

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah suatu jenis pembangkit listrik yang mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi listrik melalui serangkaian proses konversi energi. PLTU ditunjukkan seperti pada gambar 2.1.



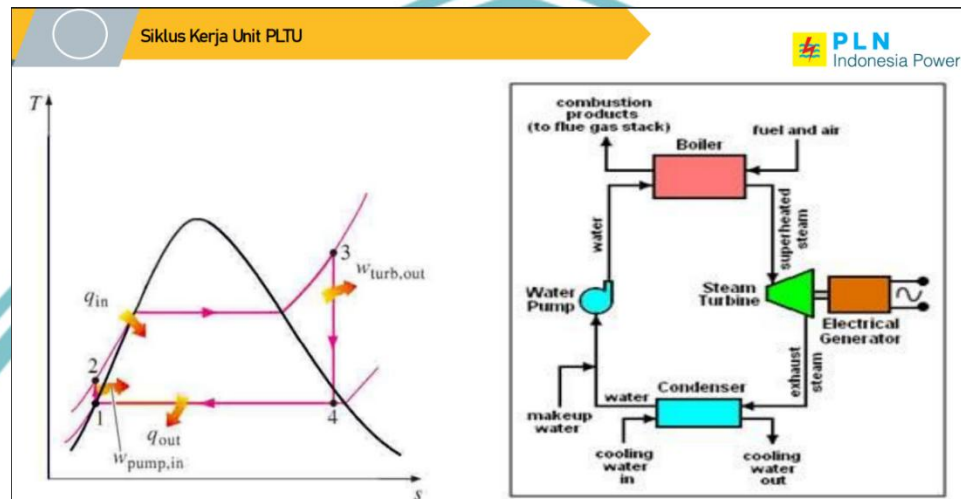
Gambar 2. 1 PLTU
(sumber : dokumentasi pribadi)

Proses pembangkitan dimulai dari pembakaran bahan bakar batu bara di dalam boiler yang menghasilkan uap bertekanan tinggi dan temperatur tinggi. Uap tersebut kemudian dialirkan ke turbin uap sehingga turbin berputar dan menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik inilah yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik oleh generator sinkron yang terhubung dengan turbin. Komponen utama sistem PLTU meliputi boiler, turbin uap, generator, kondensor, dan peralatan bantu lainnya yang bekerja secara sinergis untuk menjaga kontinuitas produksi energi listrik.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Prinsip kerja PLTU mengikuti siklus termodinamika *Rankine*, di mana fluida kerja (air/uap) mengalami perubahan fase dan energi selama siklus untuk menghasilkan listrik secara efisien (Zein, 2023). Dimana siklus pada PLTU ditunjukkan seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Siklus PLTU
(sumber : siklus PLTU Pelabuhan Ratu)

2.1.2 Generator Sinkron

Generator sinkron adalah mesin listrik yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik arus bolak-balik (*alternating current/AC*) melalui prinsip induksi elektromagnetik. Dinamakan *sinkron* karena kecepatan putar rotor generator selalu *sinkron* dengan frekuensi listrik yang dihasilkan, artinya perubahan arus dan medan magnet berputar berada pada frekuensi dan kecepatan yang tetap sesuai dengan frekuensi sistem listrik (misalnya 50 Hz pada jaringan PLN) sehingga tegangan output yang dihasilkan stabil dan konsisten. Generator ini banyak digunakan pada pembangkit listrik besar seperti PLTU, PLTG, dan PLTA karena kemampuannya untuk bekerja paralel dengan jaringan serta menjaga frekuensi dan tegangan sistem secara efektif (Annisa et al., 2019).

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Generator sinkron terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator yang merupakan bagian tetap berisi gulungan kawat tempat tegangan listrik dihasilkan, dan rotor yang menerima medan magnet dari kumparan medan (*field winding*) yang dialiri arus eksitasi. Ketika rotor diputar oleh sumber mekanik (*prime mover*) seperti turbin uap, turbin gas, atau mesin diesel, medan magnet yang dihasilkan akan memotong lilitan stator sehingga menimbulkan gaya gerak listrik yang kemudian menjadi tegangan output yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban listrik (Antono & Khambali, 2013). Unit Generator ditunjukkan seperti gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Generator Sinkron
(sumber :Dokumentasi Pribadi)

2.1.3 Komponen Generator Sinkron

Generator sinkron merupakan mesin listrik yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik arus bolak-balik (*alternating current/AC*) melalui prinsip induksi elektromagnetik. Struktur generator sinkron terdiri atas beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan tegangan listrik berkualitas tinggi dan stabil. Komponen utama tersebut meliputi stator dan rotor.

1. Stator

Stator adalah bagian *diam* dari generator sinkron yang berfungsi sebagai tempat terjadinya *gaya gerak listrik (GGL)* akibat medan magnet yang dipotong oleh rotor. Bagian ini merupakan komponen penting

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

karena di sinilah tegangan listrik dihasilkan dan disalurkan ke beban listrik eksternal (S. A. Putra & Santoso, 2024).

Stator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

A. Inti Stator (*Stator Core*)

Inti stator terdiri dari lembaran-lembaran baja berlapis yang disusun rapat. Desain laminasi ini bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi arus eddy dan histeresis sehingga membantu meminimalkan rugi daya magnetik.

B. Kumputan Stator (*Stator Winding*)

Kumputan stator adalah lilitan kawat konduktor (biasanya tembaga) yang dipasang di dalam slot stator. Ketika medan magnet dari rotor berubah usaha atau dipotong oleh kumputan stator, GGL induksi akan terbentuk dan menghasilkan tegangan listrik AC pada belitan ini.

C. Rangka Stator (*Stator Frame*)

Merupakan struktur kerangka luar stator yang biasanya terbuat dari baja atau besi cor. Komponen ini berfungsi menyangga inti stator dan belitan stator sekaligus memberikan kekuatan mekanis terhadap gaya-gaya operasi, termasuk perubahan beban mendadak.

D. Alur Stator (*Stator Slots*)

Alur merupakan celah-celah pada inti stator yang digunakan untuk menempatkan kumputan stator. Bentuk dan jumlah slot berpengaruh terhadap distribusi medan magnet dan karakteristik tegangan keluaran dari generator seperti pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Stator pada generator

(sumber : <https://www.carailmu.com/2021/05/cara-kerja-generator-sinkron.html>)

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Rotor

Rotor merupakan bagian yang berputar dan menjadi sumber medan magnet dalam generator sinkron. Rotor dilengkapi dengan kumparan medan (*field winding*) yang dialiri arus searah (*DC*) untuk menghasilkan medan magnet yang diperlukan dalam proses induksi. Medan magnet yang dihasilkan rotor kemudian memotong kumparan stator sehingga timbul gaya gerak listrik (*GGL*) sesuai dengan hukum Faraday (S. A. Putra & Santoso, 2024). Rotor terdiri dari dua bagian umum, yaitu :

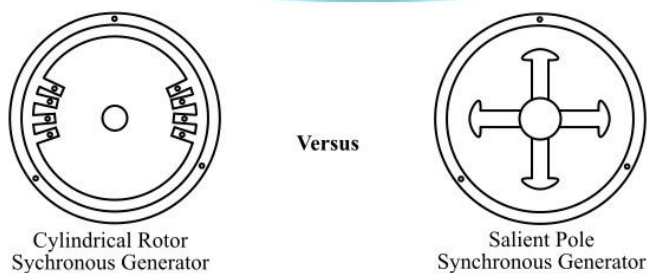
A. Inti Rotor (*Rotor Core*)

Inti rotor merupakan bagian utama rotor yang berfungsi sebagai jalur fluks magnet. Inti rotor terbuat dari lembaran baja silikon berlapis (*laminasi*) untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar dan histeresis. Pada permukaannya terdapat slot yang digunakan untuk menempatkan konduktor atau lilitan rotor.

B. Kumparan Medan

Kumparan medan pada rotor adalah lilitan kawat penghantar (umumnya tembaga) yang dipasang pada rotor dan berfungsi untuk menghasilkan medan magnet utama pada mesin listrik. Kumparan medan ini

terutama terdapat pada motor dan generator arus searah (*DC*) serta mesin sinkron. Kumparan medan dipasangkan pada struktur kutub rotor, yang secara umum dapat dibedakan menjadi dua jenis desain utama. Kedua jenis tersebut adalah rotor kutub menonjol (*salient pole*) dan rotor kutub silinder (*non-salient pole*) seperti gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Jenis-Jenis bentuk rotor pada Generator Sinkron

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1) Cylindrical Rotor

Cylindrical rotor atau yang sering disebut rotor silinder (non-salient pole) memiliki permukaan rotor yang halus tanpa kutub menonjol, dengan kumparan medan yang ditempatkan di dalam slot-slot pada silinder rotor. Desain ini menghasilkan celah udara yang seragam, sehingga medan magnet yang terbentuk antara stator dan rotor lebih simetris dan stabil saat mesin beroperasi pada kecepatan tinggi, menjadikannya pilihan utama dalam generator turbin uap atau mesin sinkron berputar cepat.

2) Salient Pole

Rotor jenis kutub menonjol (*salient pole rotor*) adalah konstruksi rotor pada mesin sinkron yang memiliki kutub-kutub magnet yang menonjol secara fisik dari permukaan rotor, dengan kumparan medan yang dililit pada setiap kutub untuk menghasilkan medan magnet utama saat dialiri arus DC. Desain ini menciptakan medan magnet yang kuat dan cocok untuk aplikasi berkecepatan rendah hingga menengah, karena bentuk kutubnya mendukung besarnya torsi dan karakter magnetik yang jelas antara kutub utara dan selatan, meskipun celah udara yang tidak merata dapat menyebabkan variasi reaktansi dan rugi-rugi angin (*windage losses*) pada kecepatan tinggi.

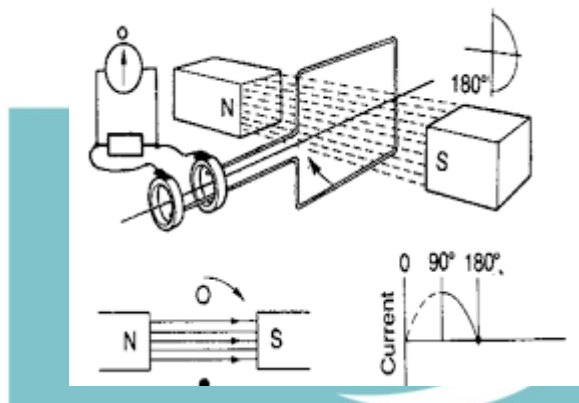
2.1.4 Prinsip Kerja Generator Sinkron

prinsip kerja dari generator sinkron secara umum adalah Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan medan. Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan maka akan menimbulkan fluks yang besarnya terhadap waktu adalah tetap.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Penggerak mula (Prime Mover) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya. Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga pada kumparan jangkar yang terletak di stator akan dihasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu (Sepannur Bandri, 2022). Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan GGL induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut.



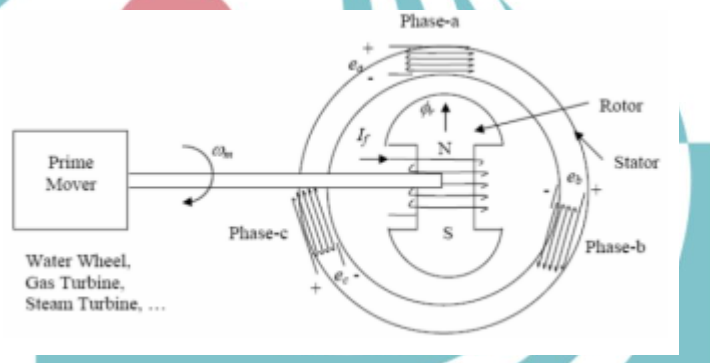
Gambar 2. 6 Proses Pembangkitan GGL
(sumber : <http://repository.um-palembang.ac.id>)

Gambar 2.6 tersebut menunjukkan prinsip dasar kerja generator listrik yang memanfaatkan induksi elektromagnetik untuk menghasilkan arus listrik. Pada gambar terlihat sebuah kumparan yang diputar di antara dua kutub magnet, yaitu kutub utara (N) dan kutub selatan (S), sehingga menghasilkan medan magnet di antara keduanya. Ketika kumparan berputar, konduktor pada kumparan akan memotong garis-garis gaya magnet, yang menyebabkan timbulnya gaya gerak listrik (GGL) sesuai dengan hukum Faraday. Arus listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan melalui cincin geser (*slip ring*) dan sikat ke rangkaian luar. Besarnya arus yang dihasilkan bergantung pada posisi sudut putaran kumparan terhadap medan magnet. Pada posisi 0° , kumparan sejajar dengan medan magnet sehingga tidak terjadi perubahan fluks dan arus bernilai nol. Ketika kumparan berputar hingga 90° , pemotongan garis gaya magnet terjadi secara maksimum sehingga arus mencapai nilai maksimum. Selanjutnya pada posisi 180° , arus kembali

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penerbitan karya ilmiah, penerbitan laporan, penerbitan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menjadi nol, namun dengan arah yang berlawanan, sehingga menghasilkan arus bolak-balik (AC) berbentuk gelombang sinusoidal seperti yang ditunjukkan pada grafik. Prinsip ini menjadi dasar kerja generator sinkron pada pembangkit listrik, termasuk pada PLTU, di mana energi mekanik dari turbin diubah menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik secara kontinu. Dimana prinsip kerja dari generator sinkron bisa dilihat seperti gambar 2.7



Gambar 2. 7 Prinsip Kerja Generator Sinkron
(sumber: <https://www.carailmu.com/2021/05/cara-kerja-generator-sinkron.html>)

2.1.5 Karakteristik Generator Sinkron

Generator sinkron memiliki beberapa karakteristik, diantaranya:

1. Generator Sinkron Keadaan Tanpa Beban

Dengan memutar generator sinkron diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka tegangan (E_o) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Bentuk hubungannya diperlihatkan pada persamaan berikut:

$$E_o = c \times n \times \Phi \quad (2.1)$$

Dengan:

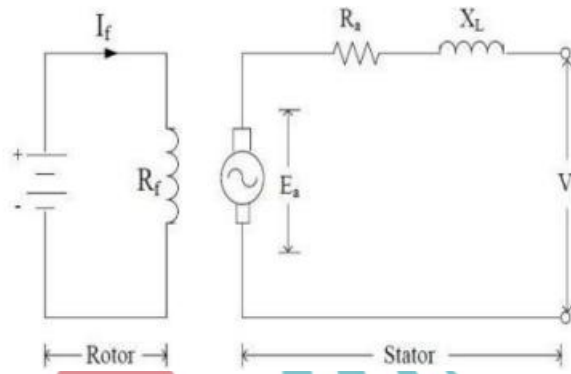
c = Konstanta Mesin

n = Kecepatan Putaran Rotor (rpm)

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

$\Phi =$ Fluks yang dihasilkan oleh $I_f \times$

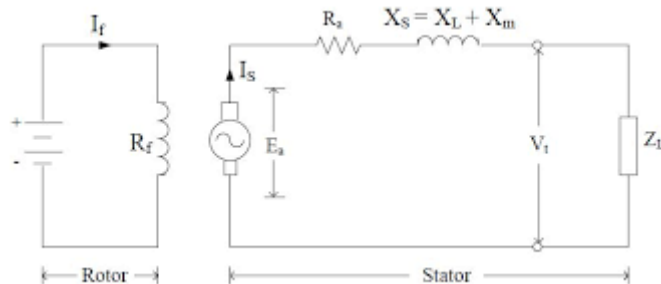


Gambar 2. 8 Rangkaian ekivalen generator tanpa beban
(sumber: https://repository.um-surabaya.ac.id/id/eprint/2708/3/BAB_II.pdf)

Gambar 2.8 menunjukkan rangkaian ekivalen generator pada kondisi operasi tanpa beban, tidak ada aliran arus jangkar pada stator generator. Sebagai konsekuensinya, efek reaksi jangkar tidak terjadi, sehingga satu-satunya sumber fluks magnetik di dalam mesin adalah yang dihasilkan oleh arus eksitasi medan (I_f). Dengan demikian, jika nilai arus eksitasi (I_f) divariasikan, GGL internal (E_a) yang dibangkitkan juga akan berubah.

2. Generator Sinkron Keadaan Dengan Beban

Generator sinkron pada kondisi berbeban adalah keadaan ketika generator terhubung dengan beban sehingga arus mengalir pada kumparan stator. Rangkaian ditunjukkan seperti pada gambar 2.9. Pada kondisi ini, tegangan terminal (V_t) akan mengalami penurunan dibandingkan dengan tegangan induksi internal (E_a) akibat adanya impedansi internal yang terdiri dari resistansi jangkar (R_a) dan reaktansi sinkron (X_s).



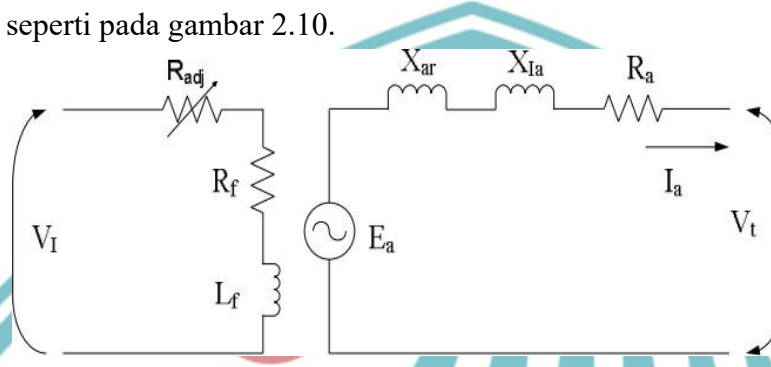
Gambar 2. 9 Rangkaian Ekivalen Generator Dengan beban
Sumber: https://repository.um-surabaya.ac.id/id/eprint/2708/3/BAB_II.pdf

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.1.6 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

Rangkaian ekivalen generator dari suatu generator sinkron dapat dilihat seperti pada gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron
(sumber: https://repository.um-surabaya.ac.id/id/eprint/2708/3/BAB_II.pdf)

Keterangan Gambar:

- E_a = Tegangan induksi (Volt)
- V_t = Tegangan terminal generator (Volt)
- V_f = Tegangan eksitasi (Volt)
- R_f = Tahanan belitan medan (Ohm)
- L_f = Induktansi belitan medan (H)
- R_{adj} = Tahanan variable (Ohm)
- R_a = Tahanan jangkar (Ohm)
- X_{ar} = Reaktansi reaksi jangkar (Ohm)
- X_{ia} = Reaktansi bocor belitan jangkar (Ohm)
- I_a = Arus jangkar (Ampere)

Berdasarkan gambar diatas maka dapat ditulis persamaan tegangan induksi E_a generator sinkron seperti:

$$E_a = V_t + jX_{ar}I_a + jX_{ia}I_a + R_aI_a \quad 2.2$$

$$E_a = V_t + I_a(R_a + jX_s) \quad 2.3$$

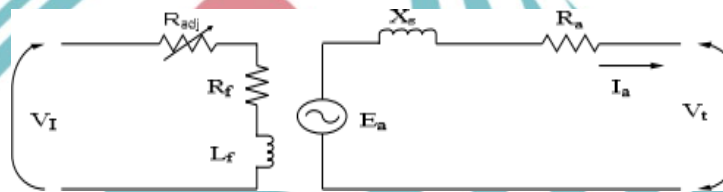
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Dan persamaan tegangan V_t generator sinkron dapat ditulis seperti yang tampak dibawah:

$$V_t = E_a - jX_{ar}I_a - jX_{la}I_a - R_aI_a \quad 2.4$$

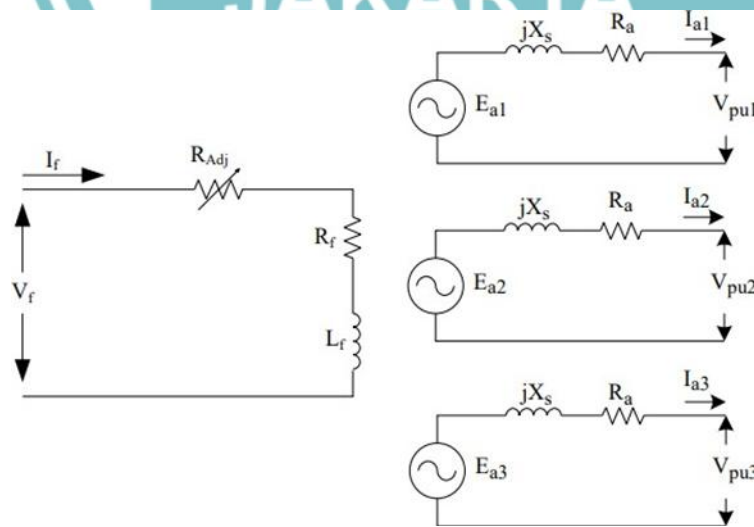
Dengan menyatakan reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi fluks bocor sebagai reaktansi sinkron, atau $X_s = X_{ar} + X_{la}$ dapat dilihat pada gambar 2.11 dibawah, maka persamaan tegangan terminal menjadi persamaan:



Gambar 2. 11 Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

$$V_t = E_a - jX_sI_a - R_aI_a \quad 2.5$$

Karena sifatnya yang bolak-balik, tegangan pada generator sinkron umumnya direpresentasikan dalam bentuk fasor(Ariwan et al., 2023),sementara komponen- komponen fisiknya dimodelkan dalam sebuah rangkaian ekuivalen per fasa, seperti yang ditunjukkan untuk sistem tiga fasa pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tiga Fasa

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Sumber daya DC memasok rangkaian medan rotor, digambarkan oleh induktansi kumparan dan tahanan secara seri. Dalam seri dengan R_f , merupakan resistor yang dapat diatur R_{adj} yang mengontrol aliran arus. Sisanya terdiri dari rangkaian ekivalen model untuk setiap tahap. Setiap fase memiliki tegangan yang dihasilkan tegangan internal dengan induktansi X_s (terdiri dari jumlah reaktansi jangkar dan kumparan induktansi) dan resistansi seri R_a .

Jika 3 fase yang terhubung dalam Y, tegangan terminal dapat ditentukan sebagai berikut:

$$V_L = \sqrt{3}V_\phi \quad 2.6$$

Maka V_L 3 fasa yang terhubung Y adalah:

$$V_\phi = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad 2.7$$

Idealnya, tegangan terminal untuk semua 3 fase harus sama karena diasumsikan bahwa beban terhubung seimbang.

2.1.7 Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron

Sistem eksitasi pada generator sinkron merupakan subsistem penting yang berfungsi untuk menyediakan arus searah (DC) kepada kumparan medan rotor, sehingga dapat menghasilkan medan magnet yang diperlukan dalam proses pembangkitan listrik. Arus eksitasi inilah yang memengaruhi besarnya medan magnet rotor, yang kemudian berinteraksi dengan belitan stator untuk menginduksi tegangan keluaran pada generator. Besaran arus eksitasi sangat menentukan nilai tegangan terminal yang dihasilkan oleh generator, sehingga kestabilan tegangan keluaran bergantung pada kinerja sistem eksitasi yang mampu menyesuaikan arus medan secara cepat, terutama ketika terjadi perubahan beban operasi. Sistem eksitasi bekerja bersama

Hak Cipta :

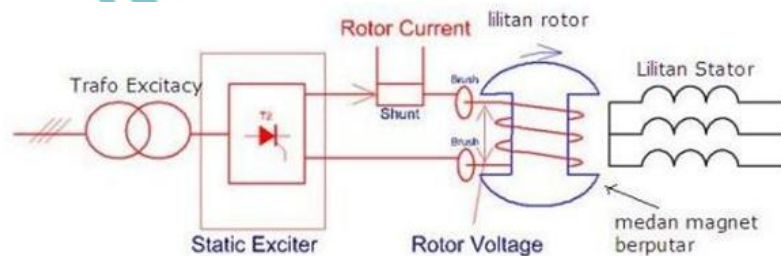
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dengan Automatic Voltage Regulator (AVR) untuk mengatur dan menstabilkan tegangan keluaran generator sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga (Pernandes Tambunan et al., 2026).

Dalam kondisi operasi nyata, perubahan beban yang terjadi pada jaringan listrik dapat menimbulkan fluktuasi tegangan terminal generator. Untuk mengatasi hal tersebut, AVR secara otomatis menaikkan atau menurunkan arus eksitasi berdasarkan perbedaan antara tegangan keluaran aktual dan tegangan referensi sehingga tegangan terminal tetap berada dalam batas yang diizinkan. Penelitian pada generator sinkron berkapasitas besar menunjukkan bahwa eksitasi memainkan peran penting dalam menjaga kestabilan tegangan dan daya reaktif, serta respons dinamis ketika beban meningkat atau menurun. Misalnya, sistem eksitasi pada generator sinkron 200 MW di pembangkit listrik menunjukkan hubungan yang erat antara arus eksitasi, tegangan terminal, dan perubahan beban yang ditangani melalui AVR (F. Putra et al., 2025).

1. Sistem Eksitasi Dengan Sikat

Sistem eksitasi dengan sikat (brush excitation system) merupakan metode pemberian arus searah (DC) ke kumparan medan rotor generator sinkron melalui sikat (brush) dan cincin geser (slip ring). Sistem ini berfungsi untuk menghasilkan medan magnet pada rotor yang diperlukan dalam proses pembangkitan energi listrik (Homepage & Al Furqon, 2025). Gambar sistem eksitasi dengan sikat ditunjukkan seperti gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Sistem Eksitasi Dengan Sikat (Brush Excitation)

Pada sistem eksitasi dengan sikat, sumber arus DC diperoleh dari generator eksitasi (exciter) atau sistem penyearah (rectifier), kemudian

Hak Cipta :

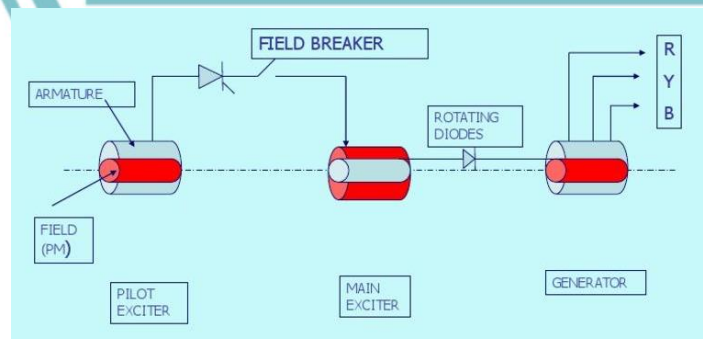
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dialirkan ke rotor melalui sikat dan slip ring. Sikat yang umumnya terbuat dari karbon berfungsi sebagai penghantar arus dari bagian statis ke rotor yang berputar, sedangkan slip ring berfungsi sebagai media kontak listrik. Dalam praktiknya, distribusi arus pada carbon brush harus merata untuk menjaga kinerja sistem, karena ketidakseimbangan arus dapat disebabkan oleh faktor mekanis maupun kelistrikan (Purnama, 2025).

Komponen utama sistem eksitasi dengan sikat meliputi sumber DC, sikat (brush), slip ring, dan kumparan medan rotor. Arus eksitasi yang dialirkan ke rotor akan menghasilkan fluks magnet yang kemudian berinteraksi dengan kumparan stator untuk menghasilkan tegangan listrik. Sistem eksitasi juga berperan dalam mengatur daya reaktif dan faktor daya generator, sehingga sangat penting dalam menjaga stabilitas operasi pembangkit.

2. Sistem Eksitasi Tanpa Sikat

Sistem eksitasi tanpa sikat (brushless excitation system) merupakan metode pemberian arus eksitasi pada generator sinkron tanpa menggunakan sikat (brush) dan cincin geser (slip ring). Sistem ini dikembangkan untuk meningkatkan keandalan dan mengurangi kebutuhan perawatan dibandingkan sistem eksitasi konvensional. Pada sistem ini, arus eksitasi dapat disalurkan langsung ke kumparan medan rotor tanpa kontak mekanis, sehingga mengurangi kerugian akibat gesekan dan percikan listrik seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.14 (Penguatan et al., 2025).



Gambar 2. 14 Sistem Eksitasi Tanpa sikat (Brushless Excitation)

Prinsip kerja sistem eksitasi tanpa sikat melibatkan penggunaan generator eksitasi AC yang terpasang satu poros dengan generator utama.

Hak Cipta :

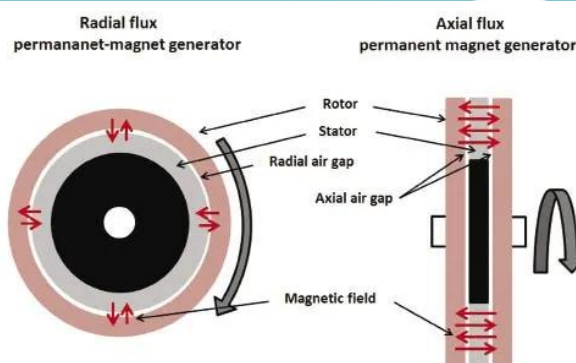
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Tegangan AC yang dihasilkan oleh exciter kemudian disearahkan menggunakan dioda penyearah (rotating rectifier) yang juga terpasang pada poros rotor. Hasil penyearahan berupa arus DC selanjutnya langsung dialirkan ke kumparan medan rotor generator utama melalui sambungan internal tanpa menggunakan sikat maupun slip ring (Penguatan et al., 2025).

Sistem eksitasi tanpa sikat terdiri dari beberapa komponen yang bekerja secara terintegrasi:

A. Pilot Exciter (Permanent Magnet Generator / PMG)

Pilot exciter merupakan generator kecil berbasis magnet permanen yang berfungsi sebagai sumber energi awal bagi sistem eksitasi yang ditunjukkan pada gambar 2.15. Komponen ini menghasilkan tegangan AC secara independen tanpa memerlukan suplai dari sistem utama, sehingga meningkatkan keandalan terutama saat proses starting. PMG menjadi sumber utama bagi sistem kontrol seperti AVR.



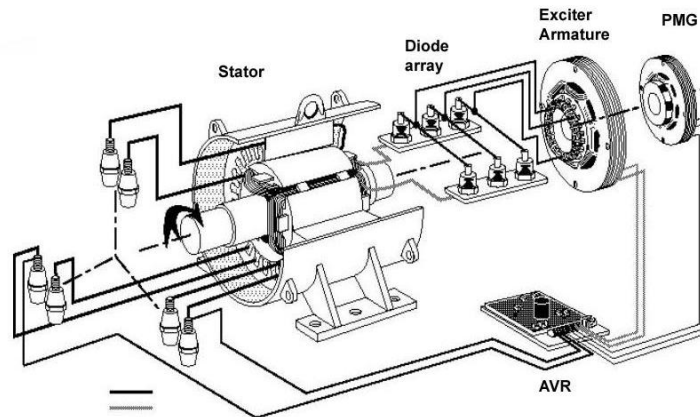
Gambar 2. 15 Permanent magnet Generator

B. Automatic Voltage Regulator (AVR)

Automatic Voltage Regulator (AVR) berfungsi untuk mengatur tegangan keluaran generator dengan cara mengontrol arus eksitasi. AVR akan menyesuaikan arus eksitasi sesuai dengan perubahan beban, sehingga tegangan tetap stabil. Sistem eksitasi secara umum memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan tegangan dan daya reaktif pada generator sinkron.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 2. 16 Komponen Eksitasi Tanpa Sikat

C. Main Exciter

Main exciter adalah generator AC yang menghasilkan arus bolak-balik sebagai sumber utama eksitasi. Pada sistem brushless, bagian rotor dari main exciter menghasilkan arus AC yang kemudian akan disalurkan ke penyearah berputar. Konfigurasi ini memungkinkan arus eksitasi diteruskan tanpa kontak mekanis.

D. Rotating Rectifier (Dioda Berputar)

Rotating rectifier merupakan rangkaian dioda yang dipasang pada poros rotor dan berfungsi untuk mengubah arus AC dari main exciter menjadi arus DC. Arus DC ini kemudian langsung disalurkan ke kumparan medan rotor generator utama. Penggunaan dioda berputar memungkinkan sistem bekerja tanpa sikat dan slip ring.

Prinsip kerja sistem eksitasi tanpa sikat melibatkan penggunaan generator eksitasi AC yang terpasang satu poros dengan generator utama. Tegangan AC yang dihasilkan oleh exciter kemudian disearahkan menggunakan dioda penyearah (rotating rectifier) yang juga terpasang pada poros rotor. Hasil penyearahan berupa arus DC selanjutnya langsung dialirkan ke kumparan medan rotor generator utama melalui sambungan internal tanpa menggunakan sikat maupun slip ring (Penguatan et al., 2025).

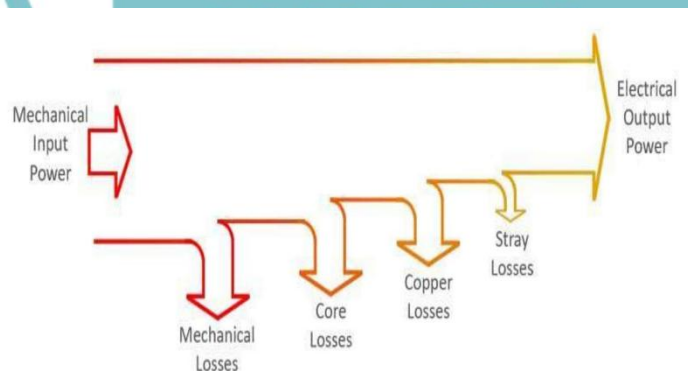
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Keunggulan utama sistem eksitasi tanpa sikat adalah meningkatnya keandalan operasi karena tidak adanya komponen yang mengalami gesekan langsung seperti sikat dan slip ring. Hal ini menyebabkan kebutuhan perawatan menjadi lebih rendah dan umur peralatan lebih panjang. Selain itu, sistem ini lebih aman karena tidak menimbulkan percikan listrik, sehingga cocok digunakan pada pembangkit listrik skala besar seperti PLTU dan PLTA. Sistem eksitasi juga berperan penting dalam mengatur tegangan, daya reaktif, serta menjaga stabilitas sistem tenaga listrik secara keseluruhan (Al Furqon, 2025).

2.1.8 Rugi-Rugi Daya Pada Generator

Rugi-rugi daya (*losses*) pada generator adalah sebagian energi yang hilang selama proses konversi energi, yang umumnya berubah menjadi panas. Keberadaan rugi-rugi ini menyebabkan daya listrik yang dikirim ke terminal keluaran (*output power*) lebih rendah daripada daya yang sebenarnya dibangkitkan di dalam mesin. Secara umum, rugi-rugi daya pada generator diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama, yaitu: rugi tembaga, rugi mekanik, dan rugi inti. Diagram yang mengilustrasikan aliran daya beserta komponen rugi-rugi ini disajikan pada Gambar 2.17.



Gambar 2. 17 Skema rugi-rugi daya Generator
(sumber : <https://www.tamboenman.xyz/diagram-aliran-daya-generator-dc-dan/index.html>)

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1. Rugi Tembaga

Rugi tembaga, yang juga dikenal sebagai rugi panas atau rugi I^2R , merupakan jenis rugi daya variabel yang terjadi akibat adanya resistansi internal pada konduktor saat dialiri arus listrik. Pada generator sinkron, rugi ini muncul pada dua bagian utama, yaitu belitan stator (jangkar) dan belitan rotor (medan).

Rugi tembaga bersifat sangat dinamis karena besarnya daya yang hilang berubah-ubah seiring dengan fluktuasi beban atau daya output yang dihasilkan oleh generator. Ketika beban meningkat, arus yang mengalir melalui belitan juga meningkat, yang secara eksponensial akan memperbesar energi yang terbuang dalam bentuk panas.

Pada bagian stator, rugi tembaga terjadi karena adanya arus bolak-balik (AC) yang mengalir untuk menyalurkan daya ke beban. Besarnya rugi tembaga stator ($P_{cu, stator}$) dipengaruhi oleh nilai resistansi efektif dari belitan tembaga dan kuadrat arus jangkar. Perhitungan untuk generator tiga fasa dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{stator} = 3 \times I^2 \times R_{stator} \quad (2.8)$$

Di mana I adalah arus fasa stator (*Ampere*) dan R adalah resistansi efektif per fasa (*Ohm*). Perlu diperhatikan bahwa nilai R dapat berubah tergantung pada suhu operasional, semakin tinggi suhu belitan, semakin besar resistansinya, sehingga rugi-rugi akan semakin meningkat (Wibowo et al., 2024). Untuk mendapatkan perhitungan yang akurat, nilai resistansi (R) harus ditentukan dengan cermat karena nilainya sangat dipengaruhi oleh suhu operasional (NIT-EDU, 2021). Standar industri seperti IEC 60034-1 seringkali mengaitkan kalkulasi ini dengan suhu operasi berdasarkan kelas insulasi mesin, seperti 95°C untuk Kelas B atau 115°C untuk Kelas F (ISO 11402, 2004). Oleh karena itu, untuk menyesuaikan nilai resistansi dari suhu referensi (R_0 pada suhu T_0) ke suhu operasi akhir (R_T pada suhu T), digunakan persamaan koreksi suhu

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

$$R_t = R_0(I + \alpha \Delta T) \quad (2.9)$$

Dengan α adalah koefisien temperatur resistansi dari material konduktor (AR et al., 2022a).

2. Rugi Mekanik

Rugi-rugi mekanik pada generator merupakan rugi daya yang timbul akibat proses mekanis selama operasi mesin, khususnya pada bagian yang berputar. Rugi-rugi ini terutama disebabkan oleh gesekan mekanis pada bantalan (*bearing*), gesekan antara sikat dan slip ring, serta hambatan udara (*windage*) akibat perputaran rotor di dalam ruang generator. Energi mekanik yang seharusnya dikonversi menjadi energi listrik sebagian berubah menjadi panas dan energi kinetik udara, sehingga tidak berkontribusi terhadap daya keluaran generator. Rugi-rugi mekanik bersifat relatif konstan karena lebih dipengaruhi oleh kecepatan putar dan konstruksi generator dibandingkan besarnya beban Listrik (Wibowo et al., 2024), sehingga menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$P_{mech} = 0,2 \times P_{rugi \text{ beban penuh}} \quad (2.10)$$

Dengan:

P_{mech} = Rugi-Rugi Mekanik (Watt)

$P_{rugi \text{ beban penuh}}$ = Rugi-Rugi Saat Beban 100% (Watt)

3. Rugi-rugi Besi

Rugi-rugi besi, yang sering disebut core losses atau iron losses, adalah kerugian daya yang terjadi di bagian inti besi generator akibat fenomena elektromagnetik saat fluks magnetik berubah secara periodik selama operasi mesin. Komponen utama rugi-rugi besi meliputi rugi histeresis dan rugi arus eddy. Rugi histeresis terjadi karena pergeseran domain magnetik dalam material inti besi akibat pembalikan fluks magnetik bolak-balik, di mana energi magnetisasi yang disuplai berubah menjadi panas di dalam inti besi. Sementara itu, rugi arus eddy

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

merupakan rugi yang disebabkan oleh arus pusar (*eddy currents*) yang terinduksi di dalam inti besi akibat perubahan fluks magnetik, yang kemudian menghasilkan panas karena adanya resistansi internal material inti. Kedua komponen rugi ini tidak tergantung pada beban listrik, tetapi lebih dipengaruhi oleh frekuensi operasi, kerapatan fluks magnetik, serta sifat material inti besi seperti koefisien histeresis dan konduktivitas listriknya (SEPTIYAN et al., 2019).

$$P_{fe} = P_h + P_e \quad (2.11)$$

Dengan :

P_{fe} = total rugi-rugi besi (Watt)

P_h = rugi histeresis (Watt)

P_e = rugi arus eddy (Watt)

Rugi histeresis biasanya dinyatakan melalui hubungan empiris yang proporsional terhadap frekuensi (f) dan kerapatan fluks magnetik maksimum (B_{max}), sedangkan rugi arus eddy berbanding dengan kuadrat frekuensi dan kuadrat kerapatan fluks. Oleh karena itu, core losses menjadi komponen rugi tetap dalam generator yang tetap ada bahkan pada kondisi beban rendah, dan berkontribusi pada penurunan efisiensi operasional total generator (SEPTIYAN et al., 2019).

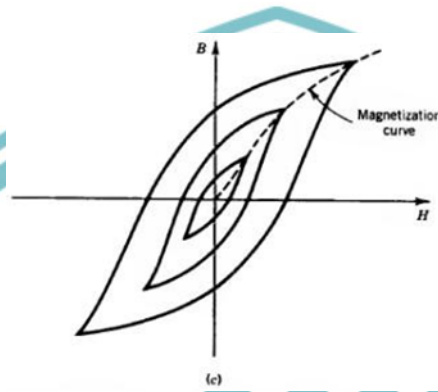
a) Rugi hysteresis

Rugi histeresis adalah salah satu komponen dari rugi-rugi besi (core losses) yang terjadi pada inti besi generator akibat proses magnetisasi dan demagnetisasi yang terjadi berulang kali selama operasi mesin listrik. Ketika fluks magnetik pada inti besi berubah arah mengikuti medan magnet bolak-balik, domain-domain magnetik dalam material inti mengalami pergeseran untuk menyesuaikan orientasinya dengan medan yang berubah. Proses ini membutuhkan energi yang tidak sepenuhnya dapat dikembalikan kembali ke sistem, melainkan hilang dalam bentuk panas. Energi yang hilang inilah yang disebut rugi histeresis, dan besarnya dipengaruhi oleh sifat material magnetik inti, frekuensi operasi, serta kerapatan fluks magnetik maksimum. Oleh

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

karena itu, rugi histeresis pada generator tidak bergantung langsung pada beban listrik, melainkan pada karakteristik magnetik inti besi serta frekuensi operasi mesin (Sandhi et al., 2020).



Gambar 2. 18 Kurva Hysteresis

Secara matematis, rugi histeresis pada generator dapat ditentukan sebagai berikut :

$$P_h = K_h \times B_{max}^2 \times f \quad (2.12)$$

b) Rugi Arus Eddy

Rugi eddy (*eddy current loss*) adalah salah satu komponen dari rugi-rugi besi (*core losses*) yang terjadi di dalam inti besi generator akibat arus pusar (*eddy currents*) yang terinduksi oleh perubahan fluks magnetik AC yang bolak-balik selama operasi mesin. Fluks magnetik yang terus berubah menghasilkan gaya gerak listrik (*electromotive force*) di dalam inti besi yang bersifat konduktif, sehingga arus-arus melingkar tertutup (*eddy currents*) terbentuk dalam lembaran inti besi. Arus ini mengalir melalui resistansi inti besi dan menghasilkan panas karena efek Joule, yang berarti energi listrik terbuang sebagai panas dan tidak dapat dimanfaatkan untuk kontribusi daya keluaran generator. Rugi eddy tergolong rugi tetap yang tidak bergantung langsung pada beban listrik, tetapi dipengaruhi oleh frekuensi operasi dan kerapatan fluks magnetik pada inti besi; semakin tinggi frekuensi dan fluks magnetik, semakin

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

besar arus eddy yang dihasilkan dan semakin tinggi pula rugi-rugi tersebut (SEPTIYAN et al., 2019).

Secara matematis, rugi eddy biasanya dinyatakan sebagai komponen kuadrat frekuensi dan kuadrat kerapatan fluks magnetik maksimum terhadap sejumlah konstanta material inti besi, yaitu :

$$P_e = K_e \times B_{max}^2 \times f \quad (2.13)$$

Besar rugi besi diperkirakan sekitar 30% dari rugi total beban seperti persamaan (2.14) berikut.

$$P_{fe} = 0,3 \times P_{rugi\ beban\ penuh} \quad (2.14)$$

Dengan :

P_{fe} = Rugi-Rugi Besi (Watt)

P_h = Rugi-Rugi Hysteresis (Watt)

K_h = Koefisien Hysteresis

n = Koefisien Steinmentz

P_e = Rugi Arus Eddy (Watt)

K_e = Koefisien Arus Pesar

B_{max} = Kerapatan Fluks Maksimum (Wb/m²)

f = Frekuensi (Hz)

$P_{rugi\ beban\ penuh}$ = Rugi-Rugi Daya saat Beban 100% (Watt)

4. Rugi Beban Stray

Rugi stray atau *stray load losses* pada generator merupakan rugi-rugi daya tambahan yang timbul akibat fenomena elektromagnetik yang tidak dapat dimodelkan secara ideal dan muncul ketika generator beroperasi di bawah beban. Rugi stray terutama disebabkan oleh fluks bocor (*leakage flux*) yang tidak mengikuti lintasan magnetik utama, distorsi medan magnet, serta arus eddy tambahan yang terinduksi pada bagian logam struktural generator seperti gigi stator, rangka, dan bagian konduktif lainnya. Tidak seperti rugi besi dan rugi mekanik yang relatif konstan, rugi stray bergantung pada kondisi pembebanan, sehingga nilainya meningkat seiring dengan kenaikan arus jangkar dan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

ketidaksempurnaan distribusi medan magnet. Akibatnya, sebagian energi listrik yang dihasilkan atau diserap generator terdisipasi sebagai panas tambahan dan tidak berkontribusi terhadap daya keluaran bersih, sehingga menurunkan efisiensi mesin Listrik (Wibowo et al., 2024), Berdasarkan persamaan yang diberikan, nilainya diperkirakan sebesar 1% dari total rugi tembaga, yang dinyatakan sebagai :

$$P_{stray} = 0,01 \times P_{cu} \quad (2.15)$$

Rugi-rugi total pada generator merupakan akumulasi seluruh rugi daya yang terjadi selama proses konversi energi mekanik menjadi energi listrik, yang menyebabkan daya keluaran generator lebih kecil dibandingkan daya masukan dari penggerak mula. Rugi-rugi ini mencakup rugi tembaga, rugi besi, rugi mekanik, dan rugi stray (*stray load losses*). Keberadaan rugi-rugi total tidak dapat dihindari karena dipengaruhi oleh karakteristik material, desain mesin, serta kondisi operasi generator. Besarnya rugi-rugi total sangat menentukan nilai efisiensi generator, sehingga analisis rugi-rugi menjadi bagian penting dalam evaluasi performa sistem pembangkitan tenaga Listrik (Wibowo et al., 2024), Secara matematis, rugi daya total pada generator dapat dinyatakan seperti pada Persamaan (2.8).

$$P_{rugi\,total} = P_{cu} + P_{mech} + P_{core} + P_{stray} \quad (2.16)$$

2.1.9 Efisiensi Generator

Efisiensi generator merupakan parameter utama yang menunjukkan tingkat keberhasilan generator dalam mengonversi energi mekanik dari penggerak mula menjadi energi listrik keluaran. Secara umum, efisiensi menggambarkan perbandingan antara daya listrik yang dihasilkan dengan daya mekanik yang masuk ke generator. Nilai efisiensi tidak pernah mencapai 100% karena selama proses konversi energi selalu terjadi berbagai rugi-rugi, seperti rugi tembaga, rugi besi, rugi mekanik, dan rugi stray. Oleh karena itu,

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

efisiensi generator sangat dipengaruhi oleh besarnya rugi-rugi total yang terjadi selama operasi, serta kondisi pembebanan generator (SEPTIYAN et al., 2019).

Pada kondisi beban tertentu, efisiensi generator akan mencapai nilai maksimum ketika daya keluaran relatif jauh lebih besar dibandingkan total rugi-rugi daya. Sebaliknya, pada kondisi beban rendah, efisiensi generator cenderung menurun karena proporsi rugi-rugi tetap, seperti rugi besi dan rugi mekanik, menjadi lebih dominan dibandingkan daya keluaran. Hal ini menunjukkan bahwa variasi pembebanan memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi generator dan perlu dianalisis untuk menentukan titik operasi yang paling optimal dalam sistem pembangkitan tenaga Listrik (Wibowo et al., 2024). Secara matematis, efisiensi generator dirumuskan sebagai :

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100\% \quad (2.17)$$

Dengan :

η = efisiensi generator (%)

P_{out} = daya listrik keluaran generator (Watt)

P_{in} = daya mekanik masukan ke generator (Watt)

Karena daya masukan merupakan penjumlahan antara daya keluaran dan total rugi-rugi generator, maka persamaan efisiensi juga dapat dituliskan sebagai :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{total}} \times 100\% \quad (2.18)$$

di mana P_{total} merupakan total rugi-rugi generator yang terdiri dari rugi tembaga, rugi besi, rugi mekanik, dan rugi stray. Dari persamaan tersebut terlihat bahwa semakin kecil rugi-rugi total, maka efisiensi generator akan semakin tinggi. Oleh karena itu, analisis dan pengendalian rugi-rugi daya

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menjadi faktor penting dalam upaya peningkatan efisiensi generator (SEPTIYAN et al., 2019).

2.2 Kajian Literatur

1. Joko Purnomo (2018) melakukan penelitian mengenai pengaruh perubahan *load capacity* terhadap efisiensi turbin generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Awar-Awar berkapasitas 350 MW. Dalam sistem pembangkitan tenaga listrik, turbin uap dan generator merupakan komponen utama yang sangat menentukan kinerja dan efisiensi pembangkit secara keseluruhan. Perubahan tingkat pembebanan selama operasi pembangkit menyebabkan terjadinya variasi performa peralatan, khususnya pada efisiensi isentropis turbin dan efisiensi turbin generator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi *load capacity* terhadap kinerja turbin generator dengan melakukan evaluasi pada beberapa tingkat beban operasi, yaitu 75%, 85%, dan 100%, melalui perhitungan analisis energi dan termodinamika untuk menentukan efisiensi turbin dan generator (Purnomo & Effendy, 2018).
2. Admin dan M. Noer melakukan penelitian mengenai kinerja generator dalam sistem pembangkitan tenaga listrik dengan meninjau pengaruh rugi-rugi daya terhadap efisiensi operasi generator. Generator sebagai mesin konversi energi listrik memiliki karakteristik kinerja yang sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional, khususnya besarnya arus beban yang mengalir pada belitan stator. Variasi pembebanan menyebabkan terjadinya perubahan rugi-rugi daya, terutama rugi tembaga, rugi inti besi, dan rugi mekanik, yang secara langsung berdampak pada nilai efisiensi generator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara perubahan beban terhadap besarnya rugi-rugi daya dan efisiensi generator melalui perhitungan dan evaluasi parameter-parameter kinerja generator berdasarkan data operasi aktual (Noer, 2017).
3. Mustofa dan Roihatin (2024) melakukan penelitian mengenai pengaruh fluktuasi beban terhadap rugi daya stator dan rotor pada generator sinkron yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga panas bumi. Generator sinkron sebagai komponen utama dalam sistem pembangkitan listrik sangat

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

dipengaruhi oleh perubahan kondisi operasi, khususnya variasi beban, yang berdampak langsung pada arus generator, arus eksitasi, serta kenaikan temperatur lilitan stator dan rotor. Peningkatan temperatur tersebut berpotensi menimbulkan rugi daya yang lebih besar dan menurunkan keandalan generator (Mustofa & Roihatin, 2024).

4. Dina Masyari dkk. (2024) dalam penelitiannya yang berjudul “*Analisa Perubahan Beban terhadap Kinerja Generator Unit 7 di PT PLN Nusantara Power*” menjelaskan bahwa kinerja generator sangat dipengaruhi oleh perubahan beban selama proses pembebanan. Perubahan beban tersebut berpengaruh terhadap besarnya rugi-rugi daya yang meliputi rugi tembaga, rugi besi, rugi mekanik, dan rugi stray, sehingga berdampak langsung pada efisiensi generator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi beban yang diberikan, maka rugi-rugi daya yang dihasilkan juga semakin besar (Masyari et al., 2024).
5. Zikrul Muna dkk. (2023) dalam penelitiannya yang berjudul “*Studi Perubahan Beban terhadap Rugi-Rugi Daya Output Generator Sinkron Tiga Phase 20 MW pada Generator Turbin Gas Unit 2 di PT Pupuk Iskandar Muda*” menjelaskan bahwa perubahan beban yang terjadi pada generator sangat berpengaruh terhadap besarnya rugi-rugi daya dan efisiensi generator. Perubahan beban menyebabkan meningkatnya arus dan suhu pada belitan stator maupun rotor sehingga nilai tahanan bertambah dan menimbulkan rugi-rugi daya yang lebih besar. Semakin besar beban yang diberikan, maka rugi-rugi daya yang dihasilkan juga semakin meningkat, namun efisiensi generator cenderung semakin tinggi seiring bertambahnya daya output generator (Muna et al., 2023).
6. Mohammad Maslan dkk. (2025) dalam penelitiannya yang berjudul “*Studi Perubahan Beban Listrik Terhadap Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) PT. PLN Indonesia Power Unit Bisnis Pembangkitan Tello*” menyatakan bahwa efisiensi generator pada PLTG dipengaruhi oleh perubahan beban listrik selama proses operasional. Variasi beban menyebabkan perubahan pada daya input, daya output, serta rugi-rugi daya generator yang meliputi rugi

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

tembaga dan rugi mekanik, sehingga berpengaruh langsung terhadap nilai efisiensi (Perubahan et al., 2025).

7. Andi Ervianto Nur dkk. (2022) dalam penelitiannya yang berjudul “*Pengaruh Perubahan Beban Generator terhadap Efisiensi PLTU (Studi pada PLTU Semen Tonasa Unit 35 MW)*” menjelaskan bahwa efisiensi generator pada sistem pembangkit listrik tenaga uap sangat dipengaruhi oleh perubahan beban selama proses operasional. Perubahan beban menyebabkan terjadinya fluktuasi daya keluaran, arus, tegangan, serta faktor daya yang berimplikasi langsung pada besarnya rugi-rugi daya generator, sehingga berdampak pada penurunan efisiensi (Nur et al., 2022b).
8. Rafli Fadilah, Sofian Yahya, dan Sofyan Muhammad Ilman (2024) dalam penelitiannya yang berjudul “*Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator 55 MW Unit 3 di PLN Indonesia Power UBP Kamojang*” menjelaskan bahwa efisiensi generator sinkron sangat dipengaruhi oleh variasi pembebanan dan rugi-rugi daya yang terjadi selama operasi. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis data pembebanan generator selama periode 2023–2024 menggunakan perhitungan manual serta simulasi MATLAB dan ETAP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembebanan rata-rata sebesar 43,83 MW menghasilkan efisiensi rata-rata sebesar 99,05%, yang masih berada di atas standar efisiensi IEC 60034-1:2017. Efisiensi generator cenderung meningkat pada pembebanan tinggi karena kenaikan daya keluaran lebih signifikan dibandingkan peningkatan rugi-rugi tembaga, sementara rugi besi dan mekanik relatif konstan. Sebaliknya, pada pembebanan rendah efisiensi menurun akibat besarnya pengaruh rugi konstan terhadap daya keluaran, sehingga generator bekerja paling optimal ketika beroperasi mendekati kapasitas beban rancangannya (Fadilah et al., 2024).
9. Ashar dkk. (2022) dalam penelitiannya yang berjudul “*Analisis Efisiensi Generator pada GT21 Blok 2 Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) PT. CEPA Sengkang*” menjelaskan bahwa efisiensi generator merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan keandalan dan kinerja sistem pembangkitan listrik. Efisiensi generator dipengaruhi oleh

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

tingkat pembebanan serta besarnya rugi-rugi daya yang meliputi rugi tembaga, rugi besi, rugi mekanik, dan rugi gesekan. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis data pembebanan harian dan bulanan selama 31 hari pada berbagai tingkat pembebanan, yaitu 25%, 50%, 75%, dan 100%, serta membandingkan nilai efisiensi aktual dengan spesifikasi pabrikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi rata-rata generator pada bulan Mei 2022 sebesar 96,21% dengan beban rata-rata 29,96 MW, di mana efisiensi tertinggi mencapai 99,62% pada pembebanan penuh sekitar 54,2 MW. Namun, terjadinya fenomena *reverse power* pada kondisi tertentu menyebabkan penurunan efisiensi generator. Dengan demikian, pengoperasian generator pada beban optimal dan pengendalian kondisi operasi sangat diperlukan untuk menjaga efisiensi dan keandalan generator dalam sistem PLTGU (AR et al., 2022b).

10. Osca Samudera Clever (2023) dalam penelitiannya yang berjudul “*Analisis Pengaruh Pembebanan terhadap Efisiensi Generator di PLTU Embalut Unit 3*” menjelaskan bahwa efisiensi generator sebagai komponen utama sistem pembangkit listrik tenaga uap sangat dipengaruhi oleh variasi pembebanan dan besarnya rugi-rugi daya yang terjadi selama proses konversi energi. Perubahan beban menyebabkan fluktuasi arus dan arus eksitasi generator yang berdampak pada meningkatnya rugi tembaga dan rugi beban stray, sementara rugi besi dan rugi mekanik cenderung bersifat konstan. Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi generator cenderung meningkat seiring bertambahnya beban hingga mendekati kapasitas nominal, dengan efisiensi tertinggi mencapai sekitar 98,39% pada beban mendekati 60 MW, sedangkan efisiensi terendah sebesar 97,8% terjadi pada beban rendah sekitar 35,2 MW. Secara keseluruhan, kinerja generator PLTU Embalut Unit 3 masih memenuhi standar efisiensi IEC 60034-1:2004 dan spesifikasi pabrikan, sehingga pengoperasian generator pada beban optimal serta pemantauan rugi-rugi daya secara berkala diperlukan untuk menjaga efisiensi dan keandalan sistem pembangkitan Listrik (Clever, 2023b).



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.3 Kerangka berfikir

Kinerja generator pada PLTU sangat dipengaruhi oleh variasi daya keluaran yang dihasilkan selama operasi. Perubahan daya keluaran menyebabkan perubahan arus stator dan kondisi elektromagnetik generator, yang berdampak langsung pada nilai efisiensi serta besarnya rugi-rugi daya. Pada kondisi daya rendah, rugi-rugi daya relatif lebih dominan sehingga efisiensi generator cenderung menurun, sedangkan pada daya yang lebih tinggi efisiensi dapat meningkat hingga mencapai kondisi operasi optimum. Namun, pada generator 350 MW di PLTU belum dilakukan analisis menyeluruh mengenai pengaruh variasi daya keluaran terhadap efisiensi dan rugi-rugi daya berdasarkan data operasi aktual. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis hubungan antara variasi daya keluaran dengan efisiensi dan rugi-rugi daya generator melalui pendekatan kuantitatif. Hasil analisis diharapkan dapat menggambarkan karakteristik kinerja generator serta menentukan rentang daya operasi yang paling optimal.

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

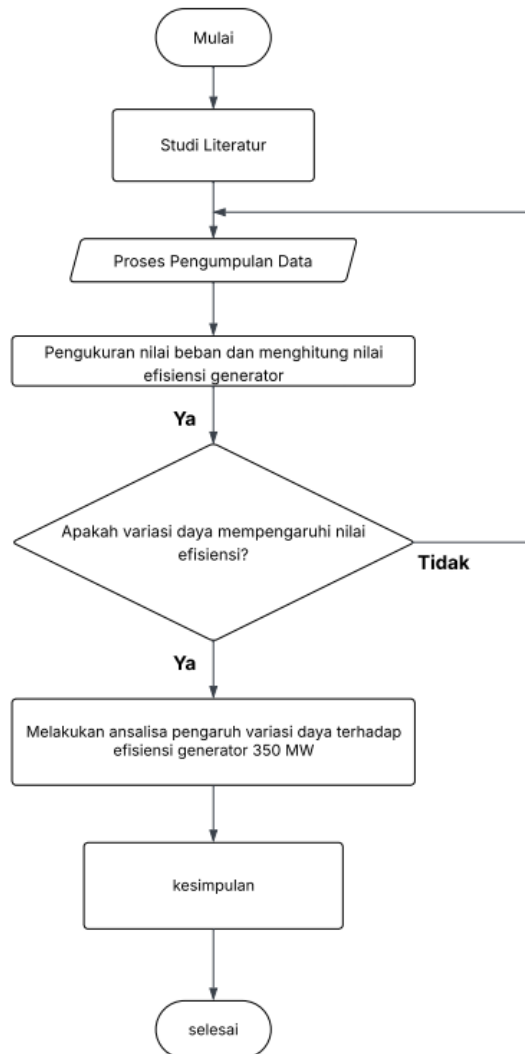
BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif, yang mana metode ini memanfaatkan data dalam bentuk angka untuk mengetahui hasil analisis yang menjawab pertanyaan dari penelitian yang dilakukan.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian dapat disajikan seperti gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Berikut ini penjelasan Langkah kerja dari diagram alir di atas:

1. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui apakah pembebanan generator mempengaruhi nilai efisiensi generator karena tidak ada pengecekan secara rutin pada generator PLTU dalam jangka penggunaan yang cukup lama.
2. Kemudian dilanjutkan dengan tahapan studi literatur, pada tahap ini peneliti mencari referensi yang ada di internet maupun di tempat praktik kerja lapangan. Referensi yang digunakan yaitu: jurnal, buku, dan skripsi/tugas akhir.
3. Tahap selanjutnya yaitu pengumpulan data. Setelah melakukan studi literatur peneliti mengumpulkan data. Pengumpulan data dilakukan dengan cara melihat secara langsung pada panel DCS yang ada pada *Central Control Room*, kemudian dicatat pada logsheet harian.
4. Setelah semua data terkumpul, peneliti melakukan pengolahan data dengan cara perhitungan mencari nilai pembebanan dan pengaruhnya terhadap nilai efisiensi dan temperatur pada generator PLTU.
5. Ketika hasil perhitungan nilai pembebanan dan pengaruhnya terhadap nilai efisiensi generator sudah di dapatkan, perhitungan akan disajikan dalam bentuk tabel yang berisi hasil nilai rata nilai pembebanan dan efisiensi generator. Kemudian disajikan dalam bentuk grafik perubahan beban terhadap nilai efisiensi dan temperatur pada generator.
6. Melakukan analisa data dari hasil perhitungan yang di dapat mengenai pengaruh pembebanan terhadap efisiensi dan temperatur generator.
7. Setelah itu diambil suatu kesimpulan dari hasil analisa data dan ditulis dalam beberapa poin pada bab kesimpulan.
8. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi atau sebagai acuan untuk melakukan penelitian yang terkait.

3.3 Objek Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada generator dengan objek penelitian berupa nilai rugi-rugi daya dan efisiensi dari unit 1 dan unit 2 generator yang berada di

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

PLTU INDONESIA POWER JABAR 2 PELABUHAN RATU, Jl. Raya Sukabumi, Jalan Raya Cipatuguran Desa Jayanti, Citarik, Kec. Pelabuhan ratu, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat 43364.

3.4 Metode Penelitian Sampel

Pada penelitian ini sampel yang digunakan diperoleh dari data histori objek, data sheet dan hasil wawancara dengan teknisi lapangan pemeliharaan Listrik.

3.5 Jenis dan Sumber Data Penelitian

Jenis dan sumber data yang digunakan dalam penelitian yakni data kuantitatif, yang menunjukkan pada data atau informasi yang diperoleh dalam bentuk angka. Sumber data kuantitatif ini berasal dari 2 jenis sumber yakni data primer dan data sekunder. Data primer yakni data yang diperoleh secara langsung pada panel operasi generator unit 1 dan unit 2, sementara itu untuk data sekunder berasal dari laporan histori operasi (work order) dan manual book.

3.6 Metode Pengumpulan Data

Secara keseluruhan yang menjadi objek penelitian adalah rugi-rugi daya dan efisiensi. Kemudian sample yang digunakan untuk perhitungan efisiensi adalah variasi daya dan arus pada generator. Pengambilan sampel variasi daya dan arus dilakukan dengan melihat *Distributed Control System* (DCS), kemudian di lakukan pencatatan pada logsheet harian.

3.7 Metode Analisis Data

Metode analisis penelitian ini menggunakan analisis kuantitatif pengolahan data, analisis kuantitatif dilakukan untuk menilai hubungan antara variasi daya terhadap rugi-rugi dan efisiensi generator.

3.8 Kurva penelitian

Tabel 3. 1 Tabel Kurva S Penelitian

Kegiatan	Jumlah Minggu	Bobot%	Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Pengambilan Data	2	4	2	2																										
Konsultasi Dengan Pembimbing Lapangan	2	4			2	2																								
Kajian Literatur	4	8					2	2	2	2																				
Proposal Skripsi Dengan Diskusi Dengan Pembimbing Lapangan	2	4									2	2																		
Pembuatan Skripsi	17	34										2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Bimbingan Dengan Dosen Pembimbing	15	30											2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Pendaftaran Sidang Skripsi	2	4																												
Total	50	100																												
Progres Rencana			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Total Akumulatif Progres Rencana			2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56

Pada tabel 3.1 dapat diketahui bobot persentase progres pengerjaan skripsi setiap minggunya selama bulan Januari – Juli dari awal pengambilan data sampai sidang skripsi. Pada bulan Januari dilakukan pengambilan data pada generator PLTU Pelabuhan Ratu selama 2 minggu yang memiliki bobot 2%- 4%, kemudian di lanjutkan dengan konsultasi pada pembimbing lapangan mengenai pengambilan data yang sudah dilakukan memiliki bobot 6%-8%. Pada bulan februari dilakukan kajian literatur selama 4 minggu yang memiliki bobot 10%-16%. Setelah itu pada bulan Maret melakukan presentasi judul proposal skripsi pada dosen pembimbing 1 dan 2 selama 2 minggu yang memiliki bobot 18%-20%. Di bulan Maret sampai bulan Juli melakukan pembuatan skripsi selama 16 minggu yang memiliki bobot 20%- 96% pada pengerjaan skripsi. Pada bulan Maret minggu ke 12 berasamaan dengan pembuatan skripsi melakukan bimbingan dengan dosen pembimbing 1 dan 2 sampai bulan Juli minggu ke 26 yang memiliki bobot 28%-96%. Pada bulan Juli minggu 25 dan 26 melakukan pendaftaran skripsi yang memiliki bobot 90%-96%. Setelah itu dilanjutkan dengan sidang skripsi pada bulan juli minggu ke 27 dan 28 yang memiliki bobot pengerjaan skripsi sudah mencapai 95%-100%.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Spesifikasi Generator PLTU Indonesia Power Jabar 2 Pelabuhan Ratu

Generator yang dijadikan objek pada penelitian ini adalah generator sinkron 350 MW di PLTU Indonesia Power Jabar 2 Pelabuhan Ratu. Spesifikasi Generator PLTU Indonesia Power Jabar 2 Pelabuhan Ratu seperti pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Spesifikasi Generator

Generator Specification	
Manufactur	Shanghai Electric
Model	QFSN-350-2
Rated Capacity	412 MVA
Rated Power Factor	0.85
Rated Stator Voltage	20 kV
Rated Stator Current	11887 A
Rated Speed	3000 r/min
Rated Frequency	50 Hz
Efficiency	98,85%
Cooler water inlet temperature	$\geq 38,5^{\circ}\text{C}$
Excitation Type	Brushless Excitation (BLE)
Rated Field Voltage (90°C)	2830 A
Rated Field Current	340 V
Cold Hydrogen Temperature	Norm. 46°C; Max. 48°C
Stator winding cooling water inlet temperature	45°C ~ 50°C
No load field current	978 A
No load field voltage	113 V
Stator winding resistance (15°C)	0,00212 Ω /phase
Rotor winding resistance (15°C)	0,0923 Ω
Phase/Connected	3 Y

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.2 Data Pembebanan Pada Generator PLTU Indonesia Power Jabar 2 Pelabuhan Ratu

Analisis dalam penelitian ini didasarkan pada data daya output harian dari generator yang disediakan oleh PT. Indonesia Power Jabar 2 Pelabuhan Ratu. Data tersebut direkam selama periode bulan Januari 2026 pada 2 unit, yaitu unit 1 dan unit 2. Seluruh data operasional mentah dan hasil olahannya telah dirangkum secara komprehensif pada Tabel

1. Data Daya output Generator periode 1 – 14 Januari 2026

Tabel 4. 2 Data Beban Output Generator Unit 1

Tanggal	Beban	Arus (A)	Tegangan (V)	Faktor Daya (cos ϕ)	Frekuensi (Hz)	Temp. Generator
01/01/2026	165,1	5373,9	19,6	0,9	50,0	43,4
02/01/2026	229,1	6735,8	19,7	0,92	50,0	45,8
03/01/2026	243,5	8213,2	19,6	0,92	50,0	46,4
04/01/2026	247,6	8053,9	19,6	0,92	50,1	46,3
05/01/2026	257,3	7849,1	19,5	0,92	50,0	47,7
06/01/2026	266,2	8909,6	19,7	0,92	50,0	48,7
07/01/2026	270,0	9451,5	19,6	0,92	50,0	48,7
08/01/2026	215,3	7001,4	19,6	0,92	50,0	46,0
09/01/2026	190,9	7070,9	19,5	0,91	50,0	44,9
10/01/2026	241,8	6649,0	19,7	0,91	50,0	46,6
11/01/2026	212,0	7719,5	19,8	0,91	50,0	45,2
12/01/2026	227,2	7233,4	20,1	0,91	50,0	45,7
13/01/2026	180,8	6594,6	19,8	0,91	50,0	43,7
14/01/2026	230,5	5921,7	19,5	0,91	50,0	46,0

Tabel 4. 3 Data Beban Output Generator Unit 2

Tanggal	Beban	Arus (A)	Tegangan (V)	Faktor Daya (cos ϕ)	Frekuensi (Hz)	Temp. Generator
01/01/2026	195,5	6119,6	19,6	0,90	50,0	42,8
02/01/2026	259,4	8122,2	19,6	0,92	50,0	44,8
03/01/2026	268,0	8319,6	19,4	0,92	50,0	45,0
04/01/2026	270,7	8323,9	19,7	0,92	50,1	45,2
05/01/2026	284,5	9005,3	19,8	0,92	50,0	46,4
06/01/2026	317,0	9994,3	20,0	0,92	50,0	48,1
07/01/2026	322,6	10036,5	19,4	0,92	50,0	48,1
08/01/2026	302,7	9378,1	19,8	0,92	50,0	47,6
09/01/2026	247,2	7719,2	19,7	0,91	50,0	45,2

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

10/01/2026	255,5	8010,7	19,5	0,91	50,0	45,1
11/01/2026	251,1	7713,8	19,7	0,91	50,0	44,2
12/01/2026	251,4	7863,8	19,6	0,91	50,0	44,3
13/01/2026	203,2	6319,2	19,4	0,91	50,0	43,0
14/01/2026	237,8	7462,0	19,6	0,91	50,0	44,0

Berdasarkan data Tabel 4.2 dan 4.3 operasi beban output generator pada Unit 1 dan Unit 2, terlihat bahwa peningkatan beban (MW) menyebabkan kenaikan arus (A), yang menunjukkan hubungan berbanding lurus sesuai teori. Tegangan generator relatif stabil pada kisaran 19,4–20,1 kV, menandakan sistem eksitasi dan AVR bekerja dengan baik dalam menjaga kestabilan tegangan. Faktor daya berada pada kisaran 0,90–0,92 yang menunjukkan kondisi operasi normal dengan beban induktif. Frekuensi sistem juga stabil di sekitar 50 Hz, menandakan keseimbangan antara daya mekanik dan daya listrik terjaga.

2. Data Daya Output Generator Periode 15 – 28 Januari 2026

Tabel 4. 4 Data Beban Output Generator Unit 1

Tanggal	Beban (MW)	Arus (A)	Tegangan (V)	Faktor Daya (cos ϕ)	Frekuensi (Hz)	Temp. Generator
15/01/2026	207,6	6769,1	19,3	0,91	50,0	44,3
16/01/2026	215,7	6952,8	19,3	0,91	50,0	44,8
17/01/2026	211,8	6882,8	19,5	0,91	50,0	44,7
18/01/2026	212,2	6801,9	19,4	0,91	50,0	44,5
19/01/2026	182,1	6046,7	19,6	0,91	50,0	43,6
20/01/2026	148,4	4909,4	19,6	0,91	50,0	42,2
21/01/2026	123,1	4133,0	19,4	0,91	50,0	41,0
22/01/2026	156,6	5188,5	19,7	0,91	50,0	42,0
23/01/2026	136,3	4548,2	19,8	0,91	50,0	41,8
24/01/2026	142,9	4745,4	20,0	0,91	50,0	41,8
25/01/2026	140,7	4710,4	19,4	0,91	50,0	41,8
26/01/2026	146,1	4874,1	19,8	0,91	50,0	42,3
27/01/2026	150,8	5061,1	19,7	0,91	50,0	42,6
28/01/2026	158,3	5223,4	19,5	0,91	50,0	42,8

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Tabel 4. 5 Data Beban Output Generator Unit 2

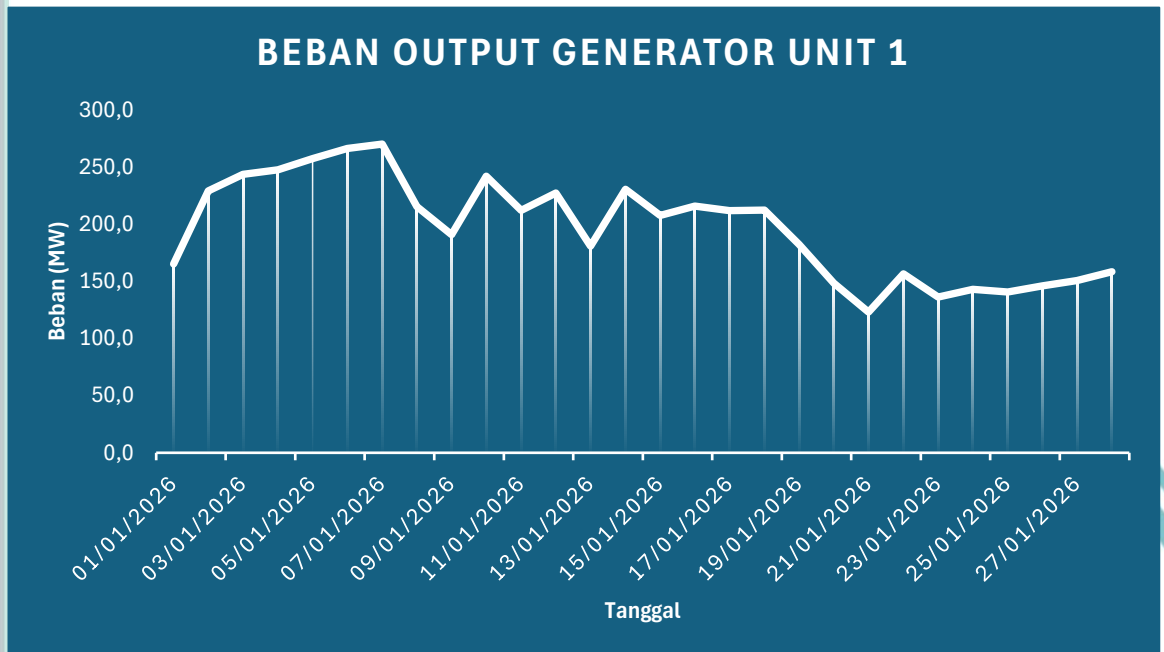
Tanggal	Beban (MW)	Arus (A)	Tegangan (V)	Faktor Daya ($\cos \phi$)	Frekuensi (Hz)	Temp. Generator
15/01/2026	220,9	6824,0	19,7	0,91	50,0	43,2
16/01/2026	231,3	7142,5	19,6	0,91	50,0	43,6
17/01/2026	240,9	7479,0	19,6	0,91	50,0	43,9
18/01/2026	226,5	6968,8	19,5	0,91	50,0	43,4
19/01/2026	193,4	5978,2	19,7	0,91	50,0	42,7
20/01/2026	159,6	4965,8	19,6	0,91	50,0	42,0
21/01/2026	130,0	4090,6	19,6	0,91	50,0	41,5
22/01/2026	172,9	5344,4	19,5	0,91	50,0	42,2
23/01/2026	145,2	4515,9	19,7	0,91	50,0	41,8
24/01/2026	160,3	4986,7	19,8	0,91	50,0	42,1
25/01/2026	155,0	4812,7	20,1	0,91	50,0	41,9
26/01/2026	157,3	4923,5	19,8	0,91	50,0	42,0
27/01/2026	168,4	5241,9	19,5	0,91	50,0	42,3
28/01/2026	178,8	5574,8	19,3	0,91	50,0	42,5

Berdasarkan data pada tabel 4.4 dan 4.5 beban output generator Unit 1 dan Unit 2 periode 15–28 Januari 2026, terlihat bahwa nilai beban (MW) berfluktuasi setiap harinya dan berpengaruh langsung terhadap arus generator. Ketika beban meningkat, arus juga mengalami kenaikan, yang menunjukkan hubungan linier sesuai dengan prinsip kerja generator sinkron. Pada Unit 1, arus berkisar antara 4.099 A hingga 6.952 A, sedangkan pada Unit 2 berkisar antara 4.516 A hingga 7.142 A, di mana nilai tertinggi terjadi saat beban mencapai lebih dari 220 MW. Tegangan generator pada kedua unit relatif stabil di kisaran 19,3 kV hingga 20,1 kV, yang menandakan sistem eksitasi mampu menjaga kestabilan tegangan dengan baik meskipun terjadi perubahan beban. Faktor daya ($\cos \phi$) konstan pada nilai 0,91, menunjukkan bahwa generator beroperasi dalam kondisi beban induktif yang normal dan efisien. Selain itu, frekuensi sistem tetap stabil pada 50 Hz, yang menandakan keseimbangan antara daya mekanik dan daya listrik tetap terjaga selama periode operasi.

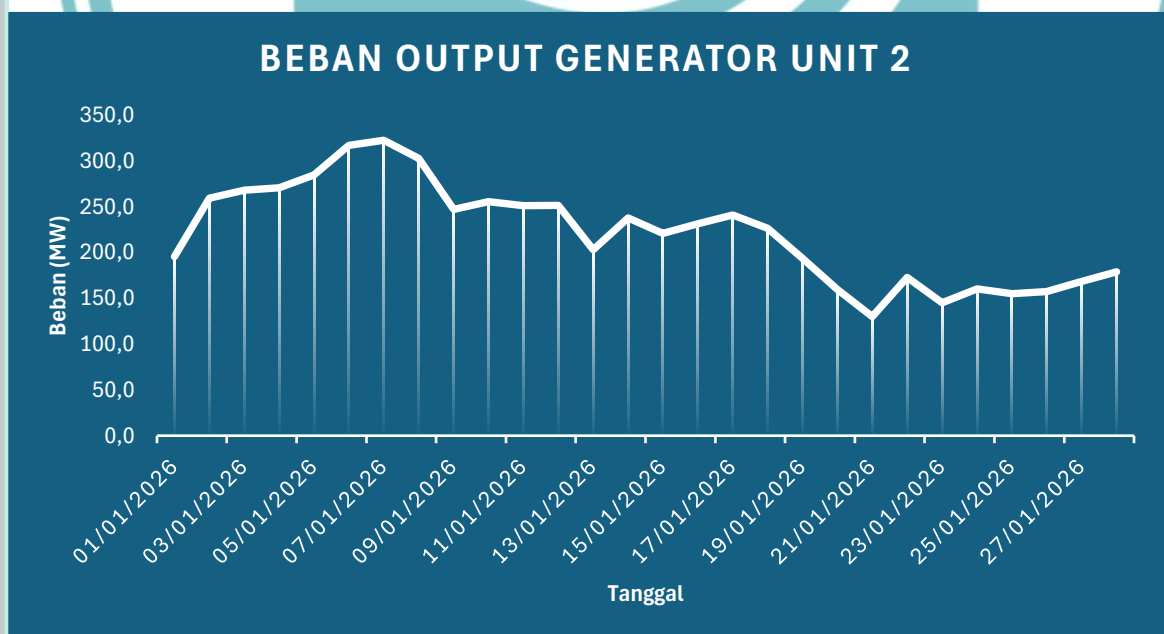
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3. Grafik Beban Output Generator Unit 1 dan 2 tanggal 1 - 28 Januari 2026



Gambar 4. 2 Grafik Beban Output Generator Unit 1



Gambar 4. 1 Grafik Beban Output Geneator Unit 2

Berdasarkan grafik yang disajikan pada gambar 4.1 dan 4.2, beban output generator Unit 1 dan Unit 2 periode 1–28 Januari 2026, terlihat bahwa kedua unit mengalami fluktuasi beban yang cukup signifikan selama periode operasi. Pada Unit 1, beban meningkat di awal periode dan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

mencapai puncak sekitar 260–270 MW pada tanggal 6–7 Januari, kemudian mengalami penurunan bertahap hingga mencapai titik terendah sekitar 120–140 MW pada tanggal 21–23 Januari, sebelum kembali naik secara perlahan di akhir periode. Pola ini menunjukkan adanya perubahan kebutuhan beban sistem yang dipengaruhi oleh kondisi operasional dan permintaan energi. Sementara itu, Unit 2 menunjukkan grafik yang hampir serupa, namun dengan nilai beban yang cenderung lebih tinggi. Beban maksimum terjadi pada kisaran 310–320 MW di sekitar tanggal 7–8 Januari, kemudian mengalami penurunan yang cukup signifikan hingga mencapai sekitar 140–160 MW pada tanggal 21–22 Januari. Setelah itu, beban kembali mengalami kenaikan secara bertahap hingga akhir periode pengamatan. Secara umum, kedua grafik menunjukkan bahwa pola pembebanan generator mengikuti pola beban sistem, di mana terjadi peningkatan di awal periode dan penurunan di pertengahan hingga akhir periode. Fluktuasi ini berpengaruh langsung terhadap parameter operasi lain seperti arus dan temperatur generator.

4.3 Perhitungan Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi Generator

1. Rugi-Rugi Tembaga

Perhitungan dilakukan menggunakan data pembebanan generator unit 2 tanggal 6 Januari 2026 yang merupakan pembebanan tertinggi yang terjadi pada generator.

Perhitungan resistansi pada stator menggunakan rumus pada persamaan 2.9.

$$R_T = 0,0923 (1 + 0,00393 (48,1 - 15))$$

$$R_T = 0,1043 \, \Omega$$

Perhitungan rugi-rugi daya tembaga menggunakan rumus pada persamaan 2.8.

$$P_{cu} = 3 \times (317)^2 \times 0,0143$$

$$P_{cu} = 31261,0 \, K_w$$

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Rugi-Rugi Mekanik

Perhitungan rugi-rugi mekanik menggunakan rumus pada persamaan 2.10.

$$P_{\text{beban tertinggi}} = 317 \text{ Mw}$$

$$\eta 100\% = 98,8\% \text{ (berdasarkan pada data sheet operasi Generator)}$$

$$\text{Rugi Beban Penuh} = P_{in} - P_{out}$$

$$\text{Rugi Beban Penuh} = \frac{P_{out}}{\eta} - P_{out}$$

$$\text{Rugi Beban Penuh} = \frac{317}{0,988} - 317$$

$$\text{Rugi Beban Penuh} = 3850 \text{ Kw}$$

$$P_{mech} = 0,2 \times 3850$$

$$P_{mech} = 770,0 \text{ Kw}$$

3. Rugi-Rugi Besi

Perhitungan rugi-rugi besi menggunakan rumus pada persamaan 2.14.

$$P_{fe} = 0,3 \times 3850$$

$$P_{fe} = 1155,0 \text{ Kw}$$

4. Rugi-Rugi Stray

Perhitungan rugi-rugi beban stray menggunakan rumus pada persamaan 2.15.

$$P_{stray} = 0,01 \times 31261,0$$

$$P_{stray} = 312,6 \text{ Kw}$$

5. Rugi-Rugi Total

Perhitungan rugi daya total pada generator menggunakan rumus pada persamaan 2.16.

$$P_{Rugi \text{ Total}} = 31261,0 + 770,0 + 1155,0 + 312,6 = 33498,6 \text{ Kw}$$

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.4 Hasil Perhitungan Efisiensi Terhadap Rugi-Rugi Daya Dan Temperatur Generator

Hasil perhitungan nilai efisiensi harian untuk Generator Unit 1 dan Unit 2, yang didasarkan pada kalkulasi sebelumnya, disajikan pada tabel 4.6 dan 4.7 sebagai berikut.

1. Tabel Rata-Rata Beban Output Dan Nilai Efisiensi Harian Generator Unit 1 tanggal 1 – 28 Januari 2026.

Tabel 4. 6 Tabel Hasil Perhitungan Generator Unit 1

tanggal	Beban Output (Mw)	Rugi Total (Mw)	Efisiensi (%)	Temperatur Generator
01/01/2026	165,1	9,98	94,30	43,4
02/01/2026	229,1	15,62	93,62	45,8
03/01/2026	243,5	22,67	91,48	46,4
04/01/2026	247,6	21,88	91,88	46,3
05/01/2026	257,3	21,01	92,45	47,7
06/01/2026	266,2	26,75	90,87	48,7
07/01/2026	270,0	29,93	90,02	48,7
08/01/2026	215,3	16,69	92,80	46,0
09/01/2026	190,9	16,78	91,92	44,9
10/01/2026	241,8	15,37	94,03	46,6
11/01/2026	212,0	19,93	91,41	45,2
12/01/2026	227,2	17,78	92,74	45,7
13/01/2026	180,8	14,63	92,51	43,7
14/01/2026	230,5	12,40	94,90	46,0
15/01/2026	207,6	13,32	93,97	44,3
16/01/2026	215,7	16,39	92,94	44,8
17/01/2026	211,8	16,09	92,94	44,7
18/01/2026	212,2	15,74	93,09	44,5
19/01/2026	182,1	12,52	93,57	43,6
20/01/2026	148,4	8,40	94,64	42,2
21/01/2026	123,1	6,04	95,32	41,0
22/01/2026	156,6	9,25	94,42	42,0
23/01/2026	136,3	7,23	94,96	41,8
24/01/2026	142,9	7,83	94,81	41,8
25/01/2026	140,7	7,71	94,80	41,8
26/01/2026	146,1	8,23	94,67	42,3
27/01/2026	150,8	8,85	94,46	42,6
28/01/2026	158,3	9,42	94,38	42,8

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Rata-Rata Efisiensi	93,35
---------------------	-------

2. Tabel Rata-Rata Beban Output Dan Nilai Efisiensi Harian Generator Unit 2
Tanggal 1 – 28 Januari 2026.

Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan Generator Unit 2

Tanggal	Beban Output (Mw)	Rugi Total (Mw)	Efisiensi (%)	Temperatur Generator
01/01/2026	195,5	12,80	93,85	42,8
02/01/2026	259,4	22,19	92,12	44,8
03/01/2026	268,0	23,27	92,01	45,0
04/01/2026	270,7	23,32	92,07	45,2
05/01/2026	284,5	27,21	91,27	46,4
06/01/2026	317,0	33,50	90,44	48,1
07/01/2026	322,6	33,79	90,52	48,1
08/01/2026	302,7	29,58	91,10	47,6
09/01/2026	247,2	20,14	92,47	45,2
10/01/2026	255,5	21,62	92,20	45,1
11/01/2026	251,1	20,08	92,60	44,2
12/01/2026	251,4	20,81	92,35	44,3
13/01/2026	203,2	13,63	93,71	43,0
14/01/2026	237,8	18,79	92,68	44,0
15/01/2026	220,9	13,60	94,20	43,2
16/01/2026	231,3	17,25	93,06	43,6
17/01/2026	240,9	18,87	92,74	43,9
18/01/2026	226,5	16,50	93,21	43,4
19/01/2026	193,4	12,28	94,03	42,7
20/01/2026	159,6	8,62	94,88	42,0
21/01/2026	130,0	5,97	95,61	41,5
22/01/2026	172,9	9,87	94,60	42,2
23/01/2026	145,2	7,19	95,28	41,8
24/01/2026	160,3	8,66	94,87	42,1
25/01/2026	155,0	8,11	95,03	41,9
26/01/2026	157,3	8,45	94,90	42,0
27/01/2026	168,4	9,52	94,65	42,3
28/01/2026	178,8	10,71	94,35	42,5
Rata-Rata Efisiensi	93,24			

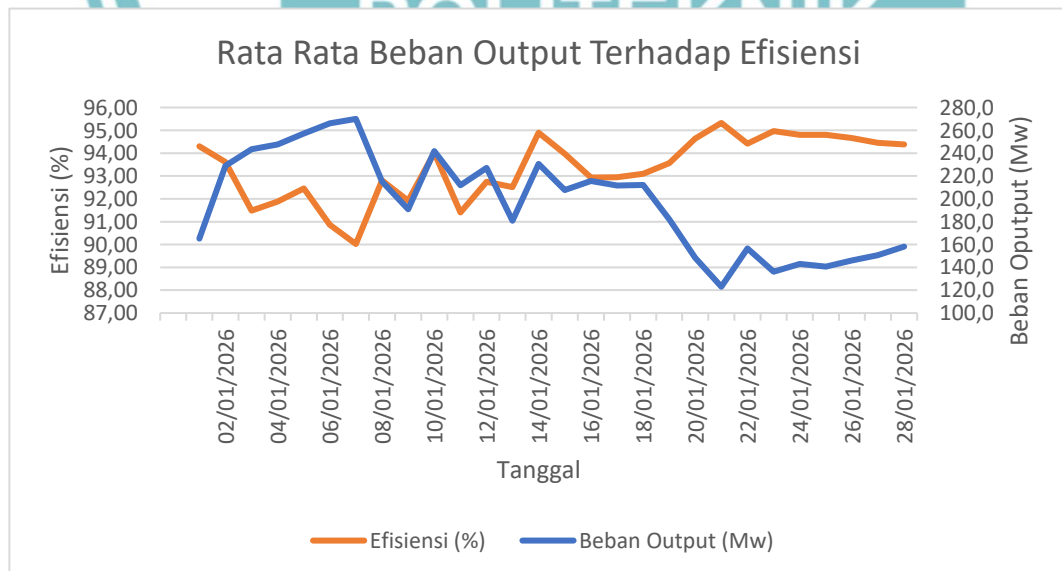
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Berdasarkan Tabel 4.6 dan Tabel 4.7, beban output Generator Unit 1 dan Unit 2 selama periode pengamatan mengalami fluktuasi yang signifikan, dengan Unit 2 beroperasi pada beban yang relatif lebih tinggi. Peningkatan beban terbukti menyebabkan kenaikan rugi-rugi daya, yang didominasi oleh rugi tembaga akibat hubungan kuadrat arus. Sebaliknya, saat beban menurun, rugi-rugi daya juga ikut menurun.

Efisiensi kedua generator berada pada kisaran yang baik, yaitu di atas 90%, namun cenderung menurun pada kondisi beban tinggi akibat meningkatnya rugi-rugi daya. Efisiensi optimal terjadi pada beban menengah ketika rugi daya relatif lebih kecil. Selain itu, temperatur generator meningkat seiring kenaikan beban, yang berdampak pada kenaikan resistansi lilitan dan memperbesar rugi daya. Secara keseluruhan, peningkatan beban menyebabkan kenaikan rugi-rugi daya dan temperatur serta penurunan efisiensi, meskipun kinerja generator masih tergolong optimal selama periode pengamatan.

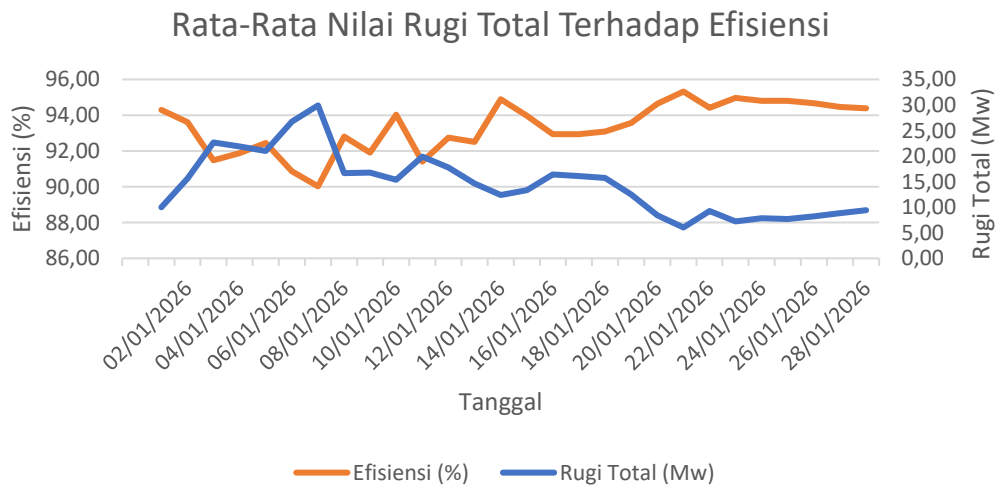
3. Grafik Rata-Rata Beban Output, Rugi Total, Dan Temperatur Terhadap Nilai Efisiensi Harian Generator Unit 1 Tanggal 1-28 Januari 2026.



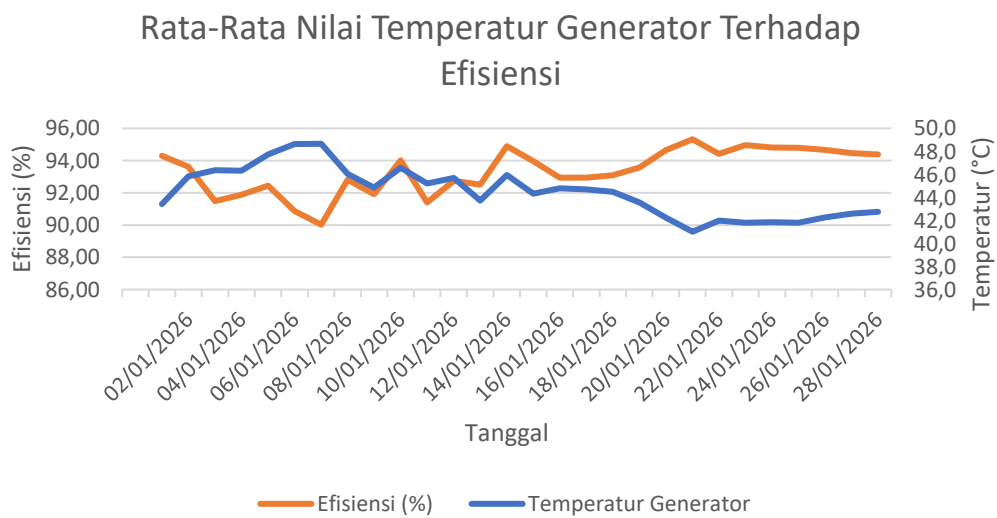
Gambar 4. 3 Grafik Beban Output Terhadap Efisiensi Generator Unit 1

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 4 Grafik Rugi Total Terhadap Efisiensi Generator Unit 1



Gambar 4. 5 Grafik Nilai Temperatur Terhadap Efisiensi Generator Unit 1

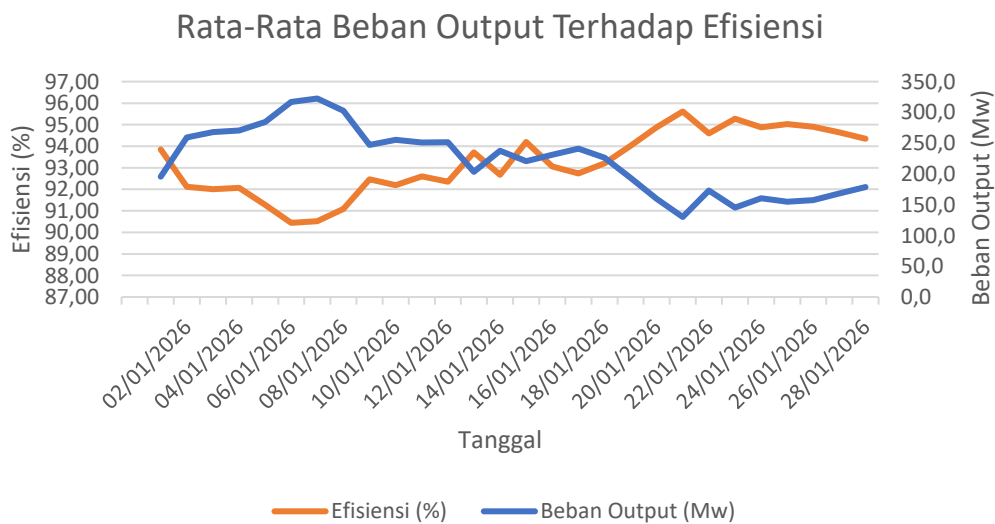
Grafik pada Gambar 4.3 sampai 4.5 menunjukkan bahwa beban output berfluktuasi selama periode pengamatan, sementara efisiensi relatif stabil. Namun, saat beban meningkat (terutama di pertengahan periode), efisiensi cenderung mengalami sedikit penurunan. Hal ini menandakan bahwa kenaikan beban tidak selalu meningkatkan efisiensi, terutama ketika rugi-rugi mulai bertambah. Terlihat adanya hubungan berbanding terbalik antara rugi total dan efisiensi. Ketika rugi-rugi meningkat, efisiensi menurun. Hal ini disebabkan

Hak Cipta :

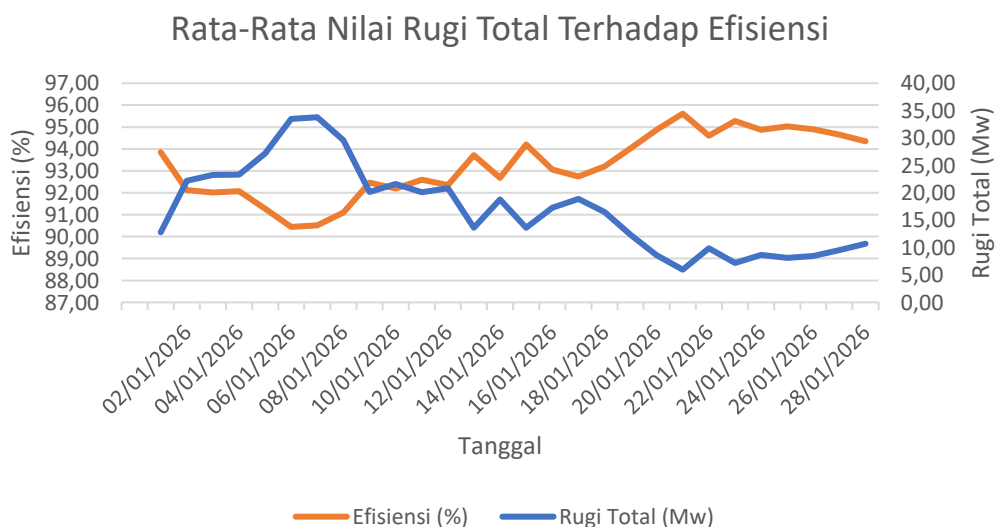
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

karena sebagian daya hilang sebagai rugi-rugi (terutama rugi tembaga), sehingga daya yang dikonversi menjadi output menjadi lebih kecil. Grafik menunjukkan bahwa kenaikan temperatur diikuti penurunan efisiensi. Hal ini terjadi karena temperatur yang lebih tinggi menyebabkan resistansi lilitan meningkat, sehingga rugi daya bertambah dan efisiensi menurun.

4. Grafik Rata-Rata Beban Output, Rugi Total, Dan Temperatur Terhadap Efisiensi Harian Generator Unit 2 Tanggal 1-28 Januari 2026.



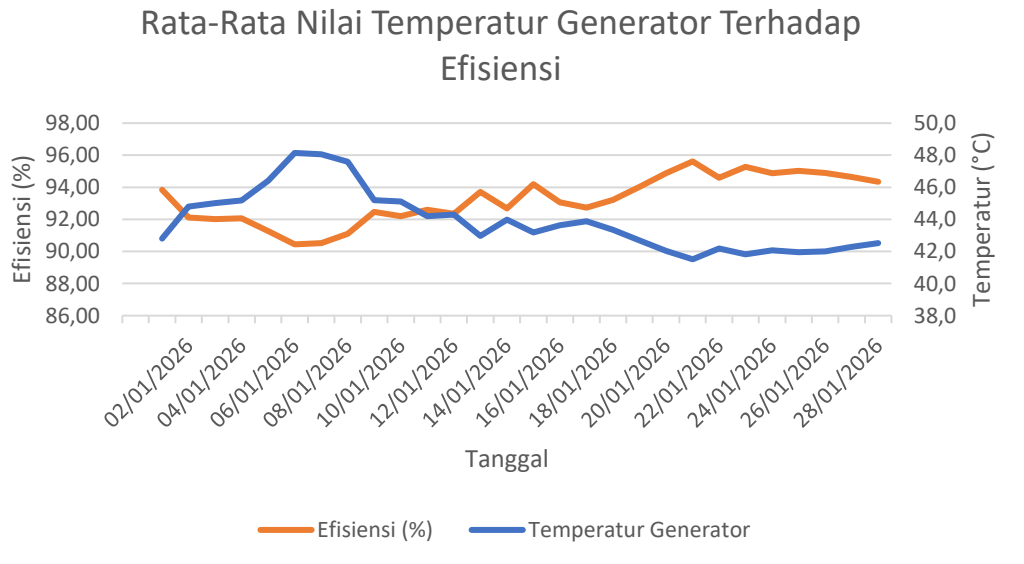
Gambar 4. 7 Grafik Rugi Total Terhadap Efisiensi Generator Unit 2



Gambar 4. 6 Grafik Beban Output Terhadap Efisiensi Generator Unit 2

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 4. 8 Grafik Nilai Temperatur Terhadap Efisiensi Generator Unit 2

Berdasarkan hasil pengolahan data yang telah dilakukan pada Gambar 4.6 sampai 4.8, diperoleh bahwa kinerja generator sangat dipengaruhi oleh variasi beban operasi. Selama periode pengamatan, beban output generator mengalami fluktuasi yang signifikan, yang diikuti oleh perubahan pada parameter lain seperti rugi-rugi daya, efisiensi, dan temperatur. Peningkatan beban output cenderung menyebabkan kenaikan rugi-rugi daya, terutama rugi tembaga yang dipengaruhi oleh kuadrat arus. Hal ini mengakibatkan sebagian daya yang dihasilkan tidak dapat dimanfaatkan secara optimal. Selain itu, kenaikan beban juga berdampak pada meningkatnya temperatur generator akibat pemanasan pada lilitan stator. Temperatur yang lebih tinggi menyebabkan resistansi meningkat, sehingga memperbesar rugi-rugi daya.

Dari sisi efisiensi, generator menunjukkan performa yang relatif baik dengan nilai efisiensi yang stabil. Namun, terdapat kecenderungan bahwa efisiensi menurun pada saat beban, rugi-rugi daya, dan temperatur meningkat. Sebaliknya, efisiensi optimal terjadi pada kondisi operasi yang stabil dengan beban yang tidak terlalu tinggi, sehingga rugi-rugi daya dan temperatur dapat diminimalkan. Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

hubungan yang erat antara beban, rugi-rugi daya, temperatur, dan efisiensi generator. Peningkatan beban akan diikuti oleh kenaikan rugi-rugi dan temperatur, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan efisiensi. Meskipun demikian, selama periode pengamatan generator masih beroperasi dalam kondisi yang baik dan efisien.

4.5 Hasil Statistik Perhitungan Rugi-Rugi Daya Terhadap Efisiensi Dan Temperatur

Berdasarkan hasil rata-rata efisiensi generator pada table 4.6 dan 4.7, efisiensi yang paling stabil terdapat pada generator unit 1. Maka dari itu penulis menggunakan data pada unit 1 untuk dijadikan uji statistika.

Tabel 4. 8 Uji Statistik Generator Unit 1

Model Summary ^b								
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate				
1	0.985 ^a	0,969	0,966	26,04123				
a. Predictors: (Constant), RugiTotal, BebanOutput, Temperatur								
b. Dependent Variable: Efisiensi								
ANOVA ^a								
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.		
1	Regression	514962,933	3	171654,311	253,123	.000 ^b		
	Residual	16275,496	24	678,146				
	Total	531238,429	27					
a. Dependent Variable: Efisiensi								
b. Predictors: (Constant), RugiTotal, BebanOutput, Temperatur								
Coefficients ^a								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	8918,363	446,869		19,957	0,000		
	BebanOutput	0,136	0,056	0,425	2,439	0,022	0,042	23,757
	Temperatur	1,503	1,244	0,230	1,208	0,239	0,035	28,508
	RugiTotal	-0,355	0,022	-1,556	-15,955	0,000	0,134	7,451
a. Dependent Variable: Efisiensi								

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Berdasarkan hasil analisis regresi linear berganda, variabel Beban Output dan Rugi Total terbukti berpengaruh signifikan terhadap efisiensi Unit 1, sedangkan Temperatur tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. Beban Output memiliki hubungan positif dengan efisiensi, yang berarti peningkatan beban operasi cenderung meningkatkan efisiensi unit. Hal ini terjadi karena sistem bekerja lebih optimal saat mendekati kapasitas desain, sehingga pemanfaatan energi menjadi lebih efektif dan proporsi rugi-rugi relatif menurun. Sebaliknya, Rugi Total berpengaruh negatif dan signifikan terhadap efisiensi, sehingga semakin besar rugi energi, efisiensi akan semakin menurun. Hal ini sejalan dengan konsep dasar efisiensi energi.

Berdasarkan koefisien beta terstandarisasi, Rugi Total merupakan variabel paling dominan dalam mempengaruhi efisiensi, sehingga pengendalian rugi energi menjadi faktor utama dalam peningkatan kinerja unit. Sementara itu, Temperatur tidak signifikan, kemungkinan karena variasinya kecil atau telah terwakili oleh variabel lain. Nilai koefisien determinasi yang tinggi menunjukkan model mampu menjelaskan variasi efisiensi dengan baik. Secara keseluruhan, efisiensi unit sangat dipengaruhi oleh faktor operasional, khususnya beban output dan rugi total.