berbagai kondisi beban dan perhitungan kerugian, diharapkan dapat diperoleh wawasan yang berguna untuk meningkatkan kinerja generator di masa mendatang.

Menurut para peneliti, Penelitian oleh “Fitri Wildani, et al., (3)“, menjelaskan bahwa efisiensi generator dipengaruhi oleh hilangnya beban dan unit shutdown. Untuk menelusuri nilai efisiensi, penulis menggunakan data pembebanan generator, kurva pembebanan, nameplate generator, dan rugi-rugi daya pada pembebanan 50%, 80%, dan 100%. Menurut “Ashar AR, et al., (4)“, menganalisis efisiensi maksimum generator dengan berbagai pembebanan (25%, 50%, 75%, dan 100%), menunjukkan efisiensi optimal mendekati 100%. Menurut “Zella Agatha Angelina S, et al., (5)“, menemukan bahwa fluktuasi beban mempengaruhi efisiensi melalui rugi tembaga, mekanik, besi, dan stray. Sedangkan menurut “Ichsan Refaldi, et al., (6)“, menyatakan bahwa efisiensi tergantung pada jumlah muatan dan faktor daya ($\cos \phi$), di mana penurunan faktor daya mengurangi efisiensi. Lalu menurut “Rian Manangka, et al., (7)“, menemukan bahwa peningkatan beban (12 MW dan 19 MW) meningkatkan efisiensi generator. Menurut “Annisa, et al., (8)“, menunjukkan bahwa waktu beban maksimum (19:00-21:00 WIB) mempengaruhi arus eksitasi dan faktor daya, yang

menurunkan efisiensi. Menurut “Ficki Candra, (9)”, menemukan bahwa efisiensi dipengaruhi oleh ukuran beban dan rugi-rugi total dalam generator, terutama oleh arus pada generator dan arus eksitasi. Menurut “Annisa, et al., (10)”, bahwa beban harian generator unit 1 & 2 bersifat sangat fluktuatif dengan puncak pada pukul 19.00–21.00 WIB. Perubahan beban tidak terlalu mempengaruhi tegangan output karena peran AVR sebagai stabilisator. Perubahan beban berbanding lurus dengan perubahan arus beban dan arus eksitasi pada exciter. Perubahan beban juga mempengaruhi cos phi generator, yang berdampak langsung pada efisiensi generator, dengan rentang efisiensi 97,12% hingga 98,73%. Simulasi dengan Simulink Matlab menunjukkan bahwa gangguan pada input dan output generator harus dihindari untuk menjaga kestabilan dan mencegah kerusakan. Untuk menjaga kestabilan generator, perubahan beban harus diatur agar tidak terlalu signifikan dan batas maksimum beban harus diperhatikan. Menurut “Muhammad Noer (11)”, Nilai efisiensi generator di PLTG Borang sangat dipengaruhi oleh beban yang fluktuatif, dengan beban puncak antara 10,2-10,6 MW pada pukul 16.00-20.00 WIB. Efisiensi juga dipengaruhi oleh rugi daya beban, yang berkisar antara 0,0112-0,0136 MW. Perhitungan rugi daya menggunakan MATLAB menghasilkan nilai yang lebih besar dibandingkan perhitungan manual. Pada periode 16-18 Maret 2016, rata-rata efisiensi generator di PLTG Borang adalah 99,88%, dengan perbedaan antara perhitungan manual dan MATLAB hanya 0,01%. Berdasarkan analisa “Riza Azharny (12)”, efisiensi spesifikasi unit 1 adalah 97,50% dan unit 2 adalah 96,61%; data harian menunjukkan rata-rata efisiensi unit 1 sebesar 93,88% (tertinggi 97,00%, terendah 73,15%) dan unit 2 sebesar 82,49% (tertinggi 88,17%, terendah 73,68%), dengan perbedaan efisiensi antara data spesifikasi dan data harian sebesar 3,62% untuk unit 1 dan 14,12% untuk unit 2, menunjukkan bahwa efisiensi unit 1 lebih baik daripada unit 2 di PLTA Sipansihaporas.

Dengan demikian dilakukanlah pengujian serta penelitian dengan objek studi generator unit 3 di PLN Indonesia Power UBP Kamojang yang berkapasitas 55 MW dengan pengambilan data selama 9 bulan di tahun 2023-2024.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PLN Indonesia Power UBP Kamojang, terletak di Desa, Laksana, Kec.

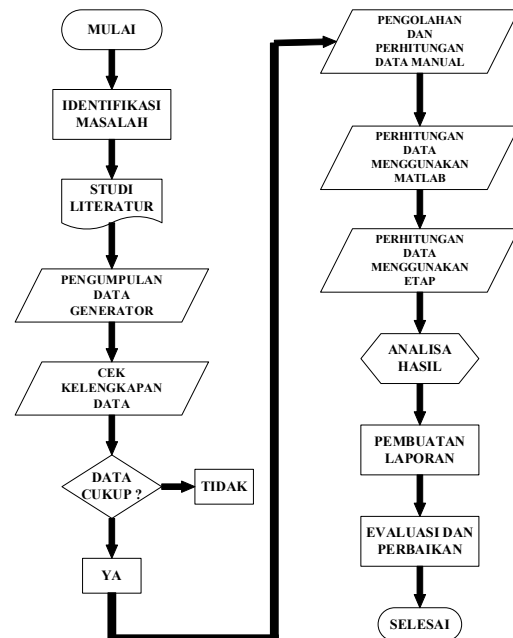
Ibun, Kabupaten Bandung, Jawa Barat 40384. Pengambilan data dilakukan pada bulan Januari, Februari, Mei, Juni, Juli, Agustus, September di tahun 2023 dan bulan Januari dan Februari 2024.

2.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi dan wawancara langsung bersama pihak PLTP Kamojang khususnya di bagian *Engineer* dan *Controlroom*. Data-data dikumpulkan meliputi data beban harian generator, data *nameplate* generator dan data resistansi stator dan rotor. Pengumpulan data juga dilakukan dengan cara mendokumentasikan data-data pendukung tentang generator.

2.3 Teknik Analisis Data

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian kuantitatif. Metode penelitian kuantitatif merupakan suatu metode penelitian yang berupa kajian yang bersifat ilmiah dengan menentukan variabel berupa data yang kemudian di analisis hasilnya. Metode kuantitatif ini mampu menjabarkan korelasi antara dua variabel yang digunakan. Pada penelitian ini, variabel yang dikorelasikan adalah pengaruh pembebanan terhadap efisiensi generator unit 3 di PLTP Kamojang.



Gambar 2 Flowchart Penelitian

2.3.1 Pengolahan dan Perhitungan Data

Untuk mengetahui besarnya efisiensi yang dihasilkan selama pembebanan ini perlu diketahui terlebih dahulu rugi-rugi yang dihasilkan selama

pembebanan berlangsung agar bisa mencari nilai daya masukan yang nantinya dibandingkan dengan daya keluaran generator yang diketahui. Berikut merupakan cara untuk mencari rugi-rugi dan efisiensi secara manual dan menggunakan software Matlab, ETAP dan SPSS.

2.3.1.1 Rugi – Rugi Generator

Pada saat operasi generator, total daya input sama dengan total daya output. Namun, karena ada kegagalan pada generator, itu berdampak pada nilai daya keluaran. Ketika generator berjalan, semua kekuatan generator digunakan untuk mengkompensasi kerugian tembaga dan kerugian mekanis yang telah terjadi.

Rugi – rugi generator terdapat 3 kerugian yaitu :

1. Rugi – rugi Tembaga

Dalam belitan rotor dan stator terdapat rugi tembaga, kerugian ini terjadi karena hambatan pada kawat tembaga yang digunakan dalam lilitan rotor dan stator. Kerugian tembaga ada dua di stator dan di rotor, untuk di stator yaitu:

$$PSCL = 3I_a^2 R_a \quad (1)$$

Untuk di rotor persamaannya yaitu,

$$PRCL = I_f^2 R_f \quad (2)$$

Jadi persamaan untuk Rugi-rugi Tembaga yaitu,

$$P_{Cu} = PSCL + PRC \quad (3)$$

Nilai rugi tembaga berada pada rentang 30% - 40% dari total beban yang terisi penuh. Dengan demikian persamaan rugi beban penuh seperti yang berikut (Muhammad Noer, 2017) :

$$\text{Rugi beban penuh} = P_{Cu} / 40\% \quad (4)$$

2. Rugi – rugi inti (Besi)

Kerugian inti terdiri dari kerugian eddy current dan histerisis. Rugi histerisis terjadi karena medan magnet bolak-balik didalam inti besi, sedangkan rugi arus eddy terjadi karena arus listrik yang diinduksi dalam inti besi akibat perubahan medan magnet. Persamaan berikut menunjukkan bahwa nilai rugi besi sekitar 20% hingga 30% dari total kerugian pada beban penuh. (Muhammad Noer, 2017) :

$$P_i (\text{Rugi besi}) = 30\% \times \text{Rugi beban penuh} \quad (5)$$

3. Rugi – rugi Mekanik

Rugi mekanik mengacu pada rugi yang disebabkan oleh gesekan antara permukaan rotor dan stator generator generator. Masalah juga dapat ditemukan terkait rugi angin (wind glass) atau stray loss karena celah udara di stator dan rotor. Rugi mekanik dapat berkisar dari 10% hingga 20%

dari total kerugian pada beban penuh, seperti yang ditunjukkan pada persamaan di bawah ini. (Muhammad Noer, 2017) :

$$P_{mech} = 20\% \times \text{Rugi beban penuh} \quad (6)$$

Oleh karena itu, dapat ditulis persamaan kerugian total sebagai berikut:

$$\Sigma \text{Rugi total} = P_{cu} + P_i + P_{mech} \quad (7)$$

2.3.1.2 Efisiensi Generator

Nilai efisiensi adalah perbandingan antara daya keluaran dan daya masukan dalam proses teknis. Input daya generator sesuai dengan daya yang dihasilkan oleh turbin yang terhubung ke generator. yang nantinya akan menghasilkan daya keluaran yaitu daya listrik. Persamaan dari efisiensi generator yaitu :

$$\eta = P_{out} / P_{in} \times 100\% \quad (8)$$

Untuk Perhitungan efisiensi generator sinkron secara tidak langsung dapat menggunakan persamaan (II.14) dengan menghitung rugi-rugi daya total terlebih dahulu.

$$\eta = P_{out} / (P_{out} + \text{Rugi-Rugi Daya Total}) \times 100\% \quad (9)$$

2.3.1.3 MATLAB R2013a

MATLAB adalah singkatan dari MATrix LABoratory, karena semua data MATLAB didasarkan pada basis matriks. Dalam perkembangan selanjutnya, dikembangkan di C++ dan menggunakan assembler (terutama untuk fungsi MATLAB standar). Jadi ketika kita melakukan perhitungan, kita dapat mengubah masalah menjadi format matriks dengan MATLAB. MATLAB digunakan untuk masalah yang berkaitan dengan operasi matematika, antara lain. Tabel di bawah ini menunjukkan beberapa contoh cara menggunakan operator aritmatika antara dua oper- and (A dan B).

Tabel 1 Penggunaan Operator Aritmatika antara dua Operand (A dan B).

Operasi	Bentuk Al-Jabar	Bentuk Matlab	Contoh
Perkalian	A x B	A * B	5 * 3
Pembagian	A : B	A / B	8 / 2
Penambahan	A + B	A + B	6 + 7
Pengurangan	A - B	A - B	9 - 4
Eksponensial	AB	A ^ B	2 ^ 3

2.3.1.4 ETAP (*Electrical Transient Analysis Program*) 20.6

Electric Transient and Analysis Program adalah program perangkat lunak yang mengelola sistem tenaga listrik. Perangkat ini dapat digunakan off-grid untuk mensimulasikan daya listrik dan online untuk mengelola data secara *real time* atau untuk mengontrol sistem secara *real time*. ETAP dimanfaatkan guna mempelajari pembangkit listrik, infrastruktur transmisi dan jaringan distribusi listrik. Studi tentang tenaga listrik yang dapat dilakukan oleh ETAP mencakup berbagai aspek, sebagai berikut:

1. Analisa aliran daya
2. Analisa hubung singkat
3. *Arc Flash Analysis*
4. Analisa Kestabilan transien, dll

Dalam meninjau tenaga listrik, suatu *single line diagram* digunakan sebagai suatu sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai pengganti untuk representasi saluran tiga fasa. Ini membuatnya lebih mudah untuk membaca diagram dan menganalisis rangkaian. Untuk *single line diagram* simbol dapat digunakan untuk menunjukkan elemen listrik seperti pemutus sirkuit, *transformator*, bus bar, dan konduktor lainnya.

2.3.2 Analisa Hasil Perhitungan

Analisa ini dilakukan secara manual dengan menampilkan kurva pengaruh pembebanan terhadap efisiensi generator dari data yang dihasilkan, dan juga melakukan pengujian pembebanan yang dilakukan mulai dari pembebanan 10 % - 95 % .

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

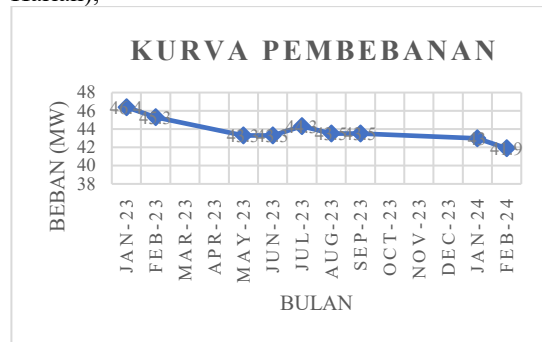
Effisiensi gennerator dapat diketahui dengan membandingkan daya keluaran terhadap daya masuknya. Pada PLTP Kamojang daya keluaran didapatkan dari hasil generator yang di kopel dengan turbin uap. Sedangkan untuk menentukan daya masuknya didapatkan dari perhitungan untuk mencari rugi-rugi generator terlebih dahulu. Rugi-rugi generator sendiri terdiri dari rugi tembaga, rugi besi dan rugi mekanik.

1. Data Pembebanan Generator

Tabel 2 Data Pembebanan Generator

Bulan-Tahun	Beban (MW)	Kapasitas (%)	Tegangan (Kv)	Arus (kA)		
				R	S	T
Jan-23	46,4	84,35	11,84	2,	2,	2,
	0			9	3	3
Feb-23	45,3	82,36	11,80	2,	2,	2,
	0			2	3	2
Mei-23	43,3	78,73	11,80	2,	2,	2,
	0			1	2	1
Jun-23	43,3	78,73	11,80	2,	2,	2,
	0			1	2	1
Jul-23	44,3	80,55	11,80	2,	2,	2,
	0			2	2	2
Agu-23	43,5	79,09	11,80	2,	2,	2,
	0			1	2	1
Sep-23	43,5	79,09	11,80	2,	2,	2,
	0			1	2	2
Jan-24	43,0	78,18	11,80	2,	2,	2,
	0			1	2	1
Feb-24	41,9	76,18	11,80	2,	2,	2,
	0			0	1	0
Keseluruhan	43,8	79,70	11,81	2,	2,	2,
	3			1	2	2

Dilihat pada tabel diatas pada kolom kapasitas, penggunaan beban yang dilakukan selama 9 bulan dalam kurun waktu 2023-2024 ini menunjukkan adanya perubahan beban disetiap bulanya, kapasitas generator unit 3 sendiri yang terpasang sebesar 55 MW dan yang digunakan rata-rata di 43,83 MW atau 79,70% dari beban penuh kapasitasnya. Hal ini terjadi karena permintaan pembebanan di pembangkit ini diatur oleh PLN bagian UP2B Bernama ROH (Rencana Operasi Harian),



Gambar 3 Kurva Pembebanan

Pada kurva diatas bisa dilihat bahwa kapasitas terbesar yang digunakan terjadi pada bulan Januari 2023 sebesar 84% sedangkan yang terendah terjadi pada bulan Februari 2024 sebesar 76% dari total beban kapasitasnya sebesar 55 MW.

2. Menghitung Rugi-rugi dan Efisiensi

Untuk mengetahui hasil perhitungan rugi-rugi dan efisiensi rata-rata pada bulan Januari, Februari, Mei, Juni, Juli, Agustus dan September tahun 2023 serta bulan Januari dan Februari 2024 data pembebanannya ditunjukkan pada tabel 2, yang nantinya digunakan sebagai acuan untuk menghitung rugi-rugi generator dan efisiensi generatormya dibantu dengan aplikasi MATLAB dan ETAP sebagai perbandingannya.

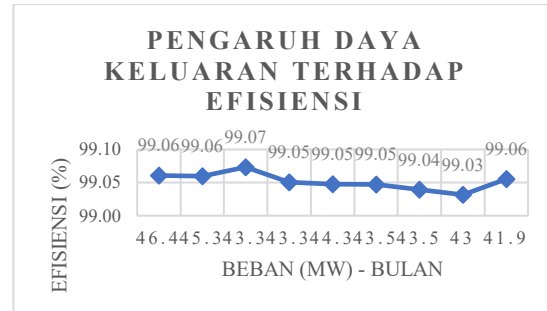
Tabel 3 Hasil Perhitungan Rugi-rugi

Bulan-Tahun	Pout (MW)	Rugi Tembaga	Rugi Inti Besi	Rugi Mekanik	Rugi Total	Pin (MW)
Jan-23	46,40	0,21	0,14	0,09	0,44	46,84
Feb-23	45,30	0,20	0,14	0,09	0,43	45,73
Mei-23	43,30	0,18	0,14	0,09	0,41	43,71
Jun-23	43,30	0,19	0,14	0,09	0,42	43,72
Jul-23	44,30	0,19	0,14	0,09	0,43	44,73
Agu-23	43,50	0,19	0,14	0,09	0,42	43,92
Sep-23	43,50	0,19	0,14	0,09	0,42	43,92
Jan-24	43,00	0,19	0,14	0,09	0,42	43,42
Feb-24	41,90	0,17	0,14	0,09	0,40	42,30
Hasil	43,83	0,19	0,14	0,09	0,42	44,25

Tabel 4 Hasil Perhitungan Efisiensi

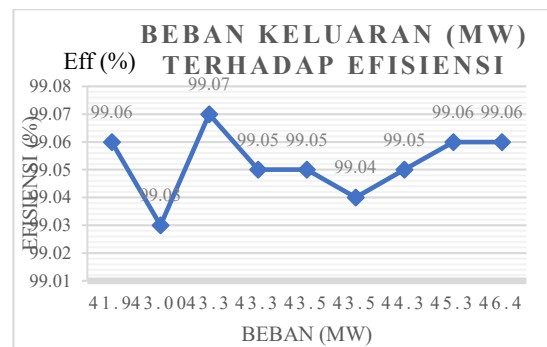
Bulan-Tahun	Pout (MW)	Kapasitas (%)	Pin (MW)	Efisiensi (%)
Jan-23	46,40	84,35	46,84	99,06
Feb-23	45,30	82,36	45,73	99,06
Mei-23	43,30	78,73	43,71	99,07
Jun-23	43,30	78,73	43,72	99,05
Jul-23	44,30	80,55	44,73	99,05
Agu-23	43,50	79,09	43,92	99,05
Sep-23	43,50	79,09	43,92	99,04
Jan-24	43,00	78,18	43,42	99,03
Feb-24	41,90	76,18	42,30	99,06
Keseluruhan	43,83	79,70	44,25	99,05

Berdasarkan tabel diatas efisiensi rata-rata yang dihasilkan 9 bulan dalam skala waktu tahun 2023-2024 sebesar 99,05 % dengan rata-rata beban keluaran 43,83 MW, beban masukan 44,25 MW serta rugi-rugi generator 0,42 MW. Nilai efisiensi yang dihasilkan oleh generator unit 3 ini terbilang dalam kondisi baik, karena nilai efisiensi generator lebih tinggi dari manual book nya sebesar 98,4 % dan standar efisiensi menurut standar IEC 60034-1 : 2017 yaitu sebesar 85 %.



Gambar 4 Kurva Pengaruh Pout terhadap Efisiensi

Berdasarkan ketiga kurva diatas bisa dilihat bahwa pengaruh yang dihasilkan pembebanan (masuk dan keluar) terhadap efisiensi generator sinkron yaitu dimana pada bulan januari 2023 pembebanan yang dihasilkan paling besar dibanding bulan yang lain yaitu sebesar 46,4 dan 46,84 MW menghasilkan efisiensi sebesar 99,06 %, sedangkan data pembebanan terkecil terjadi pada bulan februari 2024 sebesar 41,9 dan 42,30 MW menghasilkan efisiensi sebesar 99,06%. Sedangkan yang terjadi dibulan yang lain menunjukkan adanya perbedaan naik-turun efisiensi yang dihasilkan, secara garis besar jika pembebanan yang dihasilkan jauh lebih besar maka efisiensi yang dihasilkan lebih besar juga, dan untuk dibulan februari pengaruh perubahan efisiensi ini bergantung terhadap rugi rugi yang dihasilkan, Efisiensi generator meningkat dengan pembebanan besar meskipun rugi tembaga bertambah, rugi mekanik dan besi tetap konstan. Hal ini membuat peningkatan daya keluaran lebih signifikan dibandingkan peningkatan rugi-rugi, sehingga efisiensi keseluruhan generator meningkat. Berikut kurva dari beban daya keluaran yang dihasilkan terhadap efisiensi generatormya



Gambar 5 Kurva Beban Terhadap Efisiensi

Berdasarkan kurva diatas terdapat variasi atau perbedaan efisiensi generator sinkron yang tidak berurutan, ini disebabkan oleh beberapa faktor.

Salah satunya faktor dalam kerugian tembaga dan besi. Misalnya pada beban 41,9 MW mencapai efisiensi 99,06% namun ketika beban meningkat menjadi 43 MW efisiensi turun menjadi 99,03% ini disebabkan salah satunya peningkatan arus beban yang menyebabkan peningkatan kerugian tembaga. Namun pada saat beban meningkat 43,3 MW efisiensi menjadi naik kembali menjadi 99,07 % ini disebabkan beberapa faktor bisa dengan kondisi operasi generator yang lebih optimal pada titik beban tersebut dan rugi tembaga yang lebih kecil. Fluktuasi perbedaan nilai ini adalah hasil dari beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi generator.

2.1 Menghitung Rugi-rugi dan Efisiensi (MATLAB)

Dengan mengetahui nilai daya input dan output pada generator, untuk memperjelas hasil perhitungan mengenai efisiensi generator, maka dapat dilakukan perhitungan menggunakan aplikasi Matlab R2016a dengan memasukan perintah script aritmatika sederhana dengan mengambil data nilai yang terdapat pada tabel pembebanan generator unit 3. Berikut perintah script aritmatika untuk menghitung efisiensi generator pada bulan Januari

```

1 %Menghitung Efisiensi Pembebanan Generator Sinkron Unit 3
2 %*Januari 2023*
3 %Oleh= Rafli Fadilah
4
5 %Penyelesaian
6 % a. DAYA OUTPUT
7 Pout = 46.4;
8 % b. DAYA INPUT
9 Pin = 46.84;
10
11 % c. Efisiensi
12 n = Pout/Pin*100
  
```

MATLAB Command Window

```

Warning: Name is nonexistent or not a directory: C:\Pr
n =
    99.0606
  
```

Gambar 6 Perhitungan Matlab pada bulan Januari 2023

Berdasarkan perhitungan menggunakan Matlab R2016a ini didapati data sebagai perbandingan dengan menggunakan perhitungan manual, sehingga data nilai efisiensi diperoleh seperti tabel dibawah ini.

Tabel 6 Perbandingan Manual dan Matlab

Bulan- Tahun	Manual	Matlab
Jan-23	99,06	99,061
Feb-23	99,06	99,062
Mei-23	99,07	99,062
Jun-23	99,05	99,039

Bulan- Tahun	Manual	Matlab
Jul-23	99,05	99,048
Agu-23	99,05	99,048
Sep-23	99,04	99,031
Jan-24	99,03	99,030
Feb-24	99,06	99,080
Keseluruhan	99,05	99,051

Berdasarkan tabel diatas menunjukan bahwa nilai efisiensi yang dihitung manual dan Matlab R2016a hampir memiliki nilai yang sama dengan perbedaan nilai dibelakang koma, selain itu juga nilai efisiensi disetiap bulanya bisa dibilang hampir sama nilainya.

2.2 Menghitung Rugi-rugi dan Efisiensi (ETAP)

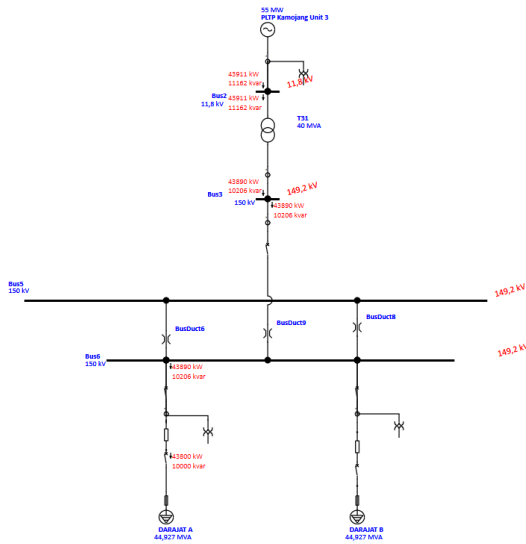
Berikut dibawah ini merupakan sebuah simulasi *single line diagram* sistem tenaga listrik unit 3 PLTP Kamojang yang telah disederhanakan menggunakan aplikasi ETAP 20 yang akan di analisa menggunakan analisa *loadflow*. Berikut adalah hasil dari analisa *loadflow* menggunakan simulasi software ETAP 20

Berdasarkan perhitungan yang dilakukan dengan pengambilan data pada simulasi *Loadflow* menggunakan aplikasi ETAP, diperoleh nilai efisiensi generator unit 3 yang bisa dijadikan perbandingan hasil perhitungan manual dan Matlab, maka dari itu diperoleh nilai efisiensi pada tabel dibawah ini.

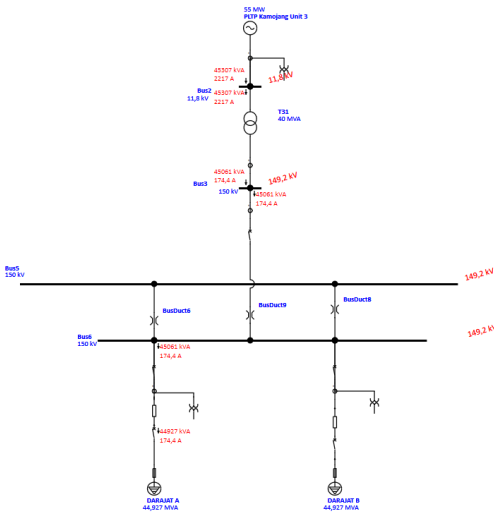
Tabel 7 Hasil Perbandingan Efisiensi

Manual	Matlab	ETAP
99,05 %	99,051 %	99,0101%

Hasil efisiensi generator sinkron unit 3 dengan ketiga perhitungan tersebut memiliki sedikit perbandingan yang kecil dimana perhitungan manual 99,05 %, Matlab sebesar 99,051 %, dan ETAP sebesar 99,01014%. Ini menunjukan tidak adanya perbedaan yang signifikan, nilai efisiensi yang dihasilkan generator sinkron unit 3 sudah memenuhi standar IEC 60034-1-2017 dengan dilakukan 3 kali pengujian perhitungan secara manual, aplikasi Matlab R2016a dan aplikasi ETAP 20.6.



Gambar 7 Hasil Daya Aktif dan Reaktif



Gambar 8 Hasil Daya Semu dan Arus

3. Analisis Kapasitas Pembebanan terhadap Efisiensi Generator

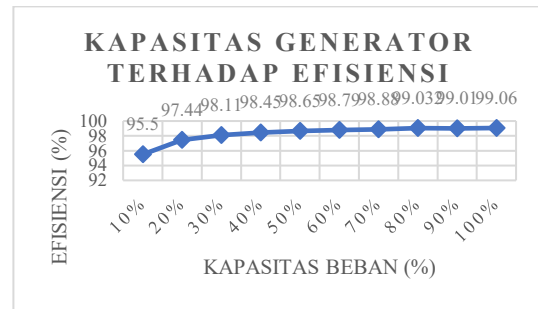
Berdasarkan tabel (4) besarnya kapasitas yang digunakan pada pembebanan ini adanya fluktuatif dengan hasil efisiensi yang didapatkan. Kapasitas terbesar yang digunakan selama 9 bulan ini terjadi pada bulan Januari 2023 sebesar 84,36% dari total beban kapasitas yang tersedia dengan efisiensi generator sebesar 99,06%, sedangkan pada bulan Februari 2024 kapasitas yang digunakan hanya 76,18 % dari total kapasitas yang tersedia menghasilkan efisiensi yang besarnya sama yaitu 99,08 %. Dengan demikian untuk mengetahui berapa efisiensi optimal generator dengan kapasitas pembebanan generator yang digunakan,

dilakukan pengujian pembebanan pada saat 95%, 90%, 70% dan 50% sampai dengan 10%, dengan asumsi daya masukan didapatkan dengan menjumlah daya keluaran dengan rugi total, dimana besaran rugi mekanik dan besi konstan, maka didapatkan data sebagai berikut.

Tabel 8 Percobaan Pengujian Kapasitas Generator

Kapasitas Beban (%)	Pout (MW)	Pin (%)	Efisiensi (%)
95%	52,25	52,71	99,11
90%	49,50	49,96	99,08
80% (Jul-23)	44,30	44,73	99,032
70%	38,50	38,90	98,95
60%	33,00	33,38	98,86
50%	27,50	27,85	98,72
40%	22,00	22,33	98,52
30%	16,50	16,80	98,21
20%	11,00	11,28	97,51
10%	5,50	5,75	95,6

Berdasarkan tabel diatas pembebanan dengan kapasitas maksimal bekerja paling efisien karena generator dirancang untuk bekerja dengan beban optimal, dengan asumsi menurut “Yon Rijono pada buku Dasar Tenaga Listrik“ besarnya rugi mekanik dan rugi inti konstan. Sedangkan pada beban rendah dengan rugi tembaga yang paling kecil namun untuk rugi besi dan mekanik tetap konstan, hal ini menyebabkan efisiensi menurun karena persentase rugi konstan (mekanik dan besi) terhadap daya keluaran menjadi besar. Dengan demikian efisiensi generator tidak selalu menurun dengan beban yang lebih kecil, namun karena adanya rugi yang konstan, efisiensi cenderung menurun ketika beban sangat kecil. Generator akan optimal pada saat beroperasi saat mendekati beban optimal yang dirancang untuknya. Berikut kurva pengaruh kapasitas penggunaan beban terhadap efisiensi generator.



Gambar 9 Kurva Kapasitas Generator

Berdasarkan kurva diatas, efisiensi generator meningkat dengan bertambahnya beban karena meskipun rugi tembaga meningkat, rugi mekanik dan besi tetap konstan. Rugi tembaga naik karena arus yang lebih besar, tetapi daya keluaran yang dihasilkan meningkat lebih cepat daripada rugi

tembaga. Sementara itu, rugi mekanik dan besi tidak berubah karena mereka tidak bergantung pada beban. Akibatnya, ketika beban bertambah, daya keluaran lebih besar dibandingkan dengan peningkatan rugi-rugi, sehingga efisiensi keseluruhan generator meningkat.

5. KESIMPULAN

Besarnya pembebanan rata-rata generator sinkron di PLN Indonesia Power Kamojang Unit 3 selama 9 bulan, yaitu pada bulan Januari, Februari, Mei, Juni, Juli, Agustus, dan September 2023 serta Januari dan Februari 2024, menyuplai tegangan sebesar 11,81 kV, daya output 43,83 MW, dengan rugi-rugi generator sebesar 0,43 MW, menghasilkan efisiensi generator sinkron Unit 3 sebesar 99,03%. Pembebanan terbesar terjadi pada Januari 2023 sebesar 46,40 MW dengan rugi-rugi generator 0,472 MW dan efisiensi 98,99%, sedangkan pembebanan terkecil terjadi pada Februari 2024 sebesar 41,90 MW dengan rugi-rugi generator 0,389 MW dan efisiensi 99,08%. Pengujian pembebanan dengan kapasitas 100%-10% menunjukkan bahwa pada pembebanan penuh 100%, efisiensi optimal dicapai karena generator dirancang untuk bekerja dengan beban optimal, dengan rugi-rugi tembaga, besi, dan mekanik yang seimbang sehingga menghasilkan efisiensi maksimal. Namun, pada beban rendah, rugi tembaga yang paling kecil tetapi rugi besi dan mekanik tetap konstan menyebabkan efisiensi menurun karena persentase rugi konstan (mekanik dan besi) terhadap daya keluaran menjadi besar. Berdasarkan pengujian dan analisis menggunakan SPSS, disimpulkan bahwa pembebanan (X) berpengaruh negatif terhadap efisiensi generator (Y) dengan total pengaruh sebesar 75,2%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung melalui dosen pengajar yang telah memberikan bimbingan serta pengetahuan lebih sehingga penulis bisa menyelesaikan karya ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Fitri Wildani, Syarifuddin, Sarma Thaba "Analisis Efisiensi Generator Pada Unit 1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap 2x25 MW PT. Rekind Daya Mamuju" Jurnal Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI) Politeknik Negeri Ujung Pandang, 2021.
2. M. Muharrir, I. Hajar, "Analisis Pengaruh Beban terhadap Efisiensi Generator unit 2 PLTP PT. Indonesia Power UJJP Kamojang," Kilat, vol. 8, no. 2, p. 93-102, 2019, doi: 10.33322/kilat.v8i2.643.

3. Ashar AR, Hama, W.S. Alfira, A. Asri, Ardiansyah, "Analisis Efisiensi Generator pada GT21 Blok 2 Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap PT. CEPA Sengkang" Jurnal Teknologi Elekterika, 2022, Volume 19 (2): 130-136. Politeknik Negeri Ujung Pandang, 2022.
4. Z. A. Angelina S, P. Jannus, B. Nainggolan, "Analisis Pengaruh perubahan Beban terhadap Efisiensi Generator PLTMG Gunung Belah" Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta (2022), 1940-1948.
5. Muhammad Noer, "Analisis pengaruh Pengaruh Pembebanan terhadap Efisiensi Generator di PLTG Borang dengan menggunakan Software Matlab" Volume 2, Nomor 2, Juli – Desember 2017, Politeknik Negeri Sriwijaya.
6. I. Refaldi, Y. Basir, D.U. Yusa Wardhani, "Analisis Fluktuasi Beban terhadap Efisiensi Generator Sinkron di PT. Pembangkit Listrik Palembang Jaya" Volume 6, No 2, Desember 2021 ISSN 2477-2755 (P) / 2622-2981 (E) DOI : <http://doi.org/10.31851/ampere>, Universitas Tridinanti Palembang.
7. R. Manangka, G. Ch. Mangindaan, H. Tumaliang, "Analisis pengaruh Perubahan Beban terhadap Efisiensi Generator Sinkron 3 Fasa di PLTP Lahendong Unit 3", Universitas Sam Ratulangi, 2022. <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/elekdankom> Universitas Sam Ratulangi Manado.
8. Riza Azharny, "Analisa Perbandingan Efisiensi Generator Sinkron unit 1 dan 2 di PLTA Sipansihaporas", Universitas Pembangunan Panca Budi Medan, 2021.
9. Ficki Candra, "Analisa pengaruh perubahan Beban terhadap Efisiensi Generator di PLTU Tanjung Jati B unit 1 dan 2", Universitas Islam Sultan Agung Semarang, 2023.
10. Annisa, Winarso, Wahyu Dwiono, " Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron", Jurnal Riset Rekayasa Elektro, Vol.1, No.1, Juni 2019, Hal. 37-53, P-ISSN : 2685 – 5313 Universitas Muhammadiyah Purwokerto.
11. IEC 60034-1 2017
12. IEC 60034-2-1 2014