

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pembangkit Listrik tenaga air merupakan suatu pembangkit listrik yang memanfaatkan energi potensial dan kinetik air untuk menghasilkan energi Listrik. Prinsip kerja pembangkit ini adalah, air yang telah di tampung pada bendungan atau waduk, di alirkan melalui pipa penstock, aliran air dari penstock ini akan memutar turbin yang telah di kopel dengan generator. Putaran generator inilah yang akan menghasilkan energi Listrik. [4]

Pada PLTA Orya Genyem unit #1 energi Listrik atau daya Listrik yang di hasilkan adalah sebesar 10 MW dengan tegangan keluaran 10,5 kV. Dari tegangan keluar ini, akan di salurkan melalui trafo Step Up untuk di naikkan tegangannya menjadi 70 kV dan di salurkan melalui jaringan SUTT. [5]

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan salah satu jenis pembangkit energi terbarukan yang memanfaatkan energi potensial dan energi kinetik air untuk menghasilkan energi listrik. Prinsip dasar PLTA adalah mengubah energi air yang berada pada ketinggian tertentu menjadi energi mekanik melalui turbin, kemudian dikonversi menjadi energi listrik menggunakan generator. Sistem ini tergolong pembangkit dengan efisiensi konversi energi yang relatif tinggi dibandingkan dengan pembangkit berbahan bakar fosil.

Secara umum, sumber energi pada PLTA berasal dari aliran sungai yang dibendung sehingga membentuk waduk. Air yang tertampung memiliki energi potensial akibat perbedaan tinggi (head). Ketika pintu air dibuka, air mengalir melalui pipa pesat (*penstock*) menuju turbin. Energi kinetik aliran air tersebut memutar sudu turbin, sehingga poros turbin berputar dan menggerakkan rotor generator untuk menghasilkan energi listrik dalam bentuk arus bolak-balik (AC).

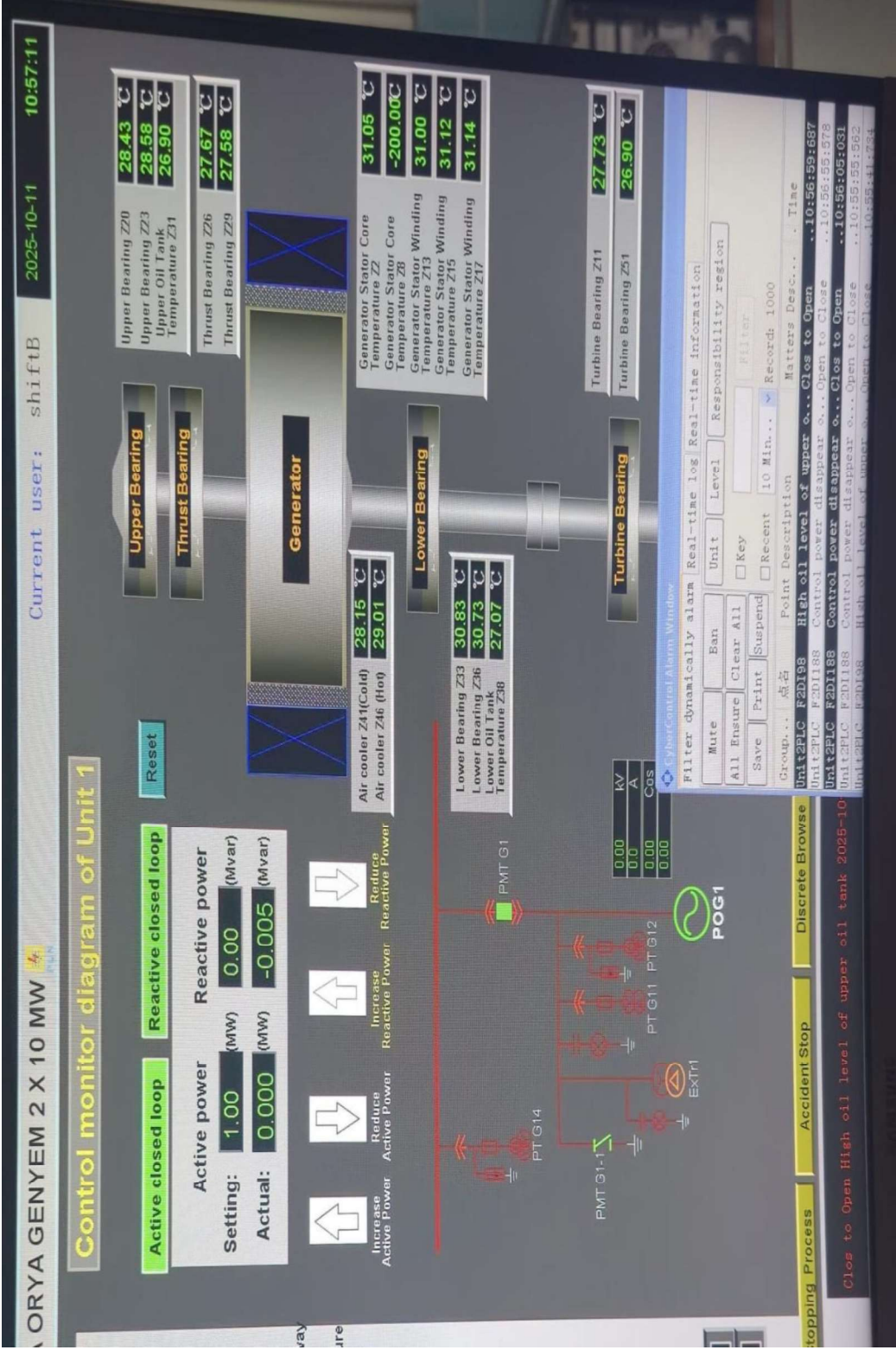
Komponen utama PLTA meliputi bendungan, waduk, pipa pesat, turbin, generator, serta sistem transmisi dan distribusi. Bendungan berfungsi untuk mengatur debit air dan menjaga kestabilan suplai energi. Turbin berperan sebagai pengubah energi kinetik menjadi energi mekanik, sedangkan generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Jenis turbin yang digunakan umumnya disesuaikan dengan karakteristik debit dan tinggi jatuh air, seperti turbin Kaplan, Francis, atau Pelton.

Berdasarkan kapasitas dan sistem operasinya, PLTA dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, antara lain PLTA skala besar, mini hidro, dan mikro hidro. PLTA skala besar biasanya memiliki kapasitas di atas 10 MW dan digunakan untuk memasok sistem interkoneksi. Sementara itu, mini dan mikro hidro banyak dimanfaatkan untuk sistem kelistrikan lokal atau daerah terpencil karena konstruksinya lebih sederhana dan biaya operasionalnya relatif rendah.

Dari sisi keunggulan, PLTA memiliki emisi gas rumah kaca yang sangat rendah selama proses operasional, serta biaya bahan bakar yang hampir tidak ada karena memanfaatkan sumber daya alam yang berkelanjutan. Selain itu, umur operasional PLTA cenderung panjang dan mampu beroperasi secara kontinu selama ketersediaan air mencukupi. Faktor ini menjadikan PLTA sebagai salah satu tulang punggung penyediaan energi listrik di berbagai negara, termasuk Indonesia.

Namun demikian, pembangunan PLTA juga memiliki tantangan dan dampak yang perlu diperhatikan. Pembuatan bendungan skala besar dapat memengaruhi ekosistem sungai, mengubah pola aliran alami, serta berpotensi menimbulkan dampak sosial terhadap masyarakat sekitar. Oleh karena itu, studi kelayakan teknis, lingkungan, dan sosial harus dilakukan secara komprehensif sebelum proyek pembangunan dilaksanakan.

Dalam konteks sistem tenaga listrik nasional, PLTA berperan penting dalam menjaga kestabilan sistem karena mampu merespons perubahan beban dengan relatif cepat dibandingkan pembangkit termal. Karakteristik ini membuat PLTA cocok digunakan sebagai pembangkit beban dasar maupun pengatur beban puncak, tergantung pada strategi pengoperasian sistem. Dengan pengelolaan yang tepat, PLTA dapat menjadi solusi energi yang andal, efisien, dan berkelanjutan dalam jangka panjang.



Gambar 2.1 Control Monitor Diagram PLTA Orya Genyem

2.1.2 Generator

Generator adalah mesin listrik yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Generator pada PLTA ini di pasang secara vertical dan di kopel dengan turbin air agar dapat berputar dan menghasilkan energi Listrik. [6]

Generator merupakan mesin listrik yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), generator dipasang secara vertikal atau horizontal dan dikopel langsung dengan turbin air melalui poros utama. Energi mekanik yang dihasilkan dari putaran turbin akibat aliran air akan diteruskan ke rotor generator sehingga menghasilkan energi listrik dalam bentuk arus bolak-balik (AC).

Secara konstruksi, generator sinkron pada PLTA terdiri atas dua bagian utama, yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian diam yang berfungsi sebagai tempat lilitan jangkar (armature winding) dan menjadi lokasi terinduksinya gaya gerak listrik (GGL). Sementara itu, rotor merupakan bagian berputar yang menghasilkan medan magnet, baik melalui sistem eksitasi arus searah (DC) maupun menggunakan magnet permanen pada kapasitas tertentu. Interaksi antara medan magnet rotor dan lilitan stator inilah yang menimbulkan tegangan keluaran.

Prinsip kerja generator didasarkan pada Hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik, yaitu apabila suatu konduktor dipotong oleh garis-garis gaya magnet atau terjadi perubahan fluks magnet pada suatu rangkaian, maka akan timbul gaya gerak listrik pada konduktor tersebut. Pada generator PLTA, perubahan fluks magnet terjadi karena rotor yang bermedan magnet berputar di dalam stator. Kecepatan putaran rotor akan menentukan frekuensi tegangan keluaran yang dihasilkan, sehingga kestabilan putaran sangat penting untuk menjaga frekuensi sistem, umumnya sebesar 50 Hz di Indonesia.



Gambar 2.2 Stator Generator Unit #1 PLTA Orya Genyem
(Dokumentasi Pribadi, Maret 2025)

Generator yang digunakan pada PLTA umumnya adalah generator sinkron. Disebut sinkron karena kecepatan putar rotor selalu sebanding dengan frekuensi sistem listrik yang dihasilkan. Hubungan antara kecepatan sinkron (N_s), frekuensi (f), dan jumlah kutub (P) dinyatakan dengan persamaan $N_s = 120f / P$. Oleh karena itu, pemilihan jumlah kutub dan desain rotor disesuaikan dengan kecepatan turbin agar frekuensi keluaran tetap stabil sesuai standar sistem tenaga listrik.

Selain komponen utama, generator juga dilengkapi dengan sistem eksitasi yang berfungsi untuk mengatur besar kecilnya arus medan pada rotor. Sistem eksitasi ini berperan penting dalam mengendalikan tegangan keluaran generator. Dengan mengatur arus eksitasi, tegangan terminal dapat dipertahankan tetap stabil meskipun terjadi perubahan beban pada sistem. Dalam praktiknya, sistem eksitasi modern telah menggunakan Automatic Voltage Regulator (AVR) untuk menjaga kestabilan tegangan secara otomatis.

Dari sisi proteksi, generator dilengkapi dengan berbagai sistem pengaman seperti proteksi arus lebih, diferensial, gangguan tanah, serta proteksi terhadap kenaikan suhu berlebih. Hal ini penting karena generator merupakan komponen vital dengan nilai investasi yang tinggi. Gangguan kecil yang tidak terdeteksi dapat menyebabkan kerusakan serius pada

lilitan stator maupun rotor, sehingga sistem monitoring suhu, getaran, dan arus menjadi bagian integral dalam pengoperasian PLTA.

Dalam konteks operasional, generator pada PLTA memiliki karakteristik respons yang relatif cepat terhadap perubahan beban dibandingkan pembangkit berbasis termal. Kemampuan ini menjadikan PLTA efektif dalam menjaga kestabilan frekuensi sistem tenaga listrik. Dengan desain yang tepat, pemeliharaan rutin, dan sistem kontrol yang andal, generator mampu beroperasi dalam jangka waktu panjang dengan tingkat efisiensi dan keandalan yang tinggi.

2.1.3 Bagian-bagian Generator

a. Stator

Stator adalah bagian yang diam (statis) dari generator listrik yang berfungsi menghasilkan atau menerima medan magnet dan menginduksi tegangan listrik ketika rotor berputar di dalamnya. Stator merupakan rumah dari generator yang berisikan belitan atau kumparan tembaga yang menghasilkan medan magnet. [7]

Inti stator terbuat dari lembaran baja silikon tipis yang disusun secara berlapis (laminasi). Tujuan dari pelapisan ini adalah untuk mengurangi rugi-rugi arus eddy (*eddy current losses*) yang timbul akibat perubahan fluks magnet. Dengan penggunaan material baja silikon yang memiliki permeabilitas magnetik tinggi, proses induksi dapat berlangsung secara efisien serta meminimalkan kerugian energi dalam bentuk panas. Struktur laminasi ini menjadi salah satu faktor penting dalam meningkatkan efisiensi generator secara keseluruhan.

Pada bagian dalam inti stator terdapat alur atau slot yang digunakan untuk menempatkan kumparan tembaga. Kumparan tersebut disusun dengan konfigurasi tertentu sesuai desain jumlah kutub dan kapasitas generator. Ketika rotor berputar dan menghasilkan medan magnet yang berubah-ubah terhadap lilitan stator, maka akan timbul gaya gerak listrik (GGL) pada kumparan tersebut. Besarnya tegangan yang dihasilkan dipengaruhi oleh jumlah lilitan, kecepatan putar rotor, serta kuat medan magnet yang terbentuk.



Gambar 2.3 Kumparan tembaga pada stator.

Kumparan stator umumnya menggunakan konduktor tembaga karena memiliki konduktivitas listrik yang tinggi dan tahan terhadap kenaikan suhu operasional. Untuk menjaga keandalan sistem, setiap lilitan dilapisi dengan bahan isolasi khusus yang mampu menahan tegangan tinggi dan temperatur kerja. Sistem isolasi ini sangat krusial karena kegagalan isolasi dapat menyebabkan hubung singkat antar lilitan (*inter-turn short circuit*) yang berpotensi merusak generator.

Selain menghasilkan tegangan listrik, stator juga berperan dalam mendukung sistem pendinginan generator. Pada generator berkapasitas besar seperti di PLTA, panas yang timbul akibat rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi besi harus dikendalikan agar tidak melebihi batas temperatur yang diizinkan. Oleh karena itu, stator biasanya dilengkapi dengan sistem pendinginan berupa aliran udara, hidrogen, atau air, tergantung pada kapasitas dan desain generator. Sistem pendinginan ini bertujuan untuk menjaga kestabilan suhu dan memperpanjang umur operasional peralatan.

Dalam aspek proteksi dan pemeliharaan, kondisi stator harus dipantau secara berkala melalui pengujian tahanan isolasi, pengukuran temperatur, serta inspeksi visual terhadap

kondisi kumparan. Pengujian seperti *insulation resistance test* dan *polarization index* sering dilakukan untuk memastikan kualitas isolasi masih dalam batas standar. Perawatan yang tepat akan mencegah terjadinya degradasi isolasi yang dapat menyebabkan gangguan pada sistem pembangkitan.

Dengan konstruksi yang kokoh dan sistem isolasi yang baik, stator mampu beroperasi dalam jangka waktu yang panjang dengan tingkat keandalan tinggi. Sebagai komponen tempat terjadinya pembangkitan tegangan listrik, peran stator sangat vital dalam menentukan kualitas dan kestabilan energi listrik yang dihasilkan oleh generator. Oleh karena itu, desain, material, serta sistem pendinginan dan proteksi stator menjadi faktor utama dalam menjaga performa pembangkit listrik tenaga air secara keseluruhan.

b. Rotor

Rotor adalah bagian yang berputar dari generator yang berfungsi menghasilkan medan magnet. Rotor ini dapat berputar karena di kopel dengan turbin yang di gerakkan oleh kekuatan air. Rotor pada PLTA Orya Genyem memiliki 4 Pasang kutub. [7]

Secara konstruksi, rotor generator sinkron umumnya terdiri atas poros utama, inti rotor, kutub magnet, serta sistem eksitasi. Pada PLTA berkecepatan rendah seperti yang menggunakan turbin Francis atau Kaplan, rotor biasanya memiliki jumlah kutub yang relatif banyak untuk menyesuaikan dengan kecepatan putar turbin agar tetap menghasilkan frekuensi 50 Hz. Sebagaimana pada PLTA Orya Genyem, rotor dilengkapi dengan empat pasang kutub, yang dirancang sesuai dengan karakteristik sistem dan kapasitas pembangkit.

Kutub-kutub rotor berfungsi sebagai pembangkit medan magnet. Medan magnet ini dihasilkan melalui arus eksitasi searah (DC) yang dialirkan ke lilitan medan rotor. Arus eksitasi tersebut dapat diperoleh dari sistem eksitasi statis maupun eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation system*). Besarnya arus eksitasi sangat menentukan kuat medan magnet yang terbentuk, sehingga secara langsung memengaruhi tegangan keluaran generator.



Gambar 2.4 Rotor pada Generator.

Material rotor dirancang dengan kekuatan mekanis yang tinggi karena harus menahan gaya sentrifugal akibat putaran terus-menerus dalam jangka waktu lama. Inti rotor biasanya terbuat dari baja tempa berkualitas tinggi yang mampu menahan tegangan mekanis dan getaran. Selain itu, sistem keseimbangan (*balancing*) rotor dilakukan secara presisi untuk mencegah getaran berlebih yang dapat merusak bantalan maupun struktur generator.

Dalam operasionalnya, rotor juga dilengkapi dengan sistem pendinginan untuk mengendalikan kenaikan suhu akibat rugi-rugi tembaga pada lilitan medan dan rugi-rugi mekanis. Pendinginan dapat dilakukan melalui sirkulasi udara atau sistem pendinginan khusus tergantung kapasitas generator. Pengendalian temperatur sangat penting untuk menjaga keandalan isolasi lilitan medan rotor serta memperpanjang umur pakai peralatan.

Dari aspek pengendalian sistem tenaga listrik, rotor memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan frekuensi dan tegangan. Perubahan beban pada jaringan akan memengaruhi torsi yang diterima rotor. Oleh karena itu, sistem governor turbin bekerja sama dengan sistem eksitasi untuk menjaga kecepatan putar rotor tetap konstan. Kestabilan ini memastikan frekuensi sistem tetap berada pada nilai nominal yang dipersyaratkan.

Pemeliharaan rotor dilakukan secara berkala melalui pemeriksaan visual, pengujian tahanan lilitan medan, serta pengecekan kondisi bantalan dan sistem eksitasi. Ketidakseimbangan, keausan mekanis, atau degradasi isolasi dapat menyebabkan gangguan serius pada generator. Dengan perawatan yang tepat dan sistem kontrol yang baik, rotor mampu beroperasi secara andal dan stabil dalam mendukung proses pembangkitan energi listrik di PLTA.

2.1.4 Syarat Sinkron Pada Generator

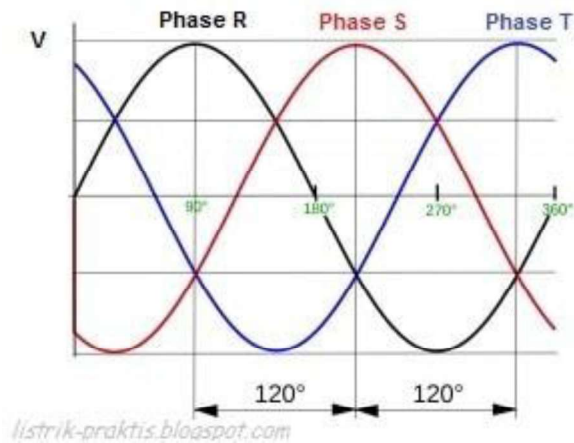
Sinkron Generator pada pembangkit Listrik adalah bergabungnya sistem tenaga Listrik dari sumber dengan jaringan Listrik yang ada diluar (Jaringan Sistem) menuju satu jaringan yang sama atau biasa disebut masuk sistem. Dari sinilah generator dapat menyuplai daya Listrik nya ke pengguna Listrik (Konsumen). [8]

Proses ini merupakan momen yang krusial, karena Ketika sebuah generator akan sinkron ada 4 syarat yang harus terpenuhi. Ketika ada salah satu syarat yang tidak terpenuhi, maka dapat terjadi kegagalan sinkron dan generator tidak dapat bergabung dengan sistem.

Empat syarat sinkron generator yang dimaksud adalah : [9]

a. Urutan Phase (Phase Sequence)

Syarat pertama dari sinkron generator ke sistem (grid) adalah urutan phase antar generator dan grid harus sama. Seperti yang kita ketahui pada generator pembangkit Listrik menggunakan sistem Listrik AC 3 phase dengan urutan penamaan phase yang standar adalah R-S-T Dimana antar phase tersebut mempunyai perbedaan sudut tegangan 120 derajat (deg). Phase R berada 120 deg dengan phase S, phase S berada 120 deg dengan phase T, begitu juga phase T berada 120 deg dengan phase R dan begitulah Seterusnya sehingga urutan phase sering juga dinamakan urutan rotasi phase (Phase Rotation). [10]



Gambar 2.5 Gelombang sinusoidal Phase R-S-T

Pengaturan urutan phase dari sebuah generator harus ditentukan saat perencanaan dan commissioning pertama kali dengan mereferensi pada sistem grid tempat generator nantinya akan disinkron. Jadi jika Langkah ini sudah tepat dilakukan, syarat sinkron poin satu ini selanjutnya seolah-olah diabaikan karena sistem yang sudah terpasang setelah proses commissioning tersebut akan tetap dan sesuai dengan grid, tidak akan berubah urutan phase nya selama tidak ada pekerjaan pemeliharaan yang mengkondisikan sistem jaringan di generator dilepas koneksinya.

b. Tegangan (Voltage Magnitude)

Syarat sinkron generator yang kedua adalah besarnya nilai tegangan harus sama dengan grid. Tegangan yang dimaksud adalah tegangan dari sistem generator yang berhubungan langsung dengan tegangan di grid. Ada beberapa sistem generator yang dilengkapi dengan GCB (Generator Circuit Breaker), pada sistem ini proses sinkron biasanya langsung dilakukan pada GCB tersebut dengan mereferensi nilai tegangan dari grid. Besarnya nilai tegangan di grid akan disesuaikan terlebih dahulu melalui sebuah trafo sehingga memungkinkan antar tegangan generator dan grid bisa sebanding.

Untuk sistem generator lain yang tidak memiliki GCB, besarnya nilai tegangan generator yang akan disinkron dengan grid harus di konversikan terlebih dahulu

melalui trafo agar bisa menyesuaikan dengan besarnya tegangan di grid. Jika tegangan di grid jauh lebih besar dari tegangan generator maka digunakan trafo step up untuk menaikkan output tegangan generator. Sebaliknya jika tegangan grid jauh lebih kecil dari generator maka digunakan trafo step down untuk menurunkan tegangan generator agar sama dengan grid. Pada umumnya tegangan generator jauh lebih kecil dibanding tegangan grid, jadi kebanyakan sebuah generator pada sistem ini akan terinstal satu paket dengan trafo step up. Output dari trafo step up inilah yang jadi referensi besarnya tegangan yang akan dibandingkan dan disinkronkan dengan grid. [11]

c. Frekuensi (Frequency)

Syarat sinkron yang ketiga adalah Frekuensi yang sama antara generator dengan grid. Frekuensi disini adalah frekuensi dari gelombang sinusoidal yang dihasilkan dari generator ataupun yang terdapat pada grid. Besarnya nilai frekuensi di Indonesia adalah 50 Hz. Nilai frekuensi ini adalah representasi dari besarnya nilai putaran generator.

Dengan rumus sebagai berikut :

$$n = \frac{120 \times F}{P}$$

Dimana:

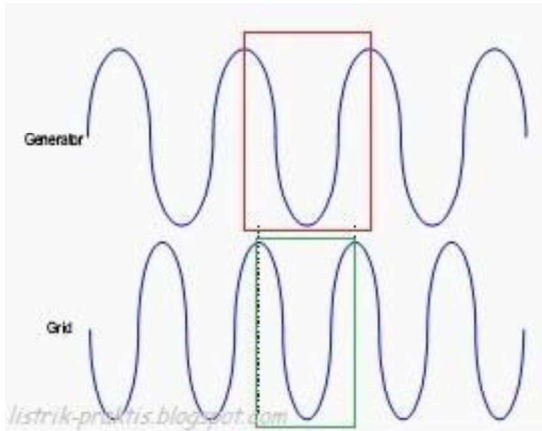
n = Jumlah Putaran Generator (RPM)

F = Frekuensi Generator

P = Jumlah Kutub Generator

Jika sebuah generator memiliki 2 buah kutub maka untuk menghasilkan frekuensi 50 Hz, kita harus mengkondisikan generator berada pada putaran 3000 rpm. Jadi hubungan frekuensi dengan putaran generator adalah berbanding lurus, sehingga

untuk menyesuaikan nilai frekuensi sebuah generator terhadap grid cukup melakukan penyesuaian putaran generator dengan referensi frekuensi di grid.

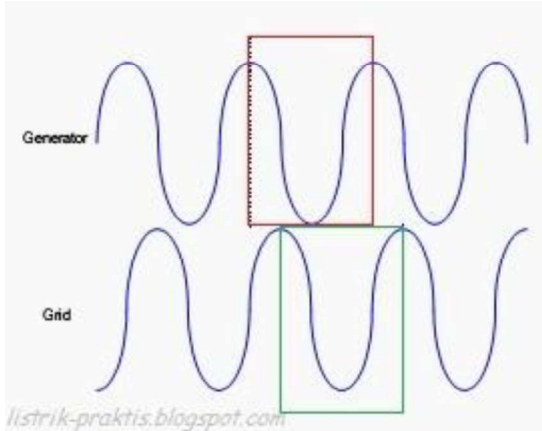


Gambar 2.6 Frekuensi Generator lebih kecil dari grid

Gambar diatas adalah gelombang sinusoidal yang menjelaskan tentang besarnya nilai frekuensi generator dibawah nilai frekuensi dari grid. Gambar diatas juga bisa menjelaskan pada kita bahwa generator pada kondisi tersebut kekurangan putaran rpm nya jika harus menyesuaikan dengan grid. Maka putaran generator harus dinaikan perlahan sampai frekuensi generator sama dengan frekuensi grid. [12]

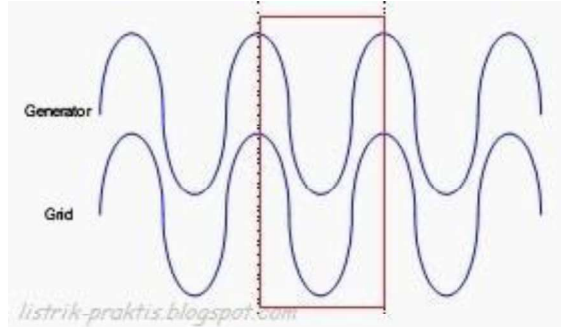
d. Sudut Phase

Syarat sinkron yang keempat adalah generator memiliki sudut sudut phase yang sama dengan grid. Sudut phase ini sebenarnya tidak bisa dilihat dengan mata biasa, tetapi harus menggunakan alat khusus seperti oscilloscope. Tetapi pada perangkat alat sinkron atau synchronoscope yang dilengkapi dengan display gelombang output dari generator ataupun grid bis akita amati.



Gambar 2.7 Frekuensi generator sama dengan grid, tapi berbeda sudut phase

Jika semua syarat sudah terpenuhi tetapi sudut phase masih berbeda, dalam hal ini generator belum bisa diijinkan untuk sinkron, karena jika dipaksakan untuk sinkron akan menyebabkan kerusakan pada generator karena akan terjadi kenaikan arus dan tegangan yang sangat tinggi pada generator. [13]



Gambar 2.8 Frekuensi, tegangan, dan sudut phase generator sudah sama dengan grid

Gambar diatas menunjukkan syarat sinkron telah terpenuhi yaitu nilai tegangan sama (ditunjukkan dari tinggi puncak gelombang yang sama), frekuensi sama (ditunjukkan dari lebar puncak dan lembah pada gelombang yang sama), sudut phase sama (ditunjukkan pada bentuk gelombang dengan posisi sudut naik dan turun yang sama / berhimpit). Sedangkan syarat poin 1 seperti yang sudah dijelaskan diatas bisa diabaikan dengan asumsi generator tersebut

sudah melewati tahap penentuan urutan fasa pada proses commissioning pertama kali. Pada kondisi ini dimana semua syarat sudah terpenuhi, maka proses sinkron akan berjalan lancar tanpa ada resiko kegagalan sinkron atau kerusakan pada sistem dan generator. [14]

2.1.5 Paralel dan sinkron Generator

Paralel dan sinkron generator merupakan metode penggabungan dua atau lebih generator dan sistem di grid secara bersamaan yang dihubungkan secara paralel. Paralel generator ini bertujuan untuk menjaga kontinuitas pelayanan energi Listrik apabila salah satu generator akan di offkan atau diperbaiki untuk memperbesar kapasitas daya yang dihasilkan. [15]

Dalam praktiknya, terdapat beberapa syarat utama yang harus dipenuhi agar proses sinkronisasi dapat dilakukan dengan aman. Pertama, nilai tegangan generator harus mendekati atau sama dengan tegangan sistem. Kedua, frekuensi generator harus sama dengan frekuensi jaringan, yang umumnya sebesar 50 Hz. Ketiga, urutan fasa harus identik agar tidak terjadi perbedaan arah putaran medan magnet. Keempat, sudut fasa harus mendekati nol derajat pada saat pemutusan atau penyambungan saklar. Keempat syarat ini menjadi dasar dalam prosedur sinkronisasi generator.

Cara kerja paralel generator dapat dilakukan secara manual maupun otomatis. Pada sistem paralel otomatis, digunakan peralatan *Automatic Synchronizing* atau *Automatic Synchronizer* yang secara kontinu memantau perbedaan tegangan, frekuensi, dan sudut fasa antara generator dan sistem. Ketika seluruh parameter telah berada dalam batas toleransi yang ditentukan, sistem akan memberikan perintah untuk menutup pemutus tenaga (*circuit breaker*) secara otomatis. Metode ini memiliki tingkat akurasi tinggi dan meminimalkan risiko kesalahan manusia.

Sementara itu, paralel manual dilakukan dengan pengawasan langsung oleh operator pembangkit melalui panel sinkronisasi. Operator akan memantau indikator seperti voltmeter, frekuensi meter, serta *synchroscope* untuk memastikan kesesuaian parameter. Apabila jarum *synchroscope* menunjukkan posisi mendekati nol dan berputar lambat, operator dapat

menutup pemutus tenaga secara manual. Metode ini memerlukan ketelitian dan pengalaman operator karena kesalahan waktu penutupan saklar dapat menyebabkan gangguan pada sistem.

Setelah generator berhasil dihubungkan secara paralel, tahap selanjutnya adalah pembagian beban (*load sharing*). Pembagian beban aktif (kW) diatur melalui pengendalian daya mekanik turbin menggunakan sistem governor, sedangkan pembagian daya reaktif (kVAr) diatur melalui sistem eksitasi generator. Koordinasi antara governor dan sistem eksitasi sangat penting agar setiap generator bekerja dalam batas kapasitas yang aman serta menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi sistem.

Pengoperasian generator secara paralel memberikan fleksibilitas dalam pengelolaan sistem tenaga listrik, terutama pada pembangkit dengan lebih dari satu unit. Sistem ini memungkinkan efisiensi operasional karena unit pembangkit dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban harian. Selain itu, risiko gangguan sistem dapat diminimalkan karena tidak bergantung pada satu sumber pembangkit saja. Dengan prosedur sinkronisasi yang tepat dan sistem kontrol yang andal, pengoperasian paralel generator dapat berjalan aman, stabil, dan sesuai dengan standar operasional yang berlaku.

Cara kerja paralel generator terbagi atas 2 yaitu secara manual dan otomatis.

1. Paralel Otomatis

Paralel generator secara otomatis adalah proses yang menggunakan alat Automatic Synchronizing yang bekerja secara otomatis memonitor perbedaan phase, tegangan, frekuensi dan urutan phase. Apabila semua kondisi telah tercapai alat ini akan memberikan sinyal bahwa saklar untuk paralel dapat dimasukan.

2. Paralel Manual

Paralel Manual adalah proses monitoring secara langsung perbedaan phase, tegangan, frekuensi dan urutan phase pada panel sinkron yang dilakukan oleh operator pembangkit untuk memastikan semua parameter sinkron sudah sesuai dengan SOP yang ada.

2.1.6 Kegagalan Sinkron Pada Generator

Kegagalan sinkron pada generator merupakan kondisi ketika rotor kehilangan keselarasan dengan medan magnet berputar pada stator sehingga generator tidak lagi beroperasi pada kecepatan sinkron. Kondisi ini mengakibatkan ketidakseimbangan antara daya mekanis dan daya listrik, yang dapat menimbulkan osilasi daya (*power swing*), arus berlebih, serta penurunan stabilitas sistem tenaga listrik. [16]

Kegagalan sinkron pada generator ada banyak jenis, tetapi secara umum, kegagalan sinkron dapat diklasifikasikan menjadi 3 jenis, yaitu :

1. Hubungan Singkat 3 (Tiga) Phase

Hubungan singkat 3 phase adalah terjadinya arus lebih pada stator yang dimaksud adalah arus lebih yang timbul akibat terjadinya hubungan singkat tiga phase. Gangguan ini akan menimbulkan loncatan bunga api dengan suhu tinggi yang akan melelehkan belitan dengan resiko terjadinya kebakaran jika isolasi tidak terbuat dari bahan yang anti api (non flammable).

2. Kehilangan Medan Penguat (Loss of Excitation)

Yaitu hilangnya medan penguat akan membuat putaran mesin naik dan berfungsi sebagai generator induksi. Kondisi ini akan berakibat terjadi pemanasan pada rotor dan pasak (slot wedges), akibat arus induksi yang bersirkulasi pada rotor.

Terjadinya Kehilangan medan penguat dapat disebabkan oleh :

1. Jatuhnya (trip) saklar penguat
2. Hubungan singkat pada belitan penguat.
3. Kerusakan kontak-kontak sikat arang pada sisi penguat
4. Kerusakan pada sistem AVR

3. Tegangan Lebih (Over Voltage)

Tegangan yang berlebihan melampaui batas maksimum yang diijinkan dapat berakibat tembusnya (Breakdown) desain isolasi yang akhirnya akan menimbulkan hubungan singkat antara belitan. Tegangan lebih dapat dimungkinkan oleh mesin putaran lebih (Overspeed) atau kerusakan pada pengatur tegangan otomatis

2.1.7 Variasi Perubahan Beban

Perubahan beban pada operasi parallel dan sinkron generator disebabkan oleh beberapa factor diantaranya : [16]

1. Frekuensi operasinya yang tidak normal

Perubahan frekuensi keluar dari batas-batas normal di sistem dapat berakibat ketidakstabilan pada turbin generator. Perubahan frekuensi sistem dapat dimungkinkan oleh tripnya unit-unit pembangkit atau gangguan pada sistem di grid. [17]

2. Lepas sinkron (Loss of Synchron)

Adanya gangguan disistem akibat perubahan beban mendadak, switching, hubung singkat dan peristiwa yang cukup besar akan menimbulkan ketidakstabilan sistem. Lepas sinkron terjadi ketika rotor generator tidak lagi berputar selaras dengan medan magnet sistem. Kondisi ini umumnya disebabkan oleh gangguan besar seperti hubung singkat, perubahan beban mendadak, atau kegagalan sistem eksitasi. Jika tidak segera ditangani, lepas sinkron dapat menyebabkan osilasi daya dan kerusakan mekanis pada poros generator.

3. Arus beban kumparan tidak seimbang

Pembebanan yang tidak seimbang pada sistem atau adanya gangguan satu phase dan dua phase pada sistem yang menyebabkan beban generator tidak seimbang dan menimbulkan arus urutan negatif. [17]

4. Perubahan Beban Mendadak (*Sudden Load Change*)

5. Perubahan beban yang terjadi secara cepat, misalnya akibat penyalaan atau pemadaman beban besar, dapat menimbulkan fluktuasi tegangan dan frekuensi. Sistem governor dan eksitasi harus merespons dengan cepat untuk menjaga kestabilan

sistem. Respons yang lambat dapat menyebabkan deviasi parameter di luar batas toleransi.

6. Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan

Gangguan hubung singkat satu fasa, dua fasa, atau tiga fasa pada sistem transmisi maupun distribusi dapat menyebabkan lonjakan arus dan penurunan tegangan secara drastis. Gangguan ini memengaruhi pembagian beban antar generator dalam sistem paralel serta dapat memicu pelepasan unit pembangkit dari sistem.

7. Fluktuasi Daya Reaktif

Perubahan kebutuhan daya reaktif akibat variasi beban induktif atau kapasitif di jaringan dapat memengaruhi tegangan sistem. Jika tidak dikendalikan dengan baik melalui sistem eksitasi atau peralatan kompensasi daya reaktif, tegangan dapat mengalami kenaikan atau penurunan signifikan.

8. Pengaruh Sistem Proteksi dan Switching

Proses switching peralatan, baik pada sisi pembangkit maupun jaringan, dapat menyebabkan perubahan konfigurasi sistem yang berdampak pada distribusi beban. Aktivasi sistem proteksi akibat gangguan juga dapat menyebabkan pelepasan sebagian beban atau unit pembangkit dari sistem.

9. Variasi Pola Konsumsi Beban Harian

Beban sistem tenaga listrik umumnya mengikuti pola harian, mingguan, dan musiman. Beban puncak biasanya terjadi pada waktu tertentu sesuai karakteristik konsumsi pelanggan. Variasi ini mengharuskan pembangkit melakukan penyesuaian daya secara kontinu agar keseimbangan sistem tetap terjaga.

2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurna, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Dalam jurnal yang berjudul “Analisis Head Losses pada Penstock Unit III di Perum Jasa Tirta II Unit Jasa Pembangkitan PLTA Ir. H. Djuanda”, Eko Sulistiyo, Utami Wahyuningsih, dan M. Arif Rahman Sutisna (2018) membahas fenomena kerugian energi (head losses) yang terjadi pada sistem pipa pesat (penstock) PLTA .Penelitian ini meneliti dua jenis rugi-rugi energi, yaitu head losses mayor akibat gesekan antara fluida dengan dinding pipa dan head losses minor akibat adanya belokan dan sambungan pipa. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan aliran air, semakin besar nilai head losses dan berbanding terbalik dengan efisiensi penstock. Pada kecepatan aliran 5 m/s dan temperatur air 24 °C, total head losses tercatat sebesar 0,605 m dengan efisiensi penstock mencapai 99,21 %. Sebaliknya, pada kecepatan 1 m/s efisiensi meningkat hingga 99,97 %. Penelitian ini menegaskan bahwa kerugian energi dalam sistem aliran air secara langsung memengaruhi daya masuk turbin dan menurunkan efisiensi keseluruhan PLTA. Relevansinya terhadap penelitian ini terletak pada kesamaan konteks sistem pembangkitan air, yaitu peran komponen mekanis dan hidrolis dalam menjaga kestabilan dan efisiensi operasi generator sinkron. Studi ini menjadi landasan penting untuk memahami bagaimana variabel aliran fluida dan kerugian energi dapat berdampak terhadap keandalan sistem pembangkit listrik tenaga air. [18]
2. Penelitian yang dilakukan oleh Rakha Syammary, Hendri, dan Lukfianto (2020) dengan judul “Analisis Efisiensi Turbin Gas Tipe V94.2 Sebelum dan Sesudah Minor Inspection pada Blok 4 Unit 3 PLTGU Muara Tawar” berfokus pada peningkatan efisiensi sistem pembangkit melalui kegiatan minor inspection pada turbin gas. Penelitian ini menggunakan metode perhitungan termodinamika berdasarkan siklus Brayton untuk membandingkan kinerja turbin sebelum dan sesudah dilakukan inspeksi. Dari hasil perhitungan, efisiensi termal mengalami peningkatan sebesar 0,70 %,

efisiensi kompresor naik 0,56 %, efisiensi ruang bakar meningkat 0,27 %, dan efisiensi turbin naik 1,35 %. Kegiatan inspeksi terbukti menurunkan heat rate turbin sebesar 216,61 kJ/kWh, yang menunjukkan peningkatan efisiensi energi. Penelitian ini menegaskan pentingnya pemeliharaan preventif dan prediktif dalam menjaga performa unit pembangkit, khususnya pada komponen turbin dan generator yang bekerja pada temperatur tinggi. Relevansinya terhadap topik tugas akhir ini terletak pada aspek evaluasi efisiensi sistem pembangkit dan kaitannya dengan keandalan operasi generator sinkron. Peningkatan efisiensi setelah inspeksi menunjukkan bahwa kondisi mekanis dan elektrik generator sangat bergantung pada stabilitas termal dan sinkronisasi sistem selama proses operasi. [19]

3. Penelitian yang dilakukan oleh Iqbal Tara Sukmana, Arlenny, dan Elvira (2023) berjudul “Studi Karakteristik Generator Sinkron terhadap Perubahan Beban di PLTG Mobile Power Plant Balai Pungut” membahas pengaruh variasi beban terhadap kinerja generator sinkron tiga fasa pada sistem pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) Balai Pungut. Penelitian ini menggunakan data log sheet operasional harian dari bulan Februari dan Maret 2021 untuk menganalisis hubungan antara beban, arus eksitasi, arus jangkar, dan efisiensi generator. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kenaikan beban mengakibatkan peningkatan arus eksitasi dan arus jangkar secara proporsional. Efisiensi generator mengalami fluktuasi antara 75% hingga 86%, dengan nilai tertinggi pada saat beban puncak sebesar 24,7 MW. Penelitian ini menegaskan bahwa perubahan beban memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan kerja generator sinkron, khususnya terhadap parameter tegangan keluaran dan efisiensi. Relevansinya terhadap penelitian ini adalah bahwa gangguan pada sinkronisasi generator dapat berawal dari ketidakseimbangan beban dan respon eksitasi yang tidak stabil. Dengan demikian, studi ini memberikan dasar empiris penting untuk memahami hubungan antara dinamika beban dan kestabilan sinkron generator dalam sistem pembangkit modern. [3]
4. Penelitian yang dilakukan oleh Rian Manangka, Glanny C. Mangindaan, dan Hans Tumaliang (2022) dengan judul “Analisa Pengaruh Perubahan Beban terhadap

Efisiensi Generator Sinkron 3 Fasa di PLTP Lahendong Unit 3” membahas hubungan antara variasi beban dan efisiensi kerja generator sinkron pada pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) Lahendong Unit 3 di Tomohon, Sulawesi Utara. Penelitian ini dilakukan dengan pengumpulan data operasi selama satu bulan, kemudian dianalisis menggunakan persamaan perbandingan daya keluaran dan masukan generator. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa beban terendah sebesar 12 MW menghasilkan efisiensi 56%, sedangkan beban tertinggi sebesar 19 MW mencapai efisiensi 88%. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan beban sejalan dengan peningkatan efisiensi generator, hingga batas tertentu di mana rugi-rugi mekanik dan panas mulai signifikan. Peneliti juga menemukan bahwa rugi-rugi terbesar berasal dari panas pada lilitan (winding losses), rugi-rugi inti (core losses), dan rugi-rugi mekanik akibat gesekan udara pada rotor yang berputar. [20]

5. Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Hafiz F. I. Sitorus, Andik Bintoro, Asran, dan Fetty Zulyanti (2022) berjudul “Analisis Pengaruh Perubahan Beban terhadap Karakteristik Generator di PLTMGG Sumbagut 2 Peaker 250 MW”, membahas respon dinamis generator sinkron terhadap variasi beban dan gangguan transien pada sistem pembangkit listrik tenaga mesin gas dan gas (PLTMGG) Sumbagut 2 Peaker. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6 untuk mensimulasikan tiga kondisi utama, yaitu load ramp disturbance, loss of load, dan loss of excitation. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi load ramp sebesar 10% selama 2 detik, kecepatan generator turun hingga 80% akibat lonjakan daya yang tiba-tiba. Pada skenario loss of load, seluruh parameter generator mengalami collapse dan gagal kembali ke keadaan stabil, sedangkan pada loss of excitation salah satu generator menaikkan arus eksitasi hingga 1,8 pu untuk menjaga kontinuitas suplai daya sistem. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa perubahan beban dan gangguan eksitasi memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan sinkronisasi generator, khususnya terhadap arus eksitasi, kecepatan rotor, dan daya reaktif. Relevansinya terhadap topik tugas akhir ini terletak pada aspek analisis kegagalan sinkron akibat fluktuasi beban dan ketidakseimbangan eksitasi..[1]

Tabel 2.1 Penelitian yang Relevan

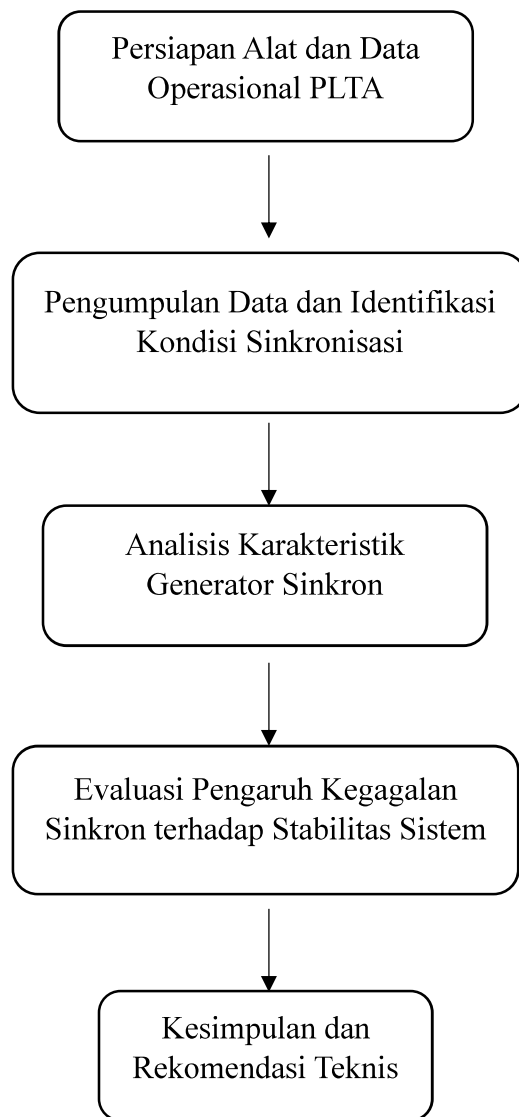
No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	“Analisis Head Losses pada Penstock Unit III di Perum Jasa Tirta II Unit Jasa Pembangkit PLTA Ir. H. Djuanda” (Eko Sulistiyo dkk., 2018)	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah kerugian energi (<i>head losses</i>) yang terjadi pada sistem pipa pesat (penstock) yang memengaruhi efisiensi aliran air menuju turbin.	Penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan perhitungan hidrolis terhadap <i>head losses</i> mayor dan minor menggunakan data kecepatan aliran dan temperatur air.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan aliran air, semakin tinggi <i>head losses</i> yang terjadi dan efisiensi penstock menurun. Pada kecepatan 5 m/s diperoleh total <i>head losses</i> 0,605 m dan efisiensi 99,21 %.	Penelitian ini menekankan hubungan <i>head losses</i> dengan efisiensi hidrolis, namun belum meninjau dampak kehilangan energi ini terhadap kestabilan sinkronisasi generator pada sistem pembangkitan PLTA.
2.	“Analisis Efisiensi Turbin Gas Tipe V94.2 Sebelum dan Sesudah	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah penurunan efisiensi turbin gas akibat	Penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan perhitungan	Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi termal meningkat sebesar 0,70%, efisiensi	Penelitian ini fokus pada peningkatan efisiensi pascaperawatan mekanis, namun belum

	Minor Inspection pada Blok 4 Unit 3 PLTGU Muara Tawar” (Rakha Syammary dkk., 2020)	akumulasi kotoran dan penurunan kinerja komponen sebelum dilakukan <i>minor inspection</i> .	termodinamika pada siklus Brayton, membandingkan efisiensi sebelum dan sesudah perawatan (<i>minor inspection</i>).	kompresor naik 0,56%, efisiensi ruang bakar meningkat 0,27%, dan efisiensi turbin naik 1,35% setelah dilakukan <i>minor inspection</i> .	meninjau pengaruh langsung perubahan efisiensi tersebut terhadap kestabilan sinkronisasi dan respon dinamis generator sinkron.
3.	“Studi Karakteristik Generator Sinkron terhadap Perubahan Beban di PLTG Mobile Power Plant Balai Pungut” (Iqbal Tara Sukmana dkk., 2023)	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah fluktuasi beban yang menyebabkan perubahan arus eksitasi, arus jangkar, serta penurunan efisiensi generator sinkron.	Penelitian menggunakan metode observasi lapangan dengan pengambilan data <i>log sheet</i> operasi harian selama dua bulan, kemudian dianalisis hubungan antara beban,	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan beban menyebabkan peningkatan arus eksitasi dan arus jangkar secara proporsional, dengan efisiensi generator berkisar antara 75%–86%, dan nilai tertinggi	Penelitian ini menyoroti hubungan perubahan beban dengan efisiensi generator, namun belum membahas dampak kestabilan sinkronisasi dan potensi <i>loss of synchronism</i>

			arus eksitasi, arus jangkar, dan efisiensi generator.	pada beban puncak 24,7 MW.	akibat perubahan beban yang ekstrem.
4.	“Analisa Pengaruh Perubahan Beban terhadap Efisiensi Generator Sinkron 3 Fasa di PLTP Lahendong Unit 3” (Rian Manangka dkk., 2022)	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah penurunan efisiensi generator sinkron akibat perubahan beban dan munculnya rugi-rugi mekanik serta panas yang memengaruhi kinerja sistem pembangkitan.	Penelitian dilakukan menggunakan metode analisis kuantitatif dengan pengumpulan data operasi selama satu bulan di PLTP Lahendong Unit 3, kemudian dihitung efisiensi generator berdasarkan perbandingan daya keluaran dan masukan.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada beban 12 MW efisiensi generator mencapai 56%, sedangkan pada beban 19 MW efisiensi meningkat hingga 88%. Kenaikan efisiensi seiring peningkatan beban menunjukkan adanya hubungan langsung antara kestabilan beban dan performa generator.	Penelitian ini hanya berfokus pada hubungan beban dan efisiensi tanpa menganalisis efek perubahan eksitasi atau respon sinkronisasi generator terhadap gangguan dinamis pada sistem pembangkitan.

5.	“Analisis Pengaruh Perubahan Beban terhadap Karakteristik Generator di PLTMGG Sumbagut 2 Peaker 250 MW” (Muhammad Hafiz Sitorus dkk., 2022)	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah pengaruh perubahan beban dan gangguan eksitasi terhadap kestabilan karakteristik generator sinkron pada sistem pembangkitan PLTMGG.	Penelitian menggunakan simulasi perangkat lunak ETAP 12.6 untuk menganalisis tiga skenario gangguan, yaitu <i>load ramp</i>, <i>loss of load</i>, dan <i>loss of excitation</i>, guna melihat pengaruhnya terhadap arus eksitasi, kecepatan rotor, dan daya reaktif generator.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada skenario <i>load ramp</i> 10% selama 2 detik, kecepatan generator turun hingga 80%; pada <i>loss of load</i>, seluruh parameter mengalami <i>collapse</i>; sedangkan pada <i>loss of excitation</i>, generator kedua menaikkan arus eksitasi hingga 1,8 pu untuk menjaga kestabilan sistem.	Penelitian ini berhasil memodelkan respon dinamis generator terhadap gangguan eksitasi, namun belum mengkaji secara spesifik penyebab dan mekanisme kegagalan sinkron (loss of synchronism) serta kaitannya dengan sistem proteksi pada pembangkit tenaga air seperti PLTA.
----	--	--	---	--	---

2.3. Kerangka Pemikiran



Gambar 2.9 Kerangka Pemikiran

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, sebelum dilakukan analisis terhadap kegagalan sinkron generator pada Unit #1 PLTA Orya Genyem, diperlukan tahap persiapan alat dan data operasional pembangkit. Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dokumen teknis, parameter generator, serta data hasil monitoring dari sistem eksitasi dan pengukuran tegangan keluaran. Setelah semua persiapan tersebut dilakukan, penulis melanjutkan ke tahap identifikasi kondisi sinkronisasi generator dengan cara meninjau data operasi, hasil pencatatan *log sheet*, serta riwayat kejadian gangguan. Dari hasil identifikasi tersebut diperoleh data perubahan arus eksitasi, frekuensi, dan daya reaktif yang kemudian dianalisis untuk mengetahui karakteristik kerja generator sinkron. Selanjutnya dilakukan evaluasi terhadap pengaruh kegagalan sinkron terhadap kestabilan sistem pembangkitan dan kontinuitas penyaluran daya ke jaringan. Melalui tahapan ini, penulis dapat memahami penyebab, dampak, serta langkah perbaikan yang dapat diterapkan untuk mencegah terulangnya kegagalan sinkron pada PLTA Orya Genyem di masa mendatang.