

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PENGARUH FLUKTUASI PEMBEBANAN TERHADAP EFISIENSI
GENERATOR SINKRON PADA KAPAL *TUG BOAT* DI
PT. WARUNA SHIPYARD INDONESIA**

*Diajukan untuk memenuhi syarat memperoleh
gelar Sarjana Teknik Elektro pada Fakultas
Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera
Utara*

Oleh:

AZRI ADLIH

NPM : 2207220080



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Azri Adlih

NPM : 2207220080

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Fluktuasi Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator Sinkron Pada Kapal Tug Boat di PT. Waruna Shipyards Indonesia

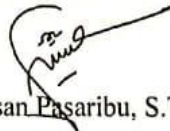
Bidang ilmu : Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 01 Mei 2026

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing



Dr. Faisal Irsan Pasaribu, S.T., S.Pd., M.T.

Dosen Pembimbing I/Penguji



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

Dosen Pembimbing II/Penguji



Benny Oktrialdi, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Elektro

Ketua



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.pd

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Azri Adlih

Tempat/Tgl Lahir : Kisaran, 22 Desember 2002

NPM : 2207220080

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul:

"Analisis Pengaruh Fluktuasi Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator Sinkron Pada Kapal Tug Boat di PT. Waruna Shipyard Indonesia"

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 01 Mei 2026

Saya yang menyatakan,



Azri Adlih

ABSTRAK

Sistem kelistrikan pada kapal tug boat memiliki karakteristik beban yang dinamis karena dipengaruhi oleh berbagai kondisi operasi seperti saat berada di pelabuhan, penarikan, berlayar, dan kondisi khusus. Perubahan kondisi operasi tersebut menyebabkan fluktuasi pembebanan pada generator sinkron yang berdampak pada perubahan arus, rugi-rugi, serta efisiensi generator. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh fluktuasi pembebanan terhadap efisiensi generator sinkron pada kapal tug boat. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode analisis kuantitatif berdasarkan data operasional kapal, meliputi pengukuran arus, tegangan, serta perhitungan daya dan rugi tembaga. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai efisiensi generator pada beberapa kondisi operasi serta mengkaji hubungan antara arus, rugi tembaga, dan efisiensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fluktuasi pembebanan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi generator. Pada kondisi operasi di pelabuhan dengan beban 50.958 W diperoleh efisiensi sebesar 95,72%, sedangkan pada kondisi penarikan dengan beban 64.875 W efisiensi menurun menjadi 93,37%. Pada kondisi berlayar dan kondisi khusus, efisiensi masing-masing sebesar 94,9% dan 94,74%. Selain itu, peningkatan arus generator terbukti menyebabkan kenaikan rugi tembaga secara signifikan sesuai dengan hubungan kuadrat arus. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa fluktuasi pembebanan menyebabkan peningkatan rugi-rugi dan penurunan efisiensi generator. Oleh karena itu, pengelolaan beban dan pengendalian arus menjadi faktor penting dalam menjaga kinerja generator agar tetap optimal.

Kata kunci: generator sinkron, efisiensi, fluktuasi beban, rugi tembaga, kapal tug boat.

ABSTRACT

The electrical system on a tug boat has dynamic load characteristics influenced by various operating conditions such as port operations, towing operations, cruising conditions, and special conditions. These operational variations cause load fluctuations in the synchronous generator, which affect current, losses, and generator efficiency. Therefore, this study aims to analyze the effect of load fluctuations on the efficiency of a synchronous generator on a tug boat. The method used in this study is a quantitative analysis based on operational data from the vessel, including measurements of current and voltage, as well as calculations of power and copper losses. The analysis was carried out by comparing generator efficiency under different operating conditions and examining the relationship between current, copper losses, and efficiency. The results show that load fluctuations have a significant effect on generator efficiency. During port operations with a load of 50,958 W, the efficiency reached 95,72%, while during towing operations with a load of 64,875 W, the efficiency decreased to 93,37%. In cruising and special conditions, the efficiencies were 94,9% and 94,74%, respectively. In addition, an increase in generator current significantly increases copper losses, following the square relationship of current. Based on these results, it can be concluded that load fluctuations lead to increased losses and decreased generator efficiency. Therefore, proper load management and current control are essential to maintain optimal generator performance.

Keywords: synchronous generator, efficiency, load fluctuation, copper losses, tug boat.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayahnya kepada kita semua sehingga saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul **“Analisis Pengaruh Fluktuasi Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator Sinkron Pada Kapal Tug Boat di PT. Waruna Shipyard Indonesia”** dengan baik.

Dimana tugas akhir ini adalah suatu kewajiban yang harus dilaksanakan oleh mahasiswa/i Teknik Elektro dan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Dan hasil tugas akhir ini dilampirkan pada sebuah laporan yang wajib diselesaikan untuk para mahasiswa/i.

Dalam penulisan tugas akhir ini saya menyadari masih banyak kekurangan baik dalam penulisan maupun dalam susunan kalimat yang mana saya mengharapkan saran dari berbagai pihak demi kesempurnaan tugas akhir ini.

Dalam kesempatan yang berbahagia ini, dengan segenap hati. Saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah banyak memberikan motivasi kepada kami didalam penyusunan tugas akhir ini, terutama kepada :

1. Bapak Assoc. Prof. Dr. Faisal Irsan Pasaribu, S.T., S.Pd., M.T. selaku Dosen Pembimbing dan Penguji yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Ibu Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd., selaku Dosen Pembimbing I dan Penguji yang telah banyak memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, sekaligus sebagai Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Dr. Sudirman Lubis, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II dan Penguji yang telah banyak memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

4. Bapak Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu ketekniklistrikan kepada penulis.
6. Orang tua penulis: Hendrianto dan Ayu Sukesih yang telah bersusah payah membesarkan dan membiayai studi penulis serta mendoakan sehingga saya dapat menyelesaikan laporan tugas akhir.
7. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Seluruh rekan-rekan seperjuangan mahasiswa Program Studi Teknik Elektro khususnya kelas B-1 Pagi dan A-3 Malam yang telah banyak membantu dan memberikan semangat kepada penulis dengan memberikan masukan-masukan yang bermanfaat selama proses perkuliahan maupun dalam penulisan Tugas Akhir ini.
9. Seluruh saudara dan saudariku yang namanya tidak dapat saya sebutkan satu persatu, atas dukungan dan bantuan yang diberikan kepada saya.

Akhirnya saya mengharapkan semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi diri pribadi dan para pembaca. Dan kepada Allah SWT, saya serahkan segalanya demi tercapainya keberhasilan yang sepenuhnya.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Medan, 18 April 2026



Azri Adlih

2207220080

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	v
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Metode Penulisan	6
1.7 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Sistem Kelistrikan Kapal <i>Tug Boat</i>	8
2.2 Generator Sinkron	10
2.2.1 Konstruksi Generator Sinkron	13
2.2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron	18
2.3 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron	31
2.4 Diagram Fasor Generator Sinkron	34
2.5 Kurva Kapabilitas Generator Sinkron	36
2.5.1 Batas Daya Generator	38
2.5.2 Batas Arus Stator (<i>Armature Current Limit</i>).....	39
2.5.3 Batas Arus Rotor (<i>Field Current Limit</i>)	40

2.5.4 Batas Pemanasan Ujung Inti Stator (<i>Stator-End Region Heating Limit</i>)	40
2.6 Segitiga Daya	41
2.6.1 Daya Nyata / Aktif (P)	43
2.6.2 Daya Reaktif (Q)	43
2.6.3 Daya Semu	44
2.7 Faktor Daya	44
2.7.1 Faktor Daya Bernilai Satu (<i>Unity</i>)	46
2.7.2 Faktor Daya Mendahului (<i>Leading</i>)	46
2.7.3 Faktor Daya Terbelakang (<i>Lagging</i>)	47
2.8 Regulasi Tegangan	48
2.9 Sistem Eksitasi Generator Sinkron	49
2.9.1 Sistem Eksitasi Menggunakan Sikat (<i>Brush Excitation</i>)	51
2.9.2 Sistem Eksitasi Tanpa Menggunakan Sikat (<i>Brushless Excitation</i>)	53
2.10 Paralel Generator Sinkron	57
2.10.1 Syarat – Syarat Paralel Generator Sinkron	58
2.10.2 Prosedur Umum Paralel Generator Sinkron	60
2.10.3 Prosedur Praktis Paralel Generator Sinkron	61
2.11 Sinkronisasi Generator	62
2.11.1 <i>Synchroscope</i>	64
2.11.2 Voltmeter	65
2.11.3 Frekuensi Meter	66
2.11.4 <i>Automatic Synchronizer</i>	67
2.12 Rugi-rugi Generator Sinkron	68
2.12.1 Rugi-rugi Tembaga atau Listrik	69
2.12.2 Rugi-rugi Inti (<i>Core Losses</i>)	70

2.12.3 Rugi-rugi Mekanik (<i>Mechanical Losses</i>)	72
2.12.4 Rugi-rugi Beban Hilang (<i>Stray Load Losses</i>).....	72
2.13 Efisiensi Generator	73
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	75
3.1 Waktu dan Tempat	75
3.1.1 Waktu.....	75
3.1.2 Tempat	75
3.2 Alat dan Bahan	76
3.2.1 Alat Pengujian.....	76
3.2.2 Bahan Pengujian	76
3.3 Data Penelitian	76
3.3.1 Data Spesifikasi Generator	77
3.3.2 Data Pembebanan Generator	78
3.4 Tahapan Penelitian	79
3.5 Analisa Data	80
3.6 Diagram Alir (<i>Flowchart</i>) Penelitian	81
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	82
4.1 Sistem Pendistribusian Arus Listrik di Kapal	82
4.1.1 Daya Listrik yang Tersedia.....	85
4.1.2 Pengaruh Kondisi Operasi Kapal Terhadap Pembebanan Listrik	86
4.2 Data	89
4.2.1 Data Spesifikasi Generator	89
4.2.2 Data Pengukuran Generator.....	90
4.3 Perhitungan Rugi-rugi Generator	91
4.4 Perhitungan Daya Input Generator (Pin).....	93
4.5 Perhitungan Efisiensi Generator.....	93

4.6 Perhitungan Daya Aktif, Reaktif, dan Semu Pada Generator	100
4.7 Analisa.....	101
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	103
5.1 Kesimpulan.....	103
5.2 Saran.....	104
TINJAUAN PUSTAKA	105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram Dasar Sistem Distribusi Listrik di Kapal	9
Gambar 2. 2 Generator 3 Fasa.....	11
Gambar 2. 3 Konstruksi Generator Sinkron.....	13
Gambar 2. 4 Inti dan Alur pada Stator	14
Gambar 2. 5 Bentuk-bentuk alur	15
Gambar 2. 6 Rotor Kutub Menonjol	17
Gambar 2. 7 (a) Rotor Non-Silent dan (b) Penampang Rotor.....	18
Gambar 2. 8 Skema Generator 3 Fasa.....	20
Gambar 2. 9 Gelombang Sinus Generator 3 Fasa	21
Gambar 2. 10 Kurva dan Rangkaian Ekuivalen Generator Tanpa Beban.....	23
Gambar 2. 11 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Berbeban	23
Gambar 2. 12 Grafik Gelombang Beban Resistif	26
Gambar 2. 13 Vektor hubungan V dan I pada beban induktif($Z = XL$)	27
Gambar 2. 14 Grafik gelombang beban Induktif	28
Gambar 2. 15 Vektor hubungan V dan I pada beban kapasitif($Z = XC$)	29
Gambar 2. 16 Grafik gelombang beban Kapasitif	30
Gambar 2. 17 Pengembangan Model Reaksi Jangkar.....	32
Gambar 2. 18 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron.....	33
Gambar 2. 19 Diagram fasor generator sinkron pada faktor daya satu.....	34
Gambar 2. 20 Diagram fasor generator sinkron pada saat lagging	35
Gambar 2. 21 Diagram fasor generator sinkron pada saat leading	35
Gambar 2. 22 Diagram Kurva Kapabilitas.....	38
Gambar 2. 23 Segitiga Daya	42
Gambar 2. 24 Sudut Faktor Daya.....	45
Gambar 2. 25 Arus sefase dengan tegangan	46
Gambar 2. 26 Arus mendahului tegangan sebesar sudut phi	47
Gambar 2. 27 Tegangan mendahului arus sebesar sudut phi	47
Gambar 2. 28 Diagram daya	48
Gambar 2. 29 Skema Sistem Eksitasi Menggunakan Sikat (<i>Brush Excitation</i>)....	52
Gambar 2. 30 Skema Sistem Eksitasi Tanpa Menggunakan Sikat (<i>Brushless Excitation</i>).....	55

Gambar 2. 31 Sebuah generator diparalelkan dengan sistem tenaga yang sedang berjalan.....	58
Gambar 2. 32 Dua Kemungkinan Urutan Fasa dari Sistem Tiga Fasa	59
Gambar 2. 33 Syncroscope	61
Gambar 2. 34 Konstruksi Synchroscope	64
Gambar 2. 35 Voltmeter.....	66
Gambar 2. 36 Frekuensi meter	67
Gambar 2. 37 <i>Automatic Synchronizer</i>	68
Gambar 2. 38 Diagram Aliran Daya Generator Sinkron.....	69
Gambar 4. 1 Wiring Diagram <i>Mainswitchboard</i>	83
Gambar 4. 2 Nameplate Spesifikasi Generator	89
Gambar 4. 3 Grafik Hubungan Beban dan Efisiensi.....	95
Gambar 4. 4 Grafik Arus Generator Terhadap Rugi Tembaga.....	97
Gambar 4. 5 Grafik Arus Eksitasi Terhadap Rugi Tembaga	98

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Waktu Penelitian	75
Tabel 3. 2 Spesifikasi Generator Sinkron	77
Tabel 3. 3 Data Beban Kapal Tug Boat	78
Tabel 4. 1 Pemakaian Daya Listrik pada saat Operasi di Pelabuhan	86
Tabel 4. 2 Pemakaian Daya Listrik pada saat Operasi Penarikan	87
Tabel 4. 3 Pemakaian Daya Listrik pada saat Kondisi Berlayar Normal	88
Tabel 4. 4 Penggunaan Daya Listrik pada saat Kondisi Khusus dan Darurat	88
Tabel 4. 5 Spesifikasi Generator	89
Tabel 4. 6 Data Pengukuran Generator	90
Tabel 4. 7 Total Rugi – rugi pada generator	92
Tabel 4. 8 Hasil Perhitungan Efisiensi Generator	94
Tabel 4. 9 Data Hubungan Beban dan Efisiensi	94
Tabel 4. 10 Hasil Perhitungan Pembebanan	100

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal *tug boat* memainkan peran penting dalam operasi maritim Indonesia, khususnya dalam menarik dan mengendalikan kapal di pelabuhan dan wilayah laut lepas. Sistem kelistrikan sebagai bagian dari infrastruktur operasional pada kapal, khususnya kapal jenis *tug boat* yang memiliki peranan sangat penting dalam menunjang operasi dan keselamatan pelayaran [1]. *Tug boat* merupakan kapal yang digunakan untuk membantu proses manuver kapal lain di pelabuhan, terminal, maupun perairan sempit. Dalam operasinya, *tug boat* membutuhkan suplai daya listrik yang andal untuk mengoperasikan berbagai peralatan utama maupun pendukung seperti mesin bantu, sistem navigasi, sistem komunikasi, pompa, penerangan, serta motor-motor induksi yang menjadi beban dominan pada kapal [2].

Energi listrik merupakan kebutuhan penting bagi kapal, dan utamanya dihasilkan oleh generator listrik bertenaga diesel. Pada sistem pembangkitan di kapal, generator menjadi sumber utama penyedia energi listrik karena memiliki kemampuan mempertahankan frekuensi dan tegangan yang stabil, serta cocok sebagai pemasok daya utama secara kontinyu. Selain itu sistem distribusi daya listrik juga penuh dengan perhitungan mulai dari menentukan kapasitas generator dan beban listrik yang diterimanya, serta menghitung beban listrik dalam berbagai kondisi operasional [3]. Generator sinkron merupakan mesin listrik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (AC) yang bekerja dengan mengubah energi mekanik (gerak) dari penggerak mula (*prime mover*) seperti mesin diesel menjadi energi listrik berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik [4].

Kinerja generator dapat ditentukan dengan mengamati perubahan daya aktif, tegangan keluaran, daya reaktif, daya semu, faktor daya, frekuensi, dan efisiensi. Dalam pengoperasiannya, terdapat salah satu permasalahan yang menyebabkan generator bekerja tidak efisien yaitu pembebanan yang tidak seimbang pada generator sinkron 3 fasa [5] [6]. Ketidakseimbangan beban sering terjadi pada suatu jaringan listrik yang menjadi permasalahan terus-menerus,

terutama pada suatu sistem distribusi tenaga listrik [7]. Selain itu juga, generator mesin diesel laut diasumsikan dioperasikan pada faktor daya sekitar 0,8 hingga 1,0. Namun, sering diamati bahwa generator diesel laut di atas kapal beroperasi pada faktor daya yang lebih rendah dari 0,8 [8]. Nilai faktor daya yang rendah menyebabkan pemakaian bahan bakar pada mesin diesel generator cukup tinggi dan arus pemakaian energi listrik menjadi tinggi juga [9].

Efisiensi generator dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah pembebanan yang mengalami fluktuasi. Efisiensi generator dipengaruhi oleh besarnya beban yang diterima dan rugi-rugi daya yang terjadi selama proses konversi energi [10]. Semakin besarnya pembebanan maka akan semakin turunnya sebuah efisiensi. begitu pula sebaliknya, semakin kecilnya pembebanan maka akan naiknya efisiensi [11]. Pada kapal pembebanan selalu berubah-ubah, bergantung kondisi operasional yang sedang dijalankan, sehingga efisiensi generator harus lebih diperhatikan agar kapal dapat beroperasi dengan baik dan selamat [12].

Standar efisiensi generator sinkron di atas 85% menurut IEC 60034-1 tahun 2017. Efisiensi generator dapat berubah karena rugi-rugi saat pembebanan. Peningkatan daya keluaran lebih signifikan dibandingkan peningkatan rugi-rugi, sehingga efisiensi keseluruhan meningkat. Sebaliknya, rugi tembaga yang menurun dengan rugi besi dan mekanik konstan menyebabkan efisiensi turun [13].

Pada operasi nyata kapal *tug boat*, beban listrik tidak bersifat konstan karena adanya perubahan kondisi operasional, seperti saat kapal melakukan manuver, menarik atau mendorong kapal lain, serta saat sistem kelistrikan diaktifkan atau dinonaktifkan secara bergantian. Sehingga beban induktif pada sistem kelistrikan kapal berfluktuatif yang mempengaruhi dari kinerja atau efisiensi generator sinkron. Dalam praktiknya juga generator di kapal *tug boat* memiliki nilai power faktor yang cukup rendah atau berfluktuatif dikarenakan beban yang meningkat dan berfluktuatif [14]. Rendahnya efisiensi atau rugi-rugi yang ditimbulkan dapat menyebabkan mempercepat umur generator.

Penelitian terkait analisis kinerja generator sinkron telah banyak dilakukan sebelumnya, beberapa penelitian terdahulu lebih menyoroti penurunan faktor daya,

rugi-rugi pada lilitan stator dan rotor, serta dampak beban non-linear terhadap kualitas daya. Kebanyakan penelitian terdahulu hanya mengukur efisiensi pada kondisi pembebanan statis atau terkontrol, sehingga belum memberikan gambaran nyata mengenai performa generator saat menghadapi variasi beban riil di lapangan. Namun, penelitian mengenai fluktuasi pembebanan yang terjadi secara dinamis selama operasi kapal, khususnya kapal *tug boat*, masih tergolong terbatas. Data berbasis operasional nyata dari kapal juga masih jarang digunakan sebagai dasar evaluasi efisiensi sistem kelistrikan. Manajemen dalam sistem kelistrikan kapal juga dipengaruhi dari efisiensi dan kinerja generator serta konsumsi bahan bakar [15]. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan analisis berbasis data operasi aktual guna melihat bagaimana fluktuasi pembebanan mempengaruhi efisiensi generator sinkron pada kapal *tug boat*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam optimalisasi pembebanan generator sehingga kinerja sistem kelistrikan kapal dapat lebih efisien dan andal.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini untuk mengukur efisiensi generator sinkron akibat pembebanan fluktuatif yang dinamis pada kapal *tug boat*. Maka sesuai judul yang diambil oleh peneliti diatas berdasarkan pada sumber data dan pengalaman kerja praktik yang peneliti alami selama di kapal *tug boat* sebagai acuan untuk membuat tugas akhir ini, maka pembahasan ini dapat ditentukan beberapa indikator dalam rumusan masalah ini yaitu :

1. Bagaimana pengaruh fluktuasi pembebanan yang terjadi terhadap efisiensi generator sinkron di kapal *tug boat*?
2. Seberapa besar rugi-rugi generator yang dialami akibat pembebanan fluktuatif yang dinamis pada kapal *tug boat*?
3. Berapakah nilai efisiensi generator pada kapal *tug boat* akibat pembebanan yang fluktuatif?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang didapat dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui pengaruh pembebanan yang berfluktuasi terhadap efisiensi generator sinkron di kapal *tug boat*.
2. Untuk mengetahui seberapa besar rugi-rugi (*losses*) yang dialami generator akibat pembebanan fluktuatif secara dinamis pada kapal *tug boat*.
3. Untuk mengetahui nilai efisiensi generator pada kapal *tug boat* akibat pembebanan yang fluktuatif.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah di paparkan diatas, maka penelitian ini berfokus dari pokok permasalahan yang terjadi dalam rangka untuk mengetahui seberapa besar nilai efisiensi generator akibat pembebanan yang fluktuatif sehingga memberikan pengetahuan dalam perawatan maupun penggunaan generator sinkron pada kapal *tug boat*. Maka dilakukan pembatasan ruang lingkup sebagai berikut :

1. Mengetahui seberapa besar pengaruh pembebanan yang berfluktuasi terhadap efisiensi generator sinkron.
2. Menghitung dan menganalisa nilai rugi-rugi yang dialami generator sinkron akibat pembebanan yang berubah-ubah secara dinamis berdasarkan data yang didapat pada kapal *tug boat*.
3. Menghitung dan menganalisa nilai efisiensi generator sinkron akibat pembebanan yang fluktuatif agar dapat mengukur kinerja generator saat pembebanan pada kapal *tug boat*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang ingin di capai penulis dalam pembuatan skripsi/tugas akhir ini adalah :

1. Penelitian ini bermanfaat untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai bagaimana perubahan beban listrik yang terjadi selama operasi kapal dapat memengaruhi performa dan efisiensi generator sinkron. Dengan mengetahui pola dan dampak fluktuasi beban, operator kapal, teknisi, serta perencana operasi kelistrikan dapat melakukan pengaturan beban yang lebih tepat untuk menjaga kinerja generator tetap stabil. Informasi ini juga dapat digunakan sebagai dasar dalam mengoptimalkan penggunaan generator agar tidak bekerja pada kondisi yang merugikan atau di luar rentang operasi efisiennya.
2. Penelitian ini memberikan manfaat dalam mengidentifikasi besarnya rugi-rugi (*losses*) yang timbul pada generator ketika menghadapi pembebanan yang tidak stabil. Dengan mengetahui nilai rugi-rugi tersebut, pihak pengelola kapal dapat memahami faktor-faktor yang menyebabkan meningkatnya energi terbuang, baik akibat rugi-rugi tembaga, rugi inti, maupun rugi mekanis lainnya. Informasi ini dapat digunakan sebagai acuan dalam melakukan perawatan berkala, peningkatan efisiensi sistem, serta perbaikan prosedur pengoperasian generator untuk meminimalkan energi yang hilang selama kapal beroperasi.
3. Hasil penelitian ini memberikan nilai efisiensi generator secara kuantitatif pada berbagai kondisi beban yang berubah-ubah di lapangan. Data ini dapat menjadi tolok ukur (*benchmark*) untuk menilai apakah generator bekerja dalam kondisi optimal atau tidak. Selain itu, informasi mengenai nilai efisiensi ini dapat dimanfaatkan oleh pihak operator dan perancang sistem kelistrikan kapal untuk menetapkan strategi operasional, seperti pembagian beban, pengaturan mode operasi generator, atau pengendalian beban agar efisiensi dapat ditingkatkan. Dengan demikian, penelitian ini secara langsung mendukung upaya peningkatan kinerja sistem kelistrikan kapal secara keseluruhan.

1.6 Metode Penulisan

Adapun metode penulisan yang digunakan untuk mendapatkan data dalam membahas permasalahan sesuai dengan judul yang di atas adalah :

1. Studi literatur

Metode ini dilakukan dengan pengumpulan data dari berbagai sumber tentang teori-teori yang mendukung dalam penyelesaian tugas akhir.

2. Observasi

Observasi dilakukan langsung dilokasi penelitian yang bertujuan untuk mengumpulkan data-data yang dibutuhkan.

3. Analisis

Menghitung dan memahami data yang diperoleh sehingga dapat meyakinkan sistem berjalan dengan baik.

1.7 Sistematika Penulisan

Dalam upaya untuk mencapai pembuatan tugas akhir yang maksimal sehingga mencapai sebuah pemahaman ilmu pengetahuan. Maka penelitian tugas akhir ini disusun dengan sistematika yang terdiri dari 5 bab, yang setiap bab nya memiliki penjelasan berdasarkan pengalaman kerja praktik di perusahaan pelayaran disusun secara berkesinambungan yang dalam pembahasannya merupakan satu rangkaian yang tidak terpisahkan, adapun sistematika penelitian tersebut disusun sebagai berikut :

- a. BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini peneliti menjelaskan mengenai uraian dan penjelasan yang melatar belakangi pemilihan judul skripsi, rumusan masalah, ruang lingkup penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, metode penulisan, dan sistematika penulisan.

- b. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini menjelaskan mengenai tinjauan pustaka yang berisikan teori dan gambaran pengetahuan yang ada saat ini sehingga disusun dalam satu kesatuan utuh untuk dijadikan landasan penyusunan kerangka pemikiran dan definisi tentang istilah lain dalam penelitian.

c. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini menjelaskan mengenai jenis metode penelitian, waktu dan tempat penelitian, sumber data, teknis analisis data dan prosedur penelitian.

d. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini menjelaskan mengenai uraian hasil penelitian dan pemecahan masalah guna memberikan jalan keluar atas masalah yang dihadapi.

e. BAB V PENUTUP

Pada bagian penutup berisikan kesimpulan dari hasil analisa dan pembahasan masalah yang menghasilkan saran yang dapat bermanfaat bagi pihak yang terkait sesuai dengan fungsi penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Kelistrikan Kapal *Tug Boat*

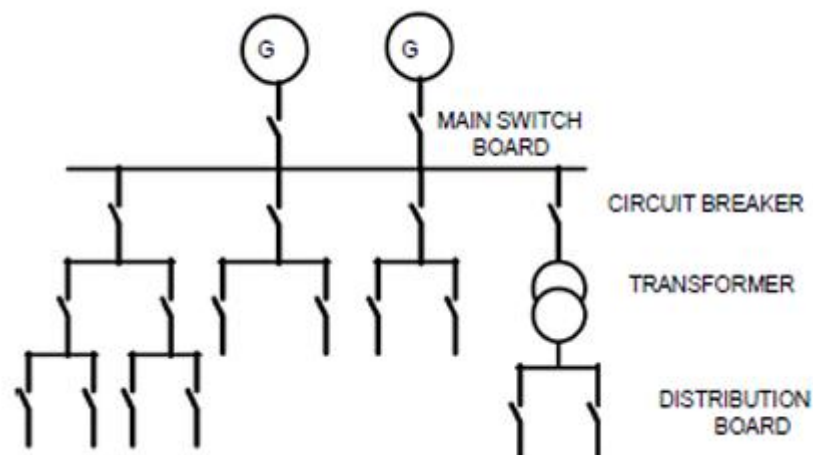
Power listrik bagian penting dalam industri maritim, listrik sebagai sumber energi untuk pengoperasian dan menjalankan kapal. Instalasi listrik digunakan untuk keperluan penerangan, alat komunikasi, alat navigasi, monitoring, alarm system, menjalankan motor listrik, hingga instalasi *high voltage* untuk keperluan penggerak utama kapal. Power listrik kapal mulai diperkenalkan pada abad 19, perkembangan sistem power listrik kapal terus mengalami evolusi hingga hari ini. Melihat catatan sejarah sistem instalasi listrik pertama kali oleh kapal komersial *SS Columbia* dengan instalasi listrik DC pada tahun 1880, berlanjut kepada pengembangan sistem listrik induksi motor AC menggunakan mesin diesel [16].

Secara umum, sistem kelistrikan kapal terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sistem pembangkitan tenaga listrik, sistem distribusi, sistem pengamanan dan proteksi, serta sistem beban. Sistem pembangkitan tenaga listrik pada kapal *tug boat* umumnya menggunakan generator sinkron yang digerakkan oleh mesin diesel. Generator ini dirancang untuk menghasilkan energi listrik dengan tegangan dan frekuensi tertentu sesuai standar kelistrikan kapal, sehingga dapat memenuhi kebutuhan daya seluruh peralatan di atas kapal. Dalam sistem kapal, generator daya diesel digunakan dalam berbagai sistem pembangkit listrik otonom untuk memastikan keamanan pasokan daya [17].

Sistem distribusi tenaga listrik kapal berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari generator ke berbagai beban secara aman dan efisien. Distribusi listrik pada kapal biasanya menggunakan sistem tiga fasa dengan tegangan rendah atau menengah, tergantung pada ukuran dan kapasitas kapal. Panel distribusi utama (*main switchboard*) menjadi pusat pengaturan dan pengendalian aliran daya, termasuk pengaturan pembagian beban (*load sharing*) apabila kapal menggunakan lebih dari satu generator.

Beban daya sistem kelistrikan yang terpasang pada kapal biasanya disupply oleh dua atau lebih generator. Selain itu juga dapat disupply dari emergency

generator atau dari *battery* (aki). Daya listrik keluaran dari generator ini akan dipusatkan menuju ke satu panel *Main Switch Board* (MSB). *Main Switch board* sendiri biasanya dipasang di ruang kontrol, dimana arus listrik dari setiap generator di kontrol dan di distribusikan ke seluruh bagian kapal melalui papan – papan distribusi. Oleh karena itu, fungsi *Main Switch Board* merupakan yang sangat vital [18].



Gambar 2. 1 Diagram Dasar Sistem Distribusi Listrik di Kapal

Sistem distribusi kelistrikan pada kapal tug boat menggunakan “Distribusi Sistem Radial atau Sistem Branching”. Sistem distribusi ini mempunyai suatu bentuk yang sederhana dan logis. Setiap item dari beban adalah di suplai pada reted tegangan melalui kabel yang sesuai dan di proteksi/di amankan dengan peralatan proteksi yang sesuai. Oleh karena itu distribusi sistem radial ini adalah yang paling sesuai di penggunaan di kapal seperti pada gambar 2.1[18].

Selain aspek teknis, sistem kelistrikan kapal juga harus memenuhi standar dan regulasi internasional yang berlaku, seperti yang ditetapkan oleh *International Maritime Organization (IMO)*, *International Electrotechnical Commission (IEC)*, serta badan klasifikasi kapal. Penerapan standar ini bertujuan untuk menjamin keselamatan, keandalan, dan efisiensi sistem kelistrikan kapal dalam berbagai kondisi operasi [19].

2.2 Generator Sinkron

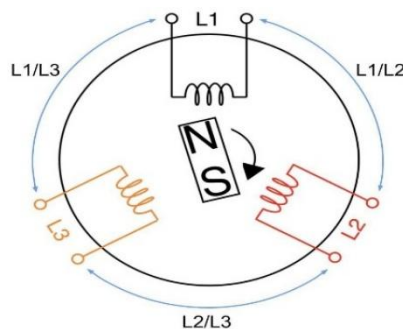
Sejarah generator sinkron dimulai dari pergeseran paradigma ilmu pengetahuan pada abad ke-19, di mana para ilmuwan mulai beralih dari penggunaan baterai kimia ke induksi mekanis untuk menghasilkan listrik. Penemuan Michael Faraday pada tahun 1831 mengenai induksi elektromagnetik menjadi batu pijakan utama. Namun, pada masa itu, fokus utama dunia adalah arus searah (DC). Baru pada tahun 1880-an, Nikola Tesla membawa revolusi dengan konsep sistem polifase. Tesla menyadari bahwa untuk mengirimkan tenaga listrik melintasi jarak yang luas, diperlukan arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan oleh mesin yang berputar selaras (sinkron) dengan frekuensi sistemnya. Keberhasilan sistem ini diuji secara besar-besaran pada proyek Air Terjun Niagara tahun 1895, yang menandai berakhirnya "Perang Arus" (*War of Currents*) antara Edison dan Tesla. Memasuki abad ke-20, desain generator sinkron mengalami penyempurnaan teknis. Penggunaan elektromagnet sebagai pengganti magnet permanen pada rotor memungkinkan pengendalian tegangan yang lebih presisi. Munculnya turbin uap berkecepatan tinggi juga memaksa perubahan bentuk rotor dari kutub menonjol (*salient pole*) menjadi rotor silinder yang lebih aerodinamis dan kuat secara mekanis untuk menahan gaya sentrifugal.

Generator arus bolak-balik disebut juga generator sinkron atau alternator, memberikan hubungan penting dalam proses perubahan energi ke dalam bentuk yang bermanfaat. Generator sinkron adalah mesin sinkron yang mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik. Generator bekerja berdasarkan prinsip kerja induksi elektromagnetik atau fluksi yang kemudian mengubah energi listrik. Azas generator yang bekerja berdasarkan : Hukum Induksi Faraday : “Apabila jumlah garis gaya yang melalui kumparan diubah, maka gaya gerak listrik dinduksikan dalam kumparan itu. Besarnya gaya gerak listrik yang dinduksikan berbanding lurus dengan laju perubahan jumlah garis gaya melalui kumparan”[20].

Generator sinkron merupakan alat listrik yang mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik dengan prinsip induksi elektromagnetik. Dalam sistem pembangkitan generator yang umum digunakan adalah generator sinkron dimana frekuensi keluaran generator sama dengan putaran rotor generator. Ketika

generator menanggung beban listrik yang bervariasi, generator umum dioperasikan secara paralel. Dikatakan generator sinkron karena kecepatan putaran medan magnet sama dengan kecepatan putaran rotor generator, sehingga kecepatan sinkron dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Kumparan medan generator sinkron terdapat pada rotor, sedangkan kumparan jangkar terdapat pada stator. Rotor generator sinkron yang terdiri dari belitan medan yang disuplai dengan arus searah akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putar rotor. Karena kecepatan putaran medan magnet sama dengan kecepatan putaran rotor generator, maka generator sinkron ini akan menghasilkan energi listrik bolak balik (AC) [21].

Generator sinkron adalah mesin listrik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak – balik (AC) yang bekerja dengan cara mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet. Generator ini dikatakan sebagai generator sinkron dikarenakan jumlah putaran rotornya sesuai dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Rotor generator sinkron diputar oleh penggerak mula (*prime mover*) yang terdiri dari belitan medan yang disuplai dengan arus searah akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putaran yang sama dengan putaran rotor tersebut. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga kumparan jangkar yang di stator akan dihasilkan fluks magnetik yang besarnya berubah – ubah terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung – ujung kumparan tersebut [4].



Gambar 2. 2 Generator 3 Fasa

Generator tiga fasa menghasilkan tegangan listrik AC pada tiga saluran keluaran, yaitu L1, L2, dan L3. Di bagian tengah sistem terdapat rotor berupa magnet dengan kutub utara (N) dan selatan (S) yang berputar. Perputaran rotor ini menghasilkan medan magnet berputar yang menjadi sumber utama pembangkitan tegangan listrik seperti pada gambar 2.2 [22].

Pada generator terdapat sistem penguatan medan (sistem eksitasi) yang mempunyai fungsi sangat penting untuk proses pembangkitan. Sistem eksitasi dapat mempengaruhi kinerja generator jika sistem tersebut diberikan pembebanan seperti beban resistif, induktif dan kapasitif. Oleh karena itu, generator harus mampu membangkitkan daya listrik sesuai dengan besarnya beban yang diberikan[23].

Dalam mengoperasikan motor sinkron sebagai generator sinkron adalah motor sinkron tidak memiliki penguatan medan atau eksitasi sendiri (self excitation), sehingga dibutuhkan catu daya tegangan DC yang dapat diatur untuk kebutuhan eksitasi medan rotor. Penguat atau eksitasi sendiri digunakan untuk menghasilkan eksitasi medan pada motor sinkron agar dapat beroperasi sebagai generator sinkron. Rangkaian catu daya DC dapat berupa rangkaian yang terpisah dari generator ataupun rangkaian yang tidak terpisah dalam hal ini tegangan keluaran (output) generator disearahkan dan digunakan sebagai catu daya eksitasi medan [24].

Generator kecepatan rendah yaitu generator yang digerakkan mesin diesel atau turbin air mempunyai mempunyai rotor dengan kutub medan menonjol (kutub sepatu). Dan generator dengan kecepatan tinggi mempunyai bentuk rotor silinder [25].

Generator atau motor induksi memiliki kelebihan dan kekurangan [26]. Kelebihan motor induksi sebagai generator adalah:

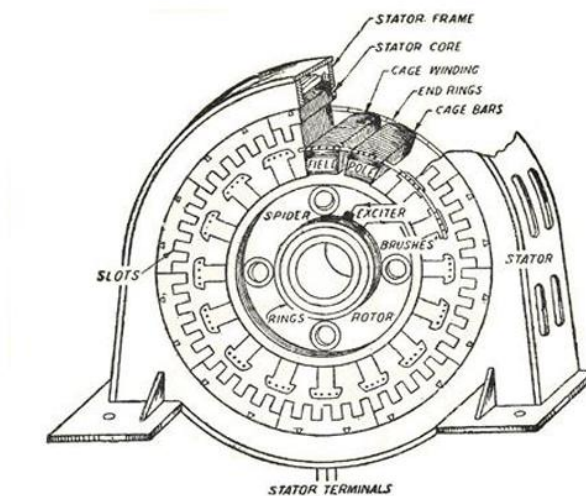
1. Harganya murah dan mudah ditemukan di pasaran.
2. Tersedia dari daya rendah hingga daya tinggi, satu fasa hingga tiga fasa.
3. Tidak memerlukan perawatan karena tidak memiliki sikat karbon dan cincin selip.

Selain kelebihan, berikut beberapa kekurangan motor induksi atau Generator :

1. Daya yang dihasilkan rendah ($< 0,8$).
2. Tegangan turun besar ($>10\%$).
3. Tegangan stabil tidak terjaga pada nilai konstan.
4. Membutuhkan pengontrol khusus yang cukup mahal untuk meningkatkan faktor daya.

2.2.1 Konstruksi Generator Sinkron

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



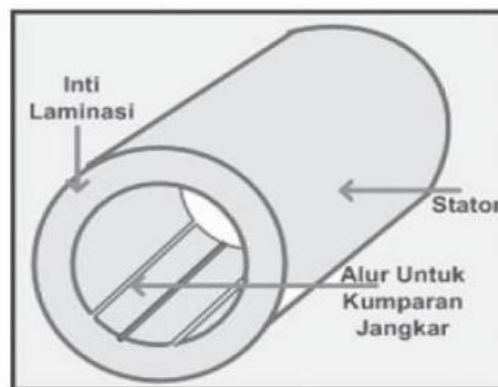
Gambar 2. 3 Konstruksi Generator Sinkron

Konstruksi generator sinkron terdiri stator, rotor dan celah udara. Pada stator adalah bagian dari mesin yang diam dan berbentuk silinder. Sedangkan rotor adalah bagian dari mesin yang berputar dan juga berbentuk silinder dan untuk celah udara adalah bagian ruangan antara stator dan rotor seperti pada gambar 2.3[27].

2.2.1.1 Stator

Stator merupakan komponen penting mesin yang tidak berputar. Stator merupakan bingkai laminasi yang terbuat dari besi cor maupun kombinasi aluminium cor. Stator mempunyai struktur celah sempit dengan gigi sejajar. Slot pada stator berguna menjadi tempat buat kumparan utama serta pelengkap. Slot ini ditempatkan di rangka besi. Fluks magnet yang beralih pada stator menginduksi rotor, mengakibatkan rotor berotasi dengan medan magnet putar stator. Rotor serta stator berputar dengan kelajuan yang berlainan. Rasio antara kelajuan stator dan kelajuan rotor disebut slip [28].

Stator adalah bagian yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang akan menuju ke beban disalurkan melalui stator. Stator berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Lilitan stator yang merupakan tempat untuk menghasilkan tegangan. Stator terbuat dari bahan ferromagnetik yang berbentuk dan di laminasi untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar seperti pada gambar 2.4 [29].



Gambar 2. 4 Inti dan Alur pada Stator

Stator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:

- a. Kerangka Stator, terbuat dari besi tuang yang berfungsi untuk menyangga inti jangkar.
- b. Inti stator, terbuat dari besi lunak (baja silikon).

- c. Alur (slot) berfungsi sebagai tempat untuk meletakkan belitan (kumparan) stator. Ada 3 (tiga) bentuk alur stator, yaitu : terbuka, setengah terbuka, dan tertutup seperti pada gambar 2.5 berikut :



Gambar 2. 5 Bentuk-bentuk alur

- d. Kumparan Stator (Kumparan jangkar)

Kumparan stator (jangkar) biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi. Belitan stator (jangkar) yang umum digunakan oleh mesin sinkron tiga fasa ada dua tipe, yaitu:

- 1) Belitan Satu Lapis (*Single Layer Winding*)

Pada belitan satu lapis, antar kumparan fasa dipisahkan sebesar 120 10 derajat listrik atau 60 derajat mekanis, satu siklus ggl penuh akan dihasilkan bila rotor dengan 4 kutub berputa 180 derajat mekanis. Satu siklus ggl penuh menunjukkan 360 derajat listrik, adapun hubungan antara sudut rotor mekanis α_{mek} dan sudut listrik α_{lis} , adalah:

$$\alpha_{lis} = \frac{P}{2} \alpha_{mek} \dots\dots\dots (2.1)$$

- 2) Belitan Berlapis Ganda (*Double Layer Winding*)

Bentuk belitan berlapis ganda yang secara umum banyak digunakan. Pada tiap masing-masing alur terdapat dua sisi lilitan dan masing-masing lilitan memiliki lebih dari satu putaran. Bagian dari lilitan yang tidak terletak ke dalam alur biasanya disebut winding overhang, sehingga tidak ada tegangan dalam winding overhang.

2.2.1.2 Rotor

Rotor merupakan bagian berputar yang berfungsi untuk membangkitkan medan magnet yang menghasilkan tegangan dan akan di induksikan ke stator. Pada rotor terdapat kutub-kutub magnet dengan lilitannya yang dialiri arus searah, melewati cincin geser dan sikat. Rotor terdiri dari empat komponen utama, yaitu:

a. Slip Ring atau Cincin Geser

Slip ring merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu, terbuat dari bahan kuningan atau tembaga yang dipasang pada poros dengan memakai bahan isolasi. Terminal kumparan rotor dipasangkan ke slip ring ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (*brush*) yang letaknya menempel pada slip ring. Slip ring ini berputar bersama sama dengan poros dan rotor. Jumlah slip ring ada dua buah, yang masing-masing slip ring dapat menggeser sikat arang, yang merupakan sikat positif dan negatif, yang berguna untuk mengalirkan arus penguat magnet ke lilitan magnet pada rotor.

b. Sikat

Sikat terbuat dari bahan karbon tertentu, berfungsi sebagai saklar putar untuk mengalirkan arus DC ke-kumparan medan pada rotor generator sikron.

c. Kumparan rotor (kumparan medan)

Kumparan rotor merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

d. Poros Rotor

Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor tersebut telah terbentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.

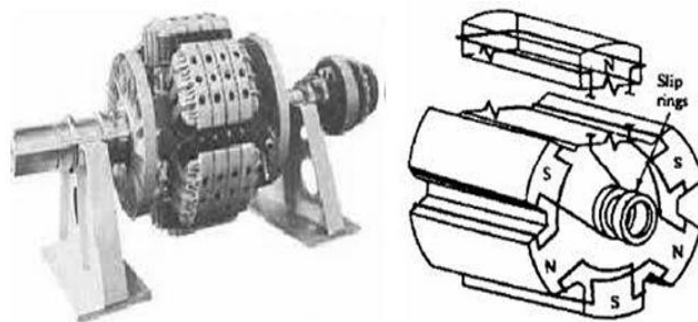
Kutub medan magnet rotor dapat berupa (kutub menonjol (*salient pole*) dan kutub silinder (*non salient pole*)).

1) Jenis kutub menonjol (*silent pole*)

Jenis *silent pole* merupakan jenis yang memiliki kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medannya dihubungkan seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan. Rotor dengan kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (200-400) rpm. Generator seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik seperti pada gambar 2.6 [29].

Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang, karena:

- Kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.
- Konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi [29].



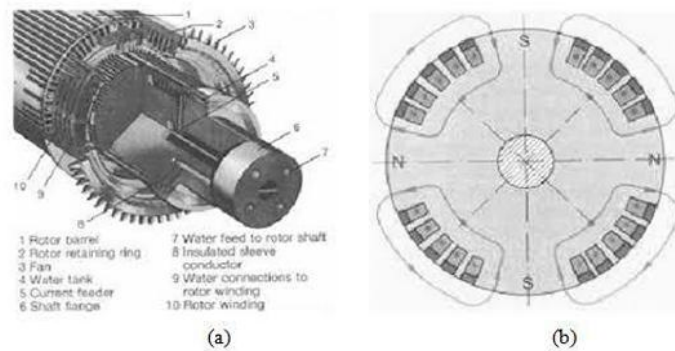
Gambar 2. 6 Rotor Kutub Menonjol

2) Jenis kutub silindris (*non silent pole*)

Jenis *non silent pole* merupakan konstruksi yang kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-alur terbuat di sisi luarnya. Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur di sisi luarnya dan terhubung seri. Rotor jenis kutub silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar tinggi (1500 – 3000) rpm seperti yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga uap seperti pada gambar 2.7 [29].

Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putaran yang tinggi karena:

- Konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi.
- Distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol [29].



Gambar 2. 7 (a) Rotor Non-Silent dan (b) Penampang Rotor

2.2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Adapun 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.
- Penggerak mula (*Prime Mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya, dengan persamaan sebagai berikut.

$$n_s = \frac{f \cdot 120}{p} \dots\dots\dots(2.2)$$

Di mana :

n_s : Kecepatan putaran rotor (rpm)

p : Jumlah kutub rotor

f : Frekuensi (Hz)

- 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. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut.

Untuk generator sinkron tiga fasa, digunakan tiga kumparan jangkar yang ditempatkan di stator yang disusun dalam bentuk tertentu, sehingga susunan kumparan jangkar yang sedemikian akan membangkitkan tegangan induksi pada ketiga kumparan jangkar yang besarnya sama tapi berbeda fasa 120° satu sama lain. Setelah itu ketiga terminal kumparan jangkar siap dioperasikan untuk menghasilkan energi listrik[30].

Pada hukum Faraday, mengenai induksi elektromagnetik sebagai fenomena dasar yang diterapkan pada generator. Hukum Faraday menyebutkan jika terjadi perubahan garis gaya magnet pada sebuah kumparan kawat, maka akan timbul gaya gerak listrik (ggl) pada kawat tersebut. Jika kumparan kawat dihubungkan dengan rangkaian listrik tertutup, maka akan timbul pula arus listrik yang mengalir pada rangkaian [21].

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.3)$$

Di mana :

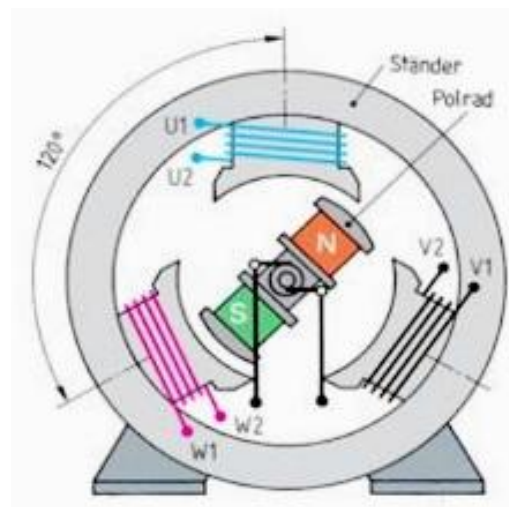
- e : ggl induksi
- N : Jumlah lilitan
- d ϕ : Perubahan fluks magnet
- dt : Perubahan waktu

Kecepatan rotor dan frekuensi dari tegangan yang dibangkitkan berbanding secara langsung. Misal sebuah generator hanya memiliki satu lilitan yang terbuat dari dua penghantar secara seri, Lilitan seperti ini disebut Lilitan terpusat, dalam generator sebenarnya terdiri dari banyak lilitan dalam masing-masing Fasa yang terdistribusi pada masing-masing alur stator dan disebut Lilitan terdistribusi.

Diasumsikan rotor berputar searah jarum jam, maka flux medan rotor bergerak sesuai lilitan jangkar. Satu putaran rotor dalam satu detik menghasilkan satu siklus per detik atau 1 Hertz (Hz). Bila kecepatannya 60 revolution per menit (Rpm), frekuensi 1 Hz. Untuk frekuensi $f = 60$ Hz, maka rotor harus berputar 3600 Rpm. Untuk kecepatan rotor n rpm, rotor harus berputar pada kecepatan $n/60$ revolution per detik (rps). Bila rotor mempunyai lebih dari 1 pasang kutub, misalnya P kutub maka masing-masing revolution dari rotor menginduksikan $P/2$ siklus tegangan dalam lilitan stator. Frekuensi dari tegangan induksi sebagai sebuah fungsi dari kecepatan rotor [22].

$$f = \frac{p}{2} \cdot \frac{n}{60} \text{ Hz} \dots\dots\dots(2.4)$$

Untuk generator sinkron tiga fasa, harus ada tiga belitan yang masing-masing terpisah sebesar 120 derajat listrik dalam ruang sekitar keliling celah udara seperti pada gambar berikut.



Gambar 2. 8 Skema Generator 3 Fasa

Gambar 2.8 menggambarkan prinsip kerja generator sinkron tiga fasa yang terdiri dari rotor, stator, dan kumparan fasa yang tersusun secara simetris. Saat rotor berputar, medan magnetnya memotong kumparan stator secara bergantian. Perubahan fluks magnet yang memotong kumparan inilah yang menimbulkan tegangan induksi AC pada setiap kumparan stator sesuai dengan prinsip induksi elektromagnetik. Karena posisi kumparan berbeda, maka puncak tegangan pada

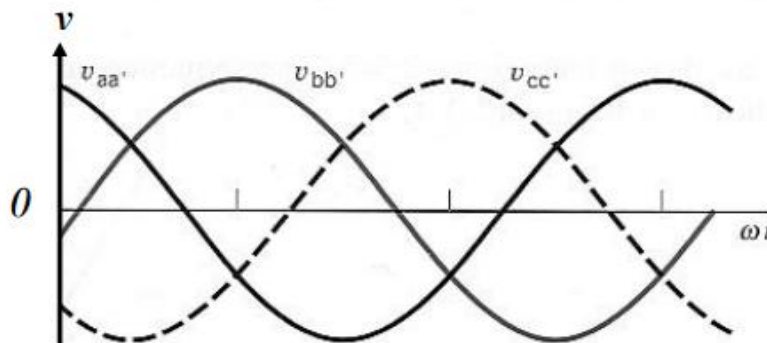
masing-masing fasa juga terjadi pada waktu yang berbeda. Terminal U1–U2, V1–V2, dan W1–W2 menunjukkan ujung-ujung kumparan stator yang dapat dihubungkan ke beban atau dirangkai dalam konfigurasi bintang (Y) atau delta (Δ) sesuai kebutuhan sistem. Secara keseluruhan, gambar ini menjelaskan bagaimana generator sinkron tiga fasa mengubah energi mekanik menjadi energi listrik AC yang seimbang, stabil, dan efisien melalui interaksi antara medan magnet rotor dan kumparan stator [31].

Pada gambar 2.8 Masing-masing lilitan akan menghasilkan gelombang Fluksi sinus satu dengan lainnya berbeda 120 derajat listrik. Dalam keadaan seimbang besarnya fluksi sesaat :

$$\Phi_A = \Phi_m \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\Phi_B = \Phi_m \cdot \sin (\omega t - 120^\circ) \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\Phi_C = \Phi_m \cdot \sin (\omega t - 240^\circ) \dots\dots\dots(2.7)$$



Gambar 2. 9 Gelombang Sinus Generator 3 Fasa

Gambar 2.9 menggambarkan GGL induksi (E_a /V) pada alternator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator bila rotor diputar di sekitar rotor. Besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan (I_f) yang diberikan pada rotor [32].

Besarnya ggl induksi (E_a) rata-rata yang dihasilkan kumparan jangkar alternator ini dapat dilihat dalam persamaan sebagai berikut :

$$E = 4.44 \times f \varphi T \dots\dots\dots(2.8)$$

Jika $f = \frac{np}{120}$, maka :

$$E = 4.44 \times \frac{np}{120} \varphi T$$

$$E = \frac{4.44 np \varphi T}{120}$$

Bila, $C = \frac{4.44 p T}{120}$, Maka $E = C n \varphi$

Dimana :

E = GGL induksi (Volt)

C = Konstanta

P = Jumlah kutub

n = Putaran (rpm)

f = Frekuensi (Hz)

φ = Fluks magnetik (weber)

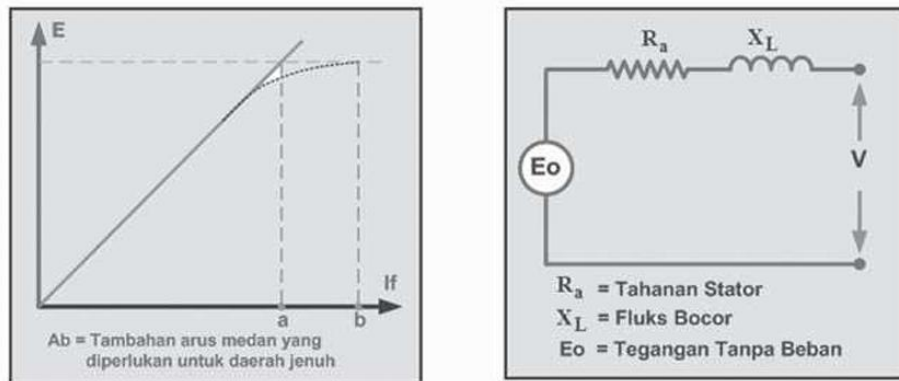
T = Banyaknya lilitan per fasa

2.2.2.1 Generator Sinkron Tanpa Beban

Jika sebuah mesin sinkron difungsikan sebagai generator dengan diputar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka pada kumparan jangkar stator akan diinduksikan tegangan tanpa beban (E_o), yaitu :

$$E_o = 4,44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \varphi_m \cdot T \text{ Volt} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, sehingga tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluk hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f). Bila besarnya arus medan dinaikkan, maka tegangan output juga akan naik sampai titik saturasi (jenuh). Kondisi Generator tanpa beban bisa digambarkan rangkaian ekuivalennya seperti diperlihatkan pada gambar 2.10 [22].

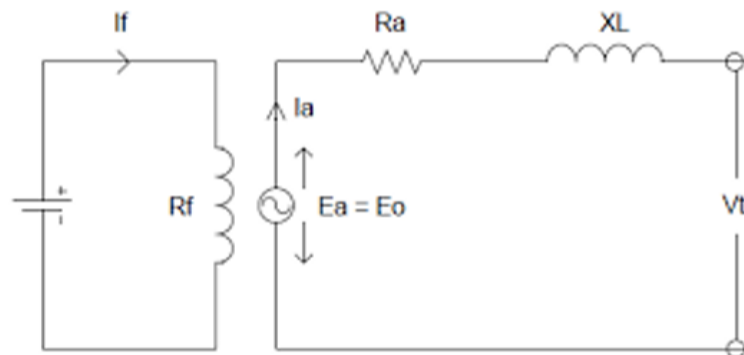


Gambar 2. 10 Kurva dan Rangkaian Ekuivalen Generator Tanpa Beban

2.2.2.2 Generator Sinkron Berbeban

Bila Generator diberi beban yang berubah-ubah maka besarnya tegangan terminal V akan berubah-ubah pula. Hal ini disebabkan adanya kerugian tegangan pada:

1. Resistansi jangkar R_a
2. Reaktansi bocor jangkar X_L
3. Reaksi Jangkar X_a



Gambar 2. 11 Rangkain Ekivalen Generator Sinkron Berbeban

Gambar 2.11 menunjukkan bahwa resistansi jangkar/fasa R_a menyebabkan terjadinya tegangan jatuh (Kerugian tegangan) / fasa $I \cdot R_a$ yang sephasa dengan arus jangkar. Reaktansi Bocor Jangkar Saat arus mengalir melalui penghantar jangkar, sebagian fluk yang terjadi tidak mengimbas pada jalur yang telah ditentukan, hal seperti ini disebut fluk bocor. Reaksi Jangkar Adanya arus yang mengalir pada kumparan jangkar saat generator dibebani akan menimbulkan

fluksi jangkar (ϕ_A) yang berintegrasi dengan fluksi yang dihasilkan pada kumparan medan rotor (ϕ_F), sehingga akan dihasilkan suatu fluksi resultan sebesar [22].

$$\phi_R = \phi_F + \phi_A \dots\dots\dots(2.10)$$

Dengan adanya flux putar armatur akibat timbulnya arus armatur, maka pada kumparan timbul reaktansi pemagnet X_m . Reaktansi pemagnet bersama-sama dengan reaktansi bocor dikenal dengan nama reaktansi sinkron (X_s) dan secara matematis dapat ditulis[33].

$$X_s = X_L + X_m \dots\dots\dots(2.11)$$

Dan persamaan terminal generator sinkron dapat ditulis :

$$E_a = V_t + j X_a .I_a + j X_L.I_a + R_a.I_a \dots\dots\dots(2.12)$$

Dengan menyatakan reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi fluks bocor sebagai reaktansi sinkron, atau

$$X_s = X_a + X_L \dots\dots\dots(2.13)$$

Dapat dilihat pada gambar 2.11 maka persamaan menjadi :

$$E_a = V_t + j X_s .I_a + R_a.I_a \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

E_a = GGL yang dibangkitkan generator sinkron (Volt)

V_t = Tegangan Per Fasa (Volt)

R_a = Resistansi Jangkar

X_a = Reaktansi Reaksi Jangkar (Ohm)

X_L = Reaktansi Fluks Bocor (Ohm)

X_s = Reaktansi Sinkron (Ohm)

I_a = Arus Jangkar (Ampere)

Tiga macam sifat beban generator yang berpengaruh terhadap tegangan beban dan faktor dayanya yaitu :

a) Beban Resistif

Beban resistif adalah jenis beban listrik yang hanya memiliki sifat hambatan (resistance) tanpa komponen reaktif, sehingga energi listrik yang diserap seluruhnya berubah menjadi energi panas atau cahaya. Beban resistif tidak menyebabkan pergeseran *fase* antara arus dan tegangan listrik. Penggunaan beban listrik banyak digunakan dalam penerangan dan industri. Sehingga timbulnya arus listrik adalah beban, menurut hukum Ohm beban berbanding lurus dengan arus, hal ini menerangkan bahwa semakin besar beban yang digunakan maka semakin besar pula arus yang akan muncul, semakin banyak arus yang melewati kabel maka akan mengancam keselamatan peralatan dan pengguna energi listrik itu sendiri. Pada beban resistif murni dalam sistem AC, gelombang tegangan dan arus berada pada fase yang sama (faktor daya = 1), sehingga seluruh energi diserap sebagai daya nyata tanpa komponen reaktif. [34].

Georg Simon Ohm, seorang fisikawan Jerman, mengusulkan hukum Ohm. Hukum Ohm menetapkan hubungan antara tegangan dan arus yang melewati suatu substrat. Hukum ini sangat berguna dalam memprediksi besarnya tegangan, arus, atau hambatan pada suatu rangkaian tertentu. Hukum Ohm dapat didefinisikan sebagai hukum yang didasarkan pada hubungan sebab akibat antara tegangan dan arus. Menurut aturan Ohm, resistansi rangkaian berbanding terbalik dengan arus yang melewatinya dan secara langsung berhubungan dengan tegangan. Menurut Hukum Ohm, "Arus dalam suatu rangkaian berbanding lurus dengan tegangan yang melintasi rangkaian dan berbanding terbalik dengan resistansi rangkaian." Dalam rangkaian elektronik, Hukum Ohm sering digunakan. Hukum Ohm dapat dipakai guna menentukan nilai resistansi yang diperlukan, serta untuk menghitung arus dan menurunkan tegangan dalam rangkaian [35].

Bunyi dalam bentuk matematis :

$$V = I \times Z \dots\dots\dots(2.15)$$

persamaan tersebut adalah hukum ohm. sehingga untuk menghitung nilai tahanan pada suatu hambatan pada generator sinkron dinyatakan

$$Z = \frac{V\sqrt{3}}{I} \dots\dots\dots(2.16)$$

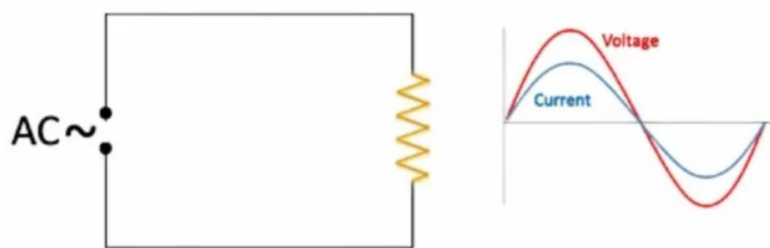
Keterangan :

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Z = Impedansi/hambatan (Ohm)

Hukum ini menjadi dasar bagi analisis rangkaian listrik dan digunakan dalam berbagai aplikasi teknik, termasuk perancangan sirkuit elektronik dan pengukuran sifat-sifat listrik bahan. Pengaruh tegangan terhadap kuat arus listrik dapat dijelaskan berdasarkan hukum Ohm. Jika hambatan tetap, maka kuat arus yang mengalir dalam rangkaian akan bertambah seiring dengan peningkatan tegangan yang diterapkan. Sebaliknya, jika tegangan berkurang, maka kuat arus juga akan menurun. Fenomena ini dapat digunakan untuk mengukur karakteristik bahan penghantar dan memahami cara pengaruh berbagai parameter dalam sistem listrik. Perubahan tegangan secara langsung memengaruhi besarnya kuat arus yang mengalir. Mereka juga menemukan bahwa variabilitas hasil pengukuran sangat tergantung pada ketepatan pengaturan tegangan dan pengukuran resistansi [36].



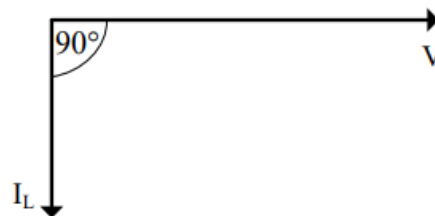
Gambar 2. 12 Grafik Gelombang Beban Resistif

Gambar 2.12 menunjukkan rangkaian arus bolak-balik (AC) dengan beban resistif murni beserta hubungan antara tegangan dan arus yang terjadi pada rangkaian tersebut. Pada bagian kiri gambar terlihat sumber tegangan AC yang dihubungkan dengan sebuah resistor sebagai beban. Resistor melambangkan beban resistif, yaitu beban listrik yang hanya memiliki

hambatan (R) tanpa sifat induktif atau kapasitif. Contoh beban resistif antara lain elemen pemanas, lampu pijar, dan resistor murni [36].

b) Beban Induktif

Beban induktif ($Z = XL$) adalah beban yang mengandung kumparan kawat yang dililitkan pada sebuah inti besi, dimana energi listrik yang diserap diubah menjadi medan magnet dan beban ini menyerap daya semu yang seluruhnya diubah menjadi daya reaktif induktif. Yang termasuk beban induktif adalah peralatan listrik yang menggunakan motor-motor listrik dan ballast atau transformator. Arus akan tertinggal (lagging) sebesar 90° terhadap tegangan, atau sudut fasanya sama dengan 90° sehingga $\cos \varphi = 0$, seperti pada gambar 2.13 [37]:



Gambar 2. 13 Vektor hubungan V dan I pada beban induktif($Z = XL$)

Untuk beban induktif murni $Z = XL$ arus akan tertinggal sejauh 90° terhadap tegangan, maka:

$$v = V \sin \omega t \dots\dots\dots(2.17)$$

$$i = I \sin (\omega t - 90^\circ) \dots\dots\dots(2.18)$$

Induktif adalah sifat kerja bebannya yang menimbulkan medan magnet. Beban listrik induktif artinya beban listrik yang dalam proses kerjanya memanfaatkan medan magnet untuk menghasilkan reaksi suatu gerakan. Medan magnet ini timbul akibat adanya lilitan kawat atau kumparan kawat. Beban listrik yang memiliki sifat induktif adalah, motor listrik, transformator, dan relay. Pada motor induksi AC misalnya, mesin ini memanfaatkan medan magnet yang timbul pada stator. Medan magnet ini digunakan untuk menginduksi rotor sehingga timbul medan magnet yang berlawanan pada stator dan mengakibatkan rotor berputar. Untuk menghasilkan induksi diperlukan energi listrik yang disebut dengan daya

reaktif dari sumber listrik bolak-balik. Untuk memutar beban yang dikopling dengan porosnya diperlukan daya nyata. Dari hasil daya nyata dan daya reaktif inilah akan timbul daya semu. Pada Rangkaian listrik bolak-balik Sifat kumparan atau lilitan kawat adalah menghalangi berubahnya nilai arus listrik. Nilai arus pada listrik arus bolak-balik selalu naik turun membentuk gelombang sinusoida. Perubahan inilah yang dihalangi oleh lilitan atau kumparan sehingga nilai arus listrik tertinggal oleh tegangan [38].

Beban jenis ini menyerap daya aktif dan daya reaktif. Persamaan daya aktif untuk beban induktif adalah sebagai berikut [39]:

$$P = V.I \cos \varphi \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan :

P = Daya aktif yang diserap beban (watt)

V = Tegangan yang mencatu beban (volt)

I = Arus yang mengalir pada beban (A)

φ = Sudut antara arus dan tegangan

Tingkat “hambatan” induktif terhadap arus AC disebut reaktansi induktif (X_L). Ini bernilai semakin besar saat frekuensi AC meningkat, karena semakin sering medan magnet berubah.

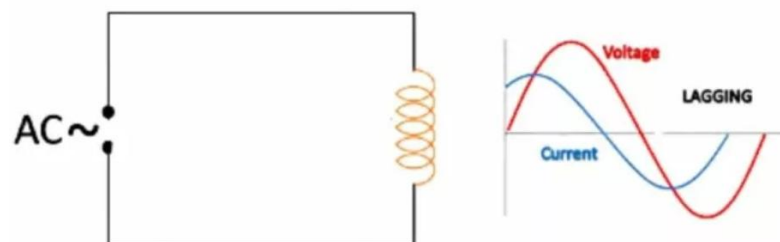
$$X_L = 2 \pi f L \dots\dots\dots(2.20)$$

Keterangan :

X_L = Reaktansi Induktif (Ohm)

f = Frekuensi sinyal AC (Hz)

L = Induktansi Lilitan (Henry, H)



Gambar 2. 14 Grafik gelombang beban Induktif

Gambar 2.14 menggambarkan rangkaian arus bolak-balik (AC) dengan beban induktif murni serta hubungan fasa antara tegangan dan arus. Pada bagian kiri gambar terlihat sumber tegangan AC yang dihubungkan dengan sebuah induktor (kumparan). Induktor merupakan beban induktif yang memiliki sifat menyimpan energi dalam bentuk medan magnet ketika dialiri arus listrik. Pada bagian kanan gambar ditampilkan gelombang sinus tegangan dan arus. Kurva merah menunjukkan tegangan, sedangkan kurva biru menunjukkan arus. Terlihat bahwa gelombang arus berada di belakang (lagging) terhadap gelombang tegangan. Hal ini ditandai dengan puncak arus yang terjadi setelah puncak tegangan [39].

c) Beban Kapasitif

Beban kapasitif ($Z = XC$) adalah beban yang mengandung suatu rangkaian kapasitor, dimana energi listrik yang diserap menghasilkan energi reaktif dan beban ini menyerap daya semu seluruhnya diubah menjadi daya reaktif kapasitif. Yang termasuk beban induktif adalah kapasitor. Arus akan mendahului (leading) sejauh 90° terhadap tegangan, atau sudut fasanya sama dengan 90° sehingga $\cos \phi = 0$, secara vektoris dinyatakan seperti pada gambar 2.15 [37]:



Gambar 2. 15 Vektor hubungan V dan I pada beban kapasitif($Z = XC$)

Untuk beban kapasitif murni $Z = XC$ arus akan mendahului tegangan sebesar sudut 90° , maka:

$$v = V \sin \omega t \dots\dots\dots(2.21)$$

$$i = I \sin (\omega t + 90^\circ) \dots\dots\dots(2.22)$$

Kapasitif adalah lawan dari induktif. Jika induktif menghalangi nilai arus, maka kapasitif menghalangi tegangan. Dengan kata lain, beban kapasitif adalah beban yang mempunyai sifat menghalangi tegangan yang berubah

nilainya. Sifat kapasitif inilah yang berguna menyimpan tegangan sementara. Dimana rangkaian ini mempunyai tegangan yang naik turun sehingga sifat kapasitif ini akan bekerja menyimpan dan mengeluarkan tegangan sesuai dengan berubahnya tegangan. Hal ini yang akan mengakibatkan arus akan mendahului tegangan (leading). Daya listrik untuk menopang beban kapasitif ini juga berbentuk sinus. Nilai positif pada daya yang diserap kapasitor di setengah gelombang awal sinus daya, dan juga nilai negatif atau yang dikeluarkan oleh kapasitor di setengah gelombang yang kedua [38].

Persamaan daya aktif untuk beban induktif adalah sebagai berikut [39]:

$$P = V.I \cos \varphi \dots\dots\dots(2.23)$$

Keterangan :

P = Daya aktif yang diserap beban (watt)

V = Tegangan yang mencatu beban (volt)

I = Arus yang mengalir pada beban (A)

φ = Sudut antara arus dan tegangan

Reaktansi kapasitif menunjukkan “hambatan” yang diberikan oleh kapasitor terhadap arus AC:

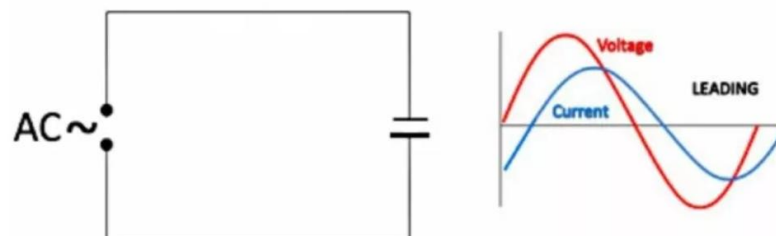
$$X_c = \frac{1}{2 \pi f C} \dots\dots\dots(2.24)$$

Keterangan :

X_c = Reaktansi kapasitif (Ω)

f = Frekuensi sumber AC (Hz)

C = Kapasitansi kapasitor (Farad)



Gambar 2. 16 Grafik gelombang beban Kapasitif

Gambar 2.16 menunjukkan bahwa jika beban generator bersifat resistif mengakibatkan penurunan tegangan relatif kecil dengan faktor daya sama dengan satu. Jika beban generator bersifat induktif terjadi penurunan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya terbelakang (lagging). Sebaliknya, Jika beban generator bersifat kapasitif akan terjadi kenaikan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya mendahului (leading) [39].

2.3 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

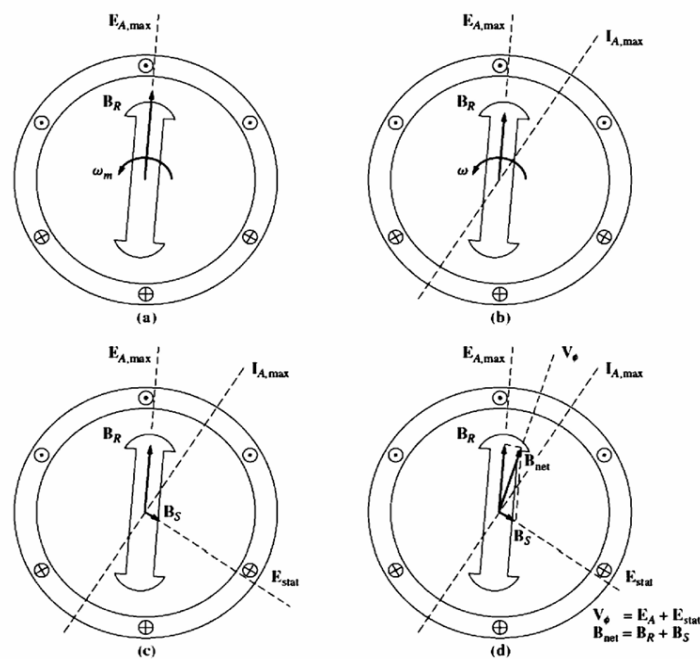
Tegangan induksi E_a dibangkitkan pada fasa generator sinkron. Tegangan ini biasanya tidak sama dengan tegangan yang muncul pada terminal generator. Tegangan induksi sama dengan tegangan output, hanya ketika tidak ada arus jangkar yang mengalir pada mesin. Beberapa faktor yang menyebabkan perbedaan antara tegangan induksi dengan tegangan terminal adalah [30]:

- a. Distorsi medan magnet pada celah udara oleh mengalirnya arus pada stator, disebut reaksi jangkar.
- b. Induktansi sendiri kumparan jangkar.
- c. Resistansi kumparan jangkar.
- d. Efek permukaan rotor kutub sepatu.

Karakteristik generator sinkron berbeban terdapat arus yang mengalir pada kumparan jangkar, sehingga arus jangkar yang dihasilkan akan membentuk fluks jangkar. Terbentuknya fluks jangkar dapat mempengaruhi fluks arus medan yang menyebabkan besarnya tegangan terminal berubah-ubah. Tegangan keluaran generator sinkron adalah selisih antara tegangan induksi dengan total rugi-rugi tegangan akibat reaksi jangkar, rugi tegangan akibat induktansi diri dan penurunan tegangan akibat resistansi lilitan stator [40].

Ketika rotor generator sinkron diputar, tegangan E_a diinduksikan pada belitan stator generator. Jika suatu beban dihubungkan pada terminal generator, arus akan mengalir. Namun aliran arus stator tiga fasa akan menghasilkan medan magnet tersendiri pada mesin. Medan magnet stator ini mendistorsi medan magnet rotor asli, mengubah tegangan fasa yang dihasilkan. Efek ini disebut reaksi jangkar karena arus (stator) mempengaruhi medan magnet yang menghasilkan arus

tersebut. Arus yang mengalir pada belitan stator menghasilkan medan magnet tersendiri. Medan magnet stator ini disebut B_s dan arahnya diberikan di sebelah kanan [41].



Gambar 2. 17 Pengembangan Model Reaksi Jangkar

Keterangan pada gambar 2.17 ialah:

- Medan magnet yang berputar menghasilkan tegangan internal EA.
- Tegangan yang dihasilkan menghasilkan aliran arus lagging ketika dihubungkan ke beban lagging.
- Arus stator menghasilkan medan magnet sendiri (B_S) yang menghasilkan tegangan stator (E_{stat}) sendiri pada belitan stator mesin.
- Medan B_S menggunakan medan rotor (B_R), mendistorsinya menjadi magnet sepenuhnya (B_{net}). Tegangan yang ditambahkan dari tegangan stator (E_{stat}) ke tegangan internal (EA), menghasilkan tegangan (V_ϕ) pada keluaran fase [33].

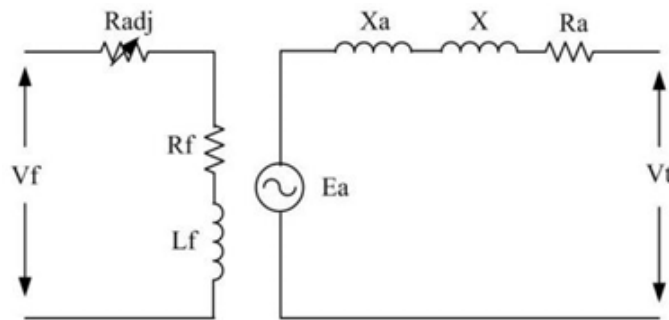
Dengan adanya dua tegangan pada belitan stator, tegangan total dalam suatu fasa hanyalah jumlah dari tegangan internal yang dihasilkan (EA). dan tegangan reaksi jangkar (E_{stat}):

$$V_{\phi} = E_A + E_{stat} \dots \dots \dots (2.25)$$

Medan magnet sepenuhnya (B_{net}), hanyalah jumlah medan magnet rotor dan stator:

$$B_{net} = B_R + B_s \dots \dots \dots (2.26)$$

Stator merupakan group belitan jangkar yang terbuat dari tembaga. Belitan belitan inidiletakkan pada alur-alur (slot), dimana suatu belitan konduktor akan mengandung tahanan (R) dan induktansi (L), maka belitan stator akan mengandung tahanan stator (R_a) dan induktansisendiri (L_f). Akibat adanya pengaruh reaktansi reaksi jangkar X_a dan reaktansi bocor jangkar X maka rangkaian ekivalen suatu generator sinkron dapat dibuat seperti gambar 2.18 [33]:



Gambar 2. 18 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

Dari gambar 2.18, tegangan generator sinkron dirumuskan sebagai berikut:

$$E_a = V_t + jX_a I_a + jX I_a + R_a I_a \dots \dots \dots (2.27)$$

Dan persamaan terminal generator sinkron dapat ditulis:

$$V_t = E_a - jX_a I_a - jX I_a - R_a I_a \dots \dots \dots (2.28)$$

Keterangan :

V_f = Tegangan Eksitasi (Volt)

R_f = Tahanan Belitan Medan (Ohm)

L_f = Induktansi Belitan Medan (Henry)

R_{Adj} = Tahanan Varibel (Ohm)

E_a = Ggl yang dibangkitkan generator sinkron (Volt)

V_t = Tegangan terminal generator sinkron (Volt)

X_t = Reaktansi Armatur (Ohm)

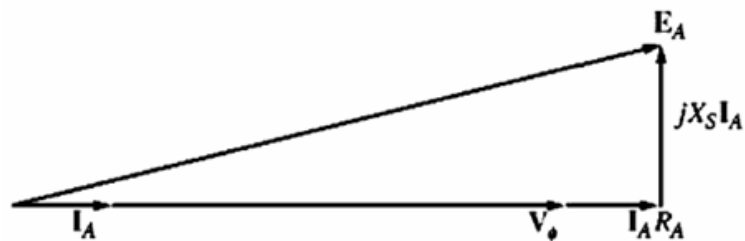
X = Reaktansi Bocor (Ohm)

X_s = Reaktansi Sinkon (Ohm)

I_a = Arus Jangkar (Ampere)

2.4 Diagram Fasor Generator Sinkron

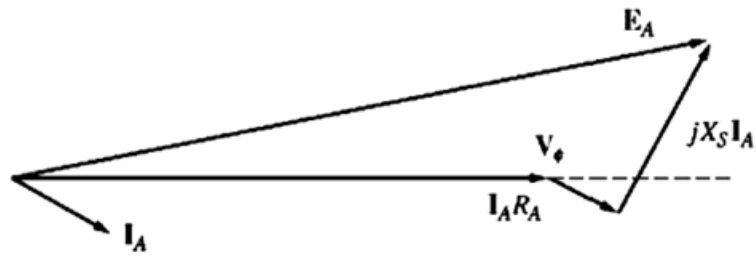
Tegangan pada generator sinkron adalah tegangan AC, maka biasanya tegangan tersebut dinyatakan sebagai fasor. Karena fasor memiliki besaran dan sudut, hubungan antara keduanya harus dinyatakan dengan plot dua dimensi. Ketika tegangan dalam suatu fasa (E_a , V_ϕ , $jX_s I_a$, dan $R_a I_a$) dan arus I_a dalam fasa diplot sedemikian rupa sehingga menunjukkan hubungan di antara keduanya, plot yang dihasilkan disebut diagram fasor [33].



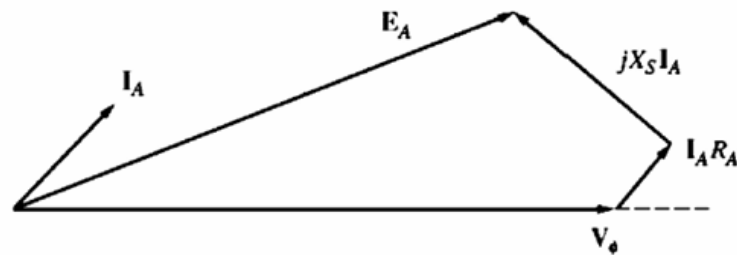
Gambar 2. 19 Diagram fasor generator sinkron pada faktor daya satu

Gambar 2.19 menggambarkan hubungan disaat generator menyuplai beban dengan faktor daya satu (beban resistif murni) [33].

Diagram fasor ini dapat dibandingkan dengan diagram fasor generator yang beroperasi pada faktor daya lagging dan leading dengan contoh gambar 2.20 berikut ini [33]:



Gambar 2. 20 Diagram fasor generator sinkron pada saat lagging



Gambar 2. 21 Diagram fasor generator sinkron pada saat leading

Gambar 2.21 menggambarkan bahwa, untuk tegangan fasa dan arus jangkar tertentu, tegangan pembangkitan internal (EA) yang lebih besar diperlukan untuk beban lagging dibandingkan untuk beban leading [33].

Oleh karena itu diperlukan arus medan yang lebih besar dengan beban lagging untuk mendapatkan tegangan terminal yang sama, karena:

$$E_a = K \omega w \dots\dots\dots(2.29)$$

dan w harus berjalan konstan agar menjaga frekuensi tetap stabil.

Maka dari gambar 2.19, gambar 2,20 dan gambar 2.21 dapat diperoleh [41] :

1. Untuk faktor daya unity :

$$E_a = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a X_s)^2} \dots\dots\dots(2.30)$$

$$E_a = \sqrt{(V_t + I_a R_a)^2 + (I_a (X_a + X_L))^2} \dots\dots\dots(2.31)$$

2. Untuk faktor daya lagging :

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \varphi + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \varphi + I_a X_s)^2} \dots\dots\dots(2.32)$$

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \varphi + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \varphi + I_a (X_a + X_L))^2} \dots\dots\dots(2.33)$$

3. Untuk faktor daya leading :

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \varphi + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \varphi - I_a X_s)^2} \dots \dots \dots (2.34)$$

Sedangkan X_s dalam $\Omega = 1.81 \times Z$

Dengan :

E_a = Tegangan beban terinduksi yang merupakan tegangan terinduksi setelah terdapat reaksi jangkar.

V_t = Tegangan terminal (tegangan per fasa) yang secara vektor lebih kecil daripada E_0 sebesar $I_a Z_s$ atau lebih kecil daripada E sebesar $I_a Z_s$

dimana :

Z = Impedansi

R_a = Resistansi Jangkar

X_a = Reaktansi Reaksi Jangkar (Ohm)

X_L = Reaktansi Fluks Bocor (Ohm)

X_s = Reaktansi Sinkron (Ohm)

I_a = Arus Jangkar (Ampere)

Alternatifnya, untuk arus medan tertentu dan besaran arus beban, tegangan terminal lebih rendah untuk beban lagging dan lebih tinggi untuk beban leading. Pada mesin sinkron yang sebenarnya, reaktansi sinkron jauh lebih besar daripada resistansi belitan (R_A), jadi R_A sering diabaikan dalam studi kualitatif variasi tegangan. Untuk hasil numerik yang akurat, R_A tentu saja harus dipertimbangkan.

2.5 Kurva Kapabilitas Generator Sinkron

Kurva kapabilitas generator memberikan batasan jumlah pembangkitan daya aktif dan daya reaktif dari generator. Kurva kapabilitas generator digunakan untuk menentukan batas pengoperasian stabilitas steady state generator dan menentukan setting sistem proteksi yang digunakan. Selain itu digunakan juga untuk batasan operasi *Optimal Power Flow* (OPF) dan batasan pengoperasian yang aman dari unit generator [42].

Kurva kapabilitas setiap unit generator biasanya sudah disediakan oleh pabrikan generator. Tetapi dalam prakteknya, dapat terjadi generator ternyata sudah mencapai batas maksimum pembebanannya sebelum mencapai batas maksimum yang terdapat pada kurva kapabilitas yang disediakan pabrikan generator. Hal ini

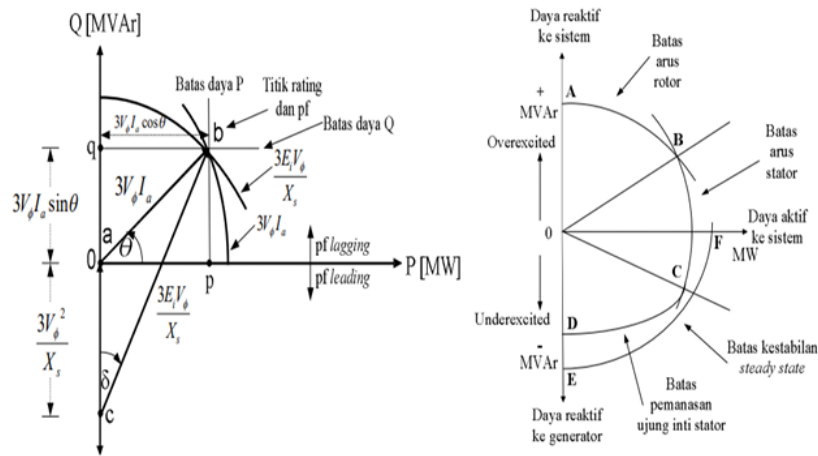
mungkin terjadi karena letak beban yang jauh dari pembangkit atau besarnya nilai pembebanan yang berubah-ubah sehingga nilai batas pembangkitan maksimum atau batas kestabilan steady state generator juga menjadi lebih kecil dari nilai yang diberikan pada kurva kapabilitas generator dari pabrikan. Apabila OPF dilakukan dengan menggunakan batasan kurva kapabilitas generator yang disediakan pabrikan generator, akan terjadi pembebanan yang melebihi batas kestabilan steady state generator tersebut yang dapat mengakibatkan ketidakstabilan dalam pengoperasian unit pembangkit yang dapat berakibat pada ketidakstabilan sistem pembangkit secara keseluruhan.

Pada kurva ini terdapat empat konstrain yang membatasi pengoperasian generator, yaitu :

1. Kemampuan maksimum prime mover, umumnya lebih kecil dari daya aktif maksimum yang dibatasi oleh arus stator generator.
2. Kemampuan maksimum dari eksitasi generator.
3. Kemampuan maksimum arus armature generator untuk menghasilkan daya.
4. Batas minimum dalam kondisi under eksitasi.

Kurva Kapabilitas Generator adalah kurva yang menjelaskan pola oprasi generator yang dilihat dari sisi beban yang diterima jaringan. Generator mampu menyerap atau memberikan daya reaktif, namun kemampuan ini dibatasi oleh kurva kapabilitas reaktif yang dimiliki oleh setiap generator. Jika generator memberikan atau mensuplai daya reaktif, bisa dikatakan generator bersifat kapasitif, namun jika eksitasinya berlebihan (*Over Excitation*) maka hal ini akan mengakibatkan panas yang berlebihan pada lilitan rotornya, dan jika generator menyerap daya reaktif, bisa dikatakan generator bersifat induktif, namun jika eksitasinya kurang (*Under Excitation*) maka hal ini akan mengakibatkan panas yang berlebihan pada lilitan statornya. Kondisi *Over Excitation* dan *Under Excitation* pada saat pengoperasian harus dihindari, seperti disebutkan diatas dan efek domino yang diakibatkan tidaklah kecil, karena pemanasan yang berlebihan dapat mengakibatkan kerusakan laminasi dari lilitan-lilitan tersebut dan jika lilitan dari laminasi tersebut rusak maka tidak menutup kemungkinan akan terjadi hubung singkat antar fasa atau dengan body generator [43].

Contoh kurva kapabilitas



Gambar 2. 22 Diagram Kurva Kapabilitas

Keterangan gambar 2.22:

$3V\phi I_a \cos \Theta$: Batas daya aktif [MW]

$3V\phi I_a \sin \Theta$: Batas daya reaktif [MVar]

$3V\phi I_a$: Batas arus stator [A]

$\frac{3 E_i V \phi}{X_s}$: Batas arus rotor [A]

Titik b : Rating generator [MVA]

Batas kemampuan operasi generator dalam mengirim daya ke sistem digambarkan seperti pada gambar 2.22 yang menunjukkan batas-batas berikut [41]:

2.5.1 Batas Daya Generator

Daya aktif (P) generator dihasilkan dengan mengatur kecepatan penggerak mula generator (prime mover). Batas daya aktif generator dinyatakan oleh :

$$P = 3V\phi I_a \cos \theta \dots\dots\dots(2.35)$$

Secara visual batas daya aktif generator ditunjukkan pada gambar 2.22:

1. Dengan menarik garis vertikal dari titik b ke p yang sejajar terhadap sumbu Q.

2. Jarak titik operasi sumbu daya aktif P (MW) dinyatakan oleh $3V\phi I_a \cos \Theta$.

Daya reaktif generator dihasilkan dengan mengatur sistem eksitasi generator, yakni arus penguat medan (I_f). Batas daya reaktif (Q) generator dinyatakan oleh :

$$Q = 3V\phi I_a \sin\theta \dots\dots\dots(2.36)$$

Secara visual batas daya reaktif generator ditunjukkan pada gambar 2.22:

1. Dengan menarik garis horizontal dari titik b ke q yang sejajar terhadap sumbu P.
2. Jarak titik operasi sumbu daya reaktif Q (MVA_r) dinyatakan oleh $3V\phi I_a \sin\Theta$. Batas daya kompleks atau daya rating generator dinyatakan oleh :

$$S = 3 V \phi I_a \dots\dots\dots(2.37)$$

Secara visual batas daya kompleks generator ditunjukkan pada gambar 2.22:

1. Titik b merupakan titik rating generator (MVA)
2. Jarak rating generator dinyatakan oleh $3V\phi I_a$

2.5.2 Batas Arus Stator (*Armature Current Limit*)

Arus jangkar / armature (I_a) yang mengalir pada belitan stator mengakibatkan rugi daya (I^2R). Rugi daya ini dapat mengakibatkan peningkatan suhu konduktor dan lingkungan terdekat. Jika dibiarkan, peningkatan suhu ini dapat terjadi secara terus menerus. Oleh karena itu, salah satu batasan dalam kerja generator yaitu besar arus maksimum yang dapat dibawa oleh jangkar tanpa melebihi batas pemanasan yang diizinkan.

Secara visual batas arus stator ditunjukkan pada gambar 2.22:

1. Digambarkan sebagai lingkaran $3V\phi I_a$
2. Pusat titik lingkaran : pada titik a (0,0)
3. Panjang jari-jari lingkaran : panjang garis a-b = $3V\phi I_a$, merupakan rating generator.

2.5.3 Batas Arus Rotor (*Field Current Limit*)

Akibat adanya pemanasan yang dihasilkan dari rugi-rugi tembaga pada belitan rotor, maka arus rotor juga menentukan batas dalam operasi generator. Batas arus rotor dipengaruhi oleh arus eksitasi. Dimana arus eksitasi dapat dipertahankan konstan dengan mempertahankan arus searah I_f di belitan medan konstan. Secara visual batas arus rotor ditunjukkan pada gambar 2.22:

1. Digambarkan sebagai lingkaran : $\frac{3 E_i V \phi}{X_s}$
2. Pusat titik lingkaran: pada titik c: $(0, -\frac{3V^2\phi}{X_s})$
3. Panjang jari-jari lingkaran: panjang garis c-b : $(0, -\frac{3E_i V \phi}{X_s})$

2.5.4 Batas Pemanasan Ujung Inti Stator (*Stator-End Region Heating Limit*)

Pemanasan ujung inti stator menentukan batas operasi generator dalam daerah eksitasi lemah (daerah dibawah sumbu P). Pemanasan ujung inti stator disebabkan oleh fluks bocor di celah udara. Fluks bocor tersebut merupakan hasil penjumlahan vektor fluks arus beban di belitan stator dan fluks arus searah pada belitan rotor. Sebagian besar fluks bocor melewati celah udara antara belitan stator dan rotor dan sebagian kecil fluks bocor tetap berada pada bagian akhir dari belitan stator.

Pada saat generator beroperasi dalam kondisi eksitasi lebih maka arus medan tinggi, sehingga di cincin penahan (*retaining ring*) akan mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang kecil. Pada saat beroperasi dalam kondisi eksitasi lemah maka arus medan kecil, sehingga di cincin penahan tidak mengalami saturasi dan menghasilkan fluks bocor yang tinggi.

Batas pemanasan ujung inti stator (*stator end region heating limit*) digambarkan sebagai lingkaran C-D pada gambar 2.22:

1. Pusat lingkaran : $(0, K_1 \frac{V \phi^2}{X_s})$
2. Jari-jari lingkaran : $(K_2 \frac{V \phi}{X_d})$

Dimana :

$$K1 = - \frac{(NaNf - N^2f)}{N^2a + N^2f - 2NaNf} \dots\dots\dots (2.38)$$

$$K2 = \sqrt{\frac{\Delta T}{Kt(N^2f + N^2a - 2NaNf)}} \dots\dots\dots (2.39)$$

Keterangan :

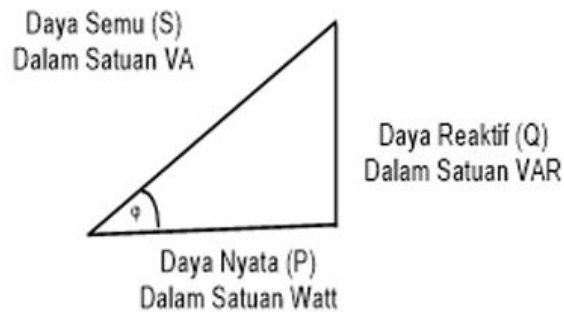
Na dan Nf : jumlah belitan stator dan rotor

ΔT : suhu maksimum yang diijinkan pada bagian ujung inti stator dan rotor (end core region).

K1 : konstanta penghubung pemanasan dengan fluks magnetic.

2.6 Segitiga Daya

Daya listrik didefinisikan sebagai kecepatan aliran energi listrik pada satu titik jaringan listrik tiap satu satuan waktu. Dengan satuan watt atau Joule per detik dalam SI, daya listrik menjadi besaran terukur adanya produksi energi listrik oleh pembangkit, maupun adanya penyerapan energi listrik oleh beban listrik. Daya listrik menjadi pembeda antara beban dengan pembangkit listrik, dimana beban listrik bersifat menyerap daya sedangkan pembangkit listrik bersifat mengeluarkan daya. Berdasarkan kesepakatan universal, daya listrik yang mengalir dari rangkaian masuk ke komponen listrik bernilai positif. Sedangkan daya listrik yang masuk ke rangkaian listrik dan berasal dari komponen listrik, maka daya tersebut bernilai negatif. Sebenarnya, daya listrik terbagi menjadi 3 jenis yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya semu. Daya nyata disimbolkan dengan P, daya reaktif disimbolkan dengan Q dan daya semu disimbolkan dengan S [44].



Gambar 2. 23 Segitiga Daya

Gambar 2.23 menggambarkan daya nyata (P) sebagai sisi horizontal dan dinyatakan dalam satuan Watt (W). Daya nyata adalah daya yang benar-benar digunakan oleh beban untuk melakukan kerja, seperti menghasilkan panas, cahaya, atau energi mekanik. Daya reaktif (Q) ditunjukkan sebagai sisi vertikal dan dinyatakan dalam satuan Volt Ampere Reaktif (VAR). Daya reaktif merupakan daya yang tidak digunakan secara langsung, melainkan dipertukarkan bolak-balik antara sumber dan beban untuk membentuk medan magnet atau medan listrik, seperti pada beban induktif dan kapasitif. Daya semu (S) digambarkan sebagai sisi miring segitiga dan dinyatakan dalam satuan Volt Ampere (VA). Daya semu merupakan hasil kombinasi antara daya nyata dan daya reaktif, serta menunjukkan total daya yang harus disuplai oleh sumber. Sudut ϕ (phi) pada gambar adalah sudut fasa antara tegangan dan arus. Besarnya sudut ini menentukan faktor daya ($\cos \phi$), yaitu perbandingan antara daya nyata dan daya semu. Hubungan matematis dari segitiga daya dapat dinyatakan sebagai [45]:

Dimana :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ (VA)} \dots\dots\dots(2.40)$$

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \text{ (W)} \dots\dots\dots(2.41)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ (VAR)} \dots\dots\dots(2.42)$$

2.6.1 Daya Nyata / Aktif (P)

Secara sederhana, daya nyata adalah daya yang dibutuhkan oleh beban resistif. Daya nyata menunjukkan adanya aliran energi listrik dari pembangkit listrik ke jaringan beban untuk dapat dikonversikan menjadi energi lain. Sebagai contoh, daya nyata yang digunakan untuk menyalakan kompor listrik. Energi listrik yang mengalir dari jaringan dan masuk ke kompor listrik, dikonversikan menjadi energi panas oleh elemen pemanas kompor tersebut. Rumus untuk daya aktif pada sistem 3 fasa yaitu [46]:

$$P = \sqrt{3} \times I \times V \times \cos \phi \dots\dots\dots(2.43)$$

Keterangan :

P = Daya aktif (Watt)

V= Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Amper)

Cos ϕ = Faktor daya

2.6.2 Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif memiliki satuan (VAR). Secara sederhana, daya reaktif adalah daya yang dibutuhkan untuk membangkitkan medan magnet di kumparan-kumparan beban induktif. Seperti pada motor listrik induksi misalnya, medan magnet yang dibangkitkan oleh daya reaktif di kumparan stator berfungsi untuk menginduksi rotor sehingga tercipta medan magnet induksi pada komponen rotor. Pada trafo, daya reaktif berfungsi untuk membangkitkan medan magnet pada kumparan primer, sehingga medan magnet primer tersebut menginduksi kumparan sekunder. Daya reaktif diserap oleh beban-beban induktif, namun justru dihasilkan oleh beban kapasitif.

Daya reaktif adalah daya imajiner yang menunjukkan adanya pergeseran grafik sinusoidal arus dan tegangan listrik AC akibat adanya beban reaktif. Daya reaktif memiliki fungsi yang sama dengan faktor daya atau juga bilangan $\cos \phi$. Daya reaktif ataupun faktor daya akan memiliki nilai ($\neq 0$) jika terjadi pergeseran

grafik sinusoidal tegangan ataupun arus listrik AC, yakni pada saat beban listrik AC bersifat induktif ataupun kapasitif. Sedangkan jika beban listrik AC bersifat murni resistif, maka nilai dari daya reaktif akan nol ($=0$). Rumus untuk daya reaktif pada sistem 3 fasa yaitu [46]:

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \phi \dots\dots\dots(2.44)$$

Keterangan :

Q = Daya reaktif (VAR)

V= Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Amper)

Sin ϕ = Faktor daya

2.6.3 Daya Semu

Daya semu atau daya total (S), ataupun juga dikenal dalam Bahasa Inggris Apparent Power, adalah hasil perkalian antara tegangan efektif (root-mean-square) dengan arus efektif (root-mean-square). Rumus untuk daya semu pada sistem 3 fasa yaitu [46]:

$$S = \sqrt{3} \times V_{RMS} \times I_{RMS} \dots\dots\dots(2.45)$$

Keterangan :

S = Daya semu (VA)

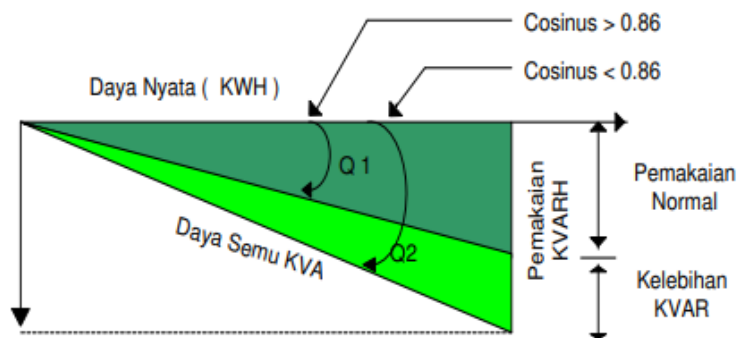
V_{RMS} = Tegangan efektif (root-mean-square)(Volt)

I_{RMS} = Arus efektif (root-mean-square)(Ampere)

2.7 Faktor Daya

Faktor daya atau faktor kerja adalah perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu/daya total (VA), atau sudut fasa antara daya aktif dan daya semu/daya total. Semakin tinggi faktor daya maka efektifitas dari alat-alat listrik akan semakin baik dan sebaliknya semakin rendah faktor daya berdampak pada rendahnya efektifitas dari alat-alat listrik. Faktor daya sangat besar pengaruhnya

terhadap kualitas dari sumber listrik dan kinerja dari alat-alat listrik. Akibat pemakaian KVARH yang tinggi menyebabkan pembentukan sudut faktor daya yang besar. Hasil dari melebarnya sudut daya tersebut berdampak pada rendahnya nilai faktor daya, kerugian-kerugian terhadap daya listrik dan menurunnya daya kerja efektif dari sumber listrik. Faktor daya yang lebih rendah dari $< 0,99$ atau $0,86$ menurunkan efisiensi kerja alat listrik. Daya kerja (KW) tidak dapat berkerja secara optimal atau sebanding dengan daya yang tersedia. Hal ini diperlihatkan pada Gambar 2.24 [47].



Gambar 2. 24 Sudut Faktor Daya

Faktor daya ($\cos \phi$) dapat didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara daya aktif (Watt) dan daya semu (VA) yang digunakan dalam listrik arus bolak balik (AC) atau beda sudut fasa antara V dan I yang biasanya dinyatakan dalam $\cos \phi$ [45].

$$\text{Faktor Daya} = \frac{\text{Daya Aktif (P)}}{\text{Daya Semu (S)}} \dots\dots\dots (2.46)$$

Maka :

$$\begin{aligned} &= \frac{V.I.\cos\phi}{V.I} \\ &= \cos\phi \end{aligned}$$

Faktor daya menggambarkan sudut phasa antara daya aktif dan daya semu yang terdapat pada segitiga daya. Faktor daya juga merupakan besar nilai yang didapati dari hasil perbandingan antara nilai daya aktif dengan nilai daya semu yang ada dalam sebuah rangkaian listrik.

Pada suatu sistem tenaga listrik memiliki 3 jenis faktor daya yaitu :

1. Faktor daya bernilai satu (*unity*): keadaan saat nilai $\cos \theta$ adalah bernilai satu dan tegangan sumber sefasa dengan arus ke beban. Faktor daya unity akan terjadi bila jenis beban adalah resistif murni.
2. Faktor daya mendahului (*leading*): keadaan faktor daya saat memiliki kondisi beban listrik yang beban bersifat kapasitif.
3. Faktor daya terbelakang (*lagging*): keadaan faktor daya saat memiliki kondisi beban atau peralatan listrik memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif.

Sementara itu, beban listrik terdiri dari dua jenis yaitu beban linear dan beban nonlinear. Suatu beban disebut linear bila arusnya berbanding lurus terhadap tegangan sehingga bentuk gelombang arus yang mengalir ke beban akan sama dengan bentuk gelombang tegangan dari sumber. Sedangkan untuk beban nonlinear, bentuk gelombang arus tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan [48].

2.7.1 Faktor Daya Bernilai Satu (*Unity*)

Faktor daya unity adalah keadaan saat nilai $\cos \phi$ adalah satu dan tegangan se fasa dengan arus. Faktor daya unity akan terjadi bila jenis beban adalah resistif murni.

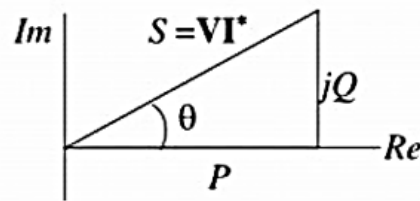


Gambar 2. 25 Arus sefasa dengan tegangan

Gambar 2.25 terlihat nilai $\cos \phi$ sama dengan 1 yang menyebabkan jumlah daya nyata yang dikonsumsi beban sama dengan daya semu [41].

2.7.2 Faktor Daya Mendahului (*Leading*)

Faktor daya mendahului (*leading*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi beban atau peralatan listrik memberikan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat kapasitif. Apabila arus mendahului tegangan maka faktor daya ini dikatakan “*leading*”.

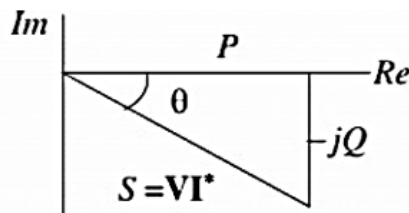


Gambar 2. 26 Arus mendahului tegangan sebesar sudut phi

Gambar 2.26 tersebut menggambarkan bahwa arus mendahului tegangan maka daya reaktif tertinggal dari daya semu, berarti beban memberikan daya reaktif kepada sistem [41].

2.7.3 Faktor Daya Terbelakang (*Lagging*)

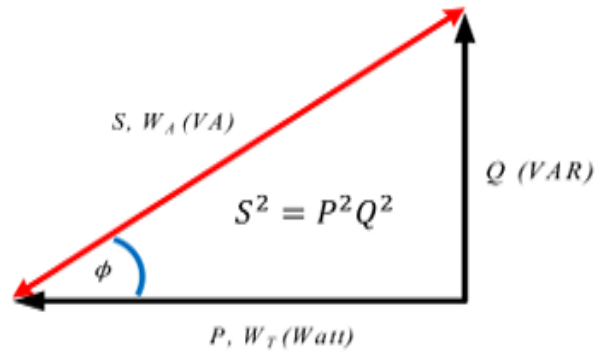
Faktor daya terbelakang (*lagging*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi beban atau perlatan listrik memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif. Apabila tegangan mendahului arus, maka faktor daya ini dikatakan “*lagging*”.



Gambar 2. 27 Tegangan mendahului arus sebesar sudut phi

Gambar 2.27 menggambarkan bahwa arus tertinggal dari tegangan maka daya reaktif mendahului daya semu, berarti beban membutuhkan atau menerima daya reaktif dari sistem [41].

Dan ketiga pengelompokan faktor daya dapat dianalogikan dengan menggambarannya dalam bentuk segitiga daya, maka daya tampak S direpresentasikan oleh sisi miring sedangkan daya nyata dan daya reaktif direpresentasikan oleh sisi-sisi segitiga yang saling tegak lurus, seperti ditunjukkan pada gambar 2.28 [41]:



Gambar 2. 28 Diagram daya

Maka daya nyata atau daya aktif dan daya reaktif dapat diambil saja dari bagian real dan bagian imajiner dari S [41].

Daya nyata $P = V \times I \times \cos \phi$ (2.47)

Daya Reaktif $Q = V \times I \times \sin \phi$ (2.48)

2.8 Regulasi Tegangan

Jika pada sebuah generator dilakukan pengukuran tegangan dalam keadaan tanpa beban dan berbeban, ternyata terdapat perbedaan dari hasil pengukuran tersebut. Dimana terlihat bahwa dengan berubahnya beban maka tegangan terminal dari generator juga akan berubah. Perubahan besarnya (magnitude) tegangan tidak hanya tergantung dari besarnya beban, tetapi juga dipengaruhi $\cos \phi$ beban.

Pengaturan tegangan (voltage regulation) dari suatu generator sinkron dapat didefinisikan sebagai perubahan tegangan terminal dari beban nol (no-load) ke beban penuh (full-load) dengan menjaga eksitasi medan dan putaran tetap, dibagi dengan tegangan beban penuh (full-load). Dimana tegangan pada terminal dari generator sinkron tergantung dari beban yang terpasang dan juga faktor daya (power factor) beban tersebut. Pengaturan tegangan ini dinyatakan dalam persen (%) dari tegangan nominal dan perbedaan tegangan bukan secara vector.

Regulasi tegangan dari generator dapat ditentukan dengan menggunakan formula sebagai berikut :

$\% V reg = \frac{v_{nl}-v_l}{v_l} \times 100\%$(2.49)

Dimana :

V_{reg} = Regulasi Tegangan

V_{nl} = Tegangan Induksi

V_l = Tegangan Terminal [volt]

Analisa tentang regulasi tegangan diperlukan agar diketahui secara pasti bagaimana kinerja tegangan output generator induksi saat dibebani sehingga diketahui seberapa stabil tegangan dari generator saat dilaksanakan variasi besar dan jenis pembebanan generator [49].

2.9 Sistem Eksitasi Generator Sinkron

Eksitasi adalah bagian dari sistem dari generator yang berfungsi membentuk/menghasilkan fluksi yang berubah terhadap waktu, sehingga dihasilkan satu GGL induksi. Setelah generator AC mencapai kecepatan nominal, medannya dieksitasi dari catu DC. Ketika kutub lewat di bawah konduktor jangkar, fluksi medan yang memotong konduktor menginduksikan GGL pada konduktor jangkar. Besarnya GGL yang dibangkitkan tergantung pada laju pemotongan garis gaya (kecepatan rotor) dan kuat medan. Karena generator kebanyakan berkerja pada kecepatan konstan, maka besarnya GGL yang dibangkitkan menjadi bergantung pada eksitasi medan. Eksitasi medan dapat langsung dikendalikan dengan mengubah besarnya tegangan eksitasi yang dikenakan pada kumparan medan generator [23].

Eksitasi pada generator sinkron adalah proses penguatan medan magnet dengan cara memberikan arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Sesuai dengan prinsip el-ektromagnet yaitu apabila suatu konduktor berupa kumparan dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet sehingga akan menghasilkan fluksfluks magnet. Apabila kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan medan yang telah diberi arus eksitasi diputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar yang terdapat pada stator akan terinduksi oleh fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan sehingga dihasilkan tegangan listrik bolakbalik.

Besarnya tegangan yang dihasilkan tergantung kepada besarnya arus eksitasi dan putaran yang diberikan pada rotor, semakin besar arus eksitasi dan putaran, maka akan semakin besar tegangan yang akan dihasilkan oleh sebuah generator [50].

Sistem eksitasi merupakan suatu proses penguatan medan magnet dengan cara memberikan arus searah (DC) ke belitan medan pada rotor generator sinkron. Secara umum ketika suatu konduktor berupa kumparan dialiri arus searah (DC), maka kumparan tersebut akan menjadi magnet yang nantinya akan menghasilkan fluks magnet. Ketika kumparan medan sudah diberi arus searah yang didapat dari arus eksitasi dan berputar dengan kecepatan tertentu, maka kumparan jangkar stator generator akan terinduksi dari fluks-fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan, sehingga akan menghasilkan tegangan listrik bolak-balik (AC). Tegangan yang dihasilkan oleh generator sangat tergantung dari besarnya arus eksitasi dan putaran rotor, hal ini dikarenakan semakin besar arus eksitasi dan putaran yang diberikan, maka akan semakin besar tegangan yang dihasilkan oleh generator [51].

Sistem eksitasi mempunyai berbagai fungsi. Fungsi tersebut antara lain :

1. Mengatur tegangan keluaran generator agar tetap konstan (stabil).
2. Mengatur besarnya daya reaktif.
3. Menekan kenaikan tegangan pada pelepasan beban (load rejection).

Karena mempunyai fungsi seperti di atas maka sistem eksitasi harus mempunyai sifat antara lain:

1. Mudah dikendalikan.
2. Dapat mengendalikan dengan stabil/ sifat pengendalian stabil.
3. Mempunyai respon/tanggapan yang cepat.
4. Tegangan yang dikeluarkan harus sama dengan tegangan yang diinginkan.

Sistem yang banyak digunakan saat ini baik dengan generator sinkron tipe kutub sepatu (salient pole) maupun tipe rotor silinder (non-salient pole) adalah sistem tanpa sikat. Pengeksitasi ac mempunyai jangkar yang berputar, keluarannya kemudian disearahkan oleh penyearah dioda silikon yang juga dipasang pada poros utama.

Keluaran yang telah disearahkan dari pengeksitasi ac, diberikan langsung dengan hubungan yang diisolasi sepanjang poros ke medan generator sinkron yang berputar. Keluaran dari pengeksitasi ac, dan berarti tegangan yang dibangkitkan oleh generator sinkron, dapat dikendalikan dengan mengubah kekuatan medan pengeksitasi ac. Jadi sistem eksitasi tanpa sikat tidak mempunyai komutator, cincin-slip atau sikat-sikat yang sangat menyederhanakan pemeliharaan mesin.

Setelah generator ac mencapai kepesatan yang sebenarnya oleh penggerak mulanya, medannya dieksitasi dari catu dc. Ketika kutub lewat di bawah konduktor jangkar yang berada pada stator, fluksi medan yang memotong konduktor menginduksikan ggl kepadanya. Ini adalah ggl bolak-balik, karena kutub dengan polaritas yang berubah-ubah terusmenerus melewati konduktor tersebut. Karena tidak menggunakan komutator, ggl bolak-balik yang dibangkitkan keluar pada terminal lilitan stator. Besarnya ggl yang dibangkitkan bergantung pada laju pemotongan garis gaya, atau dalam hal generator, besarnya ggl bergantung pada kuat medan dan kepesatan konstan, maka besarnya ggl yang dibangkitkan menjadi bergantung pada eksitasi medan. Ini berarti bahwa besarnya ggl yang dibangkitkan dapat dikendalikan dengan mengatur besarnya eksitasi medan yang dikenakan pada medan generator. Sistem ini merupakan sistem yang vital pada proses pembangkitan listrik karena sistem eksitasi adalah awal dari pembangkitan listrik [41].

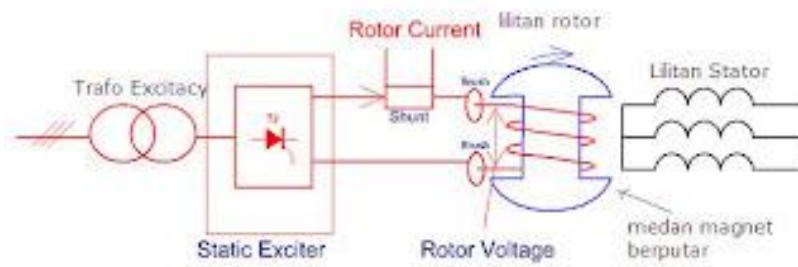
Secara umum dalam penyaluran sistem arus searah pada rotor, sistem eksitasi terbagi atas dua jenis yaitu :

1. Sistem eksitasi menggunakan sikat (*brush excitation*)
2. Sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*)

2.9.1 Sistem Eksitasi Menggunakan Sikat (*Brush Excitation*)

Pada Sistem Eksitasi menggunakan sikat, sumber tenaga listriknya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan rectifier. Jika menggunakan sumber listrik listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan Permanent Magnet Generator (PMG) medan magnetnya adalah magnet permanent. Dalam

lemari penyearah, tegangan listrik arus bolak balik diubah atau disearahkan menjadi tegangan arus searah untuk mengontrol kumparan medan eksiter utama (main exciter). Untuk mengalirkan arus Eksitasi dari main exciter ke rotor generator menggunakan slip ring dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari pilot exciter ke main exciter seperti pada gambar 2.29 [51].



Gambar 2. 29 Skema Sistem Eksitasi Menggunakan Sikat (Brush Excitation)

2.9.1.1 Sistem Eksitasi Konvensional

Untuk sistem eksitasi yang konvensional, arus searah diperoleh dari sebuah generator arus searah berkapasitas kecil yang disebut dengan eksiter. Generator arus searah tersebut terkopel dengan generator sinkron dalam satu poros, sehingga putaran generator arus searah sama dengan putaran generator sinkron. Tegangan yang dihasilkan oleh eksiter diberikan ke belitan rotor generator sinkron melalui sikat karbon dan slip ring. Akibatnya arus searah mengalir ke rotor dan menimbulkan medan magnet yang dibutuhkan untuk menghasilkan tegangan arus bolak-balik pada kumparan utama yang terletak di stator generator sinkron.

2.9.1.2 Sistem Eksitasi Statis

Sistem eksitasi statis merupakan sistem eksitasi yang menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak (static), yang berarti peralatan eksitasi tersebut tidak ikut berputar bersama dengan rotor generator sinkron. Sistem eksitasi statis (static excitation system) ini biasa disebut juga dengan self excitation yang merupakan sistem eksitasi yang tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi generator sinkron tersebut. Sumber eksitasi pada sistem eksitasi statis ini berasal dari tegangan output generator itu sendiri yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan penyearah thyristor.

Pada mulanya pada rotor terdapat sedikit sisa magnet, magnet sisa ini akan menimbulkan tegangan pada stator, tegangan ini akan masuk dalam penyearah dan dimasukkan kembali ke rotor. Akibatnya medan magnet yang dihasilkan makin besar dan tegangan AC akan naik. Biasanya penyearah itu juga mempunyai pengatur yang dilakukan oleh peralatan yang disebut dengan AVR (Automatic Voltage Regulator).

Sistem eksitasi statis, apabila dibandingkan dengan sistem eksitasi konvensional memang sudah jauh lebih baik karena tidak ada generator arus searah (yang keandalannya rendah) dan beban pada penggerak utama berupa generator arus searah dihilangkan. Pada sistem eksitasi statis ini, untuk keperluan eksitasi awal pada generator sinkron saat belum mampu menghasilkan tegangan keluaran, maka energi yang digunakan untuk sistem eksitasi diambil dari baterai. Dan proses ini dinamakan dengan proses field flashing. Di mana pada proses field flashing ini baterai menginjeksikan arus eksitasi ke rotor generator. Hal ini dibutuhkan karena generator sinkron tidak memiliki sumber arus dan tegangan sendiri untuk mensuplai kumparan medan. Dengan adanya arus eksitasi ini maka generator akan menghasilkan tegangan keluaran [51].

2.9.2 Sistem Eksitasi Tanpa Menggunakan Sikat (*Brushless Excitation*)

Sistem eksitasi tanpa menggunakan pilot exciter dan sistem penyaluran arus eksitasi ke rotor generator utama. Pilot exciter terdiri dari sebuah generator arus bolak-bali bolak-balik dengan magnet permanen yang terpasang pada poros rotor dan kumparan tiga fasa pada stator [29].

Generator penguat pertama disebut pilot exciter dan generator penguat kedua disebut main exciter (penguat utama). Main exciter adalah generator arus bolak-balik dengan kutub pada statornya. Rotor menghasilkan arus bolak-balik disearahkan dengan dioda yang berputar pada poros main exciter (satu poros dengan generator utama). Arus searah yang dihasilkan oleh dioda berputar menjadi arus penguat generator utama. Pilot exciter pada generator arus bolak-balik dengan rotor berupa kutub magnet permanen yang berputar menginduksi pada lilitan stator. Tegangan bolak-balik disearahkan oleh penyearah dioda dan menghasilkan arus searah yang dialirkan ke kutub-kutub magnet yang ada pada stator main exciter.

Besar arus searah yang mengalir ke kutub main exciter diatur oleh pengatur tegangan otomatis (automatic voltage regulator/AVR).

Besarnya arus berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan main exciter, maka besarnya arus main exciter juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama.

Pada sistem Eksitasi tanpa sikat, permasalahan timbul jika terjadi hubung singkat atau gangguan hubung tanah di rotor dan jika ada sekering lebur dari dioda berputar yang putus, hal ini harus dapat dideteksi. Gangguan pada rotor yang berputar dapat menimbulkan distorsi medan magnet pada generator utama dan dapat menimbulkan vibrasi (getaran) berlebihan pada unit pembangkit.

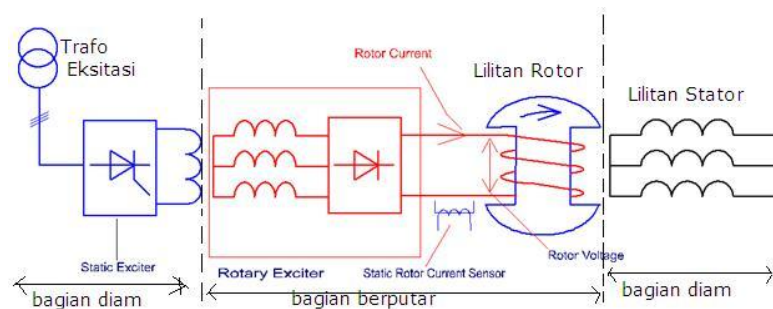
Pada sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada farnish akibat sikat arang. Mengurangi kerusakan (*trouble*) akibat udara buruk (*bad atmosphere*) sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup. Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung kontinupada waktu yang lama. Pemutus medan generator (*generator field breaker*), field generator dan bus exciter atau kabel tidak diperlukan lagi. Biaya pondasi berkurang, sebab aluran udara dan bus exciter atau kabel tidak memerlukan pondasi[30].

Penggunaan sikat atau slip ring untuk menyalurkan arus excitasi ke rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*).

Keuntungan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*), antara lain adalah :

1. Energi yang diperlukan untuk Eksitasi diperoleh dari poros utama (*main shaft*), sehingga keandalannya tinggi.
2. Biaya perawatan berkurang karena pada sistem Eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terdapat sikat, komutator dan slip ring.

3. Pada sistem Eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada farnish akibat sikat arang.
4. Mengurangi kerusakan (*trouble*) akibat udara buruk (*bad atmosphere*) sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup
5. Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.
6. Pemutus medan generator (*Generator field breaker*), field generator dan bus exciter atau kabel tidak diperlukan lagi.
7. Biaya pondasi berkurang, sebab saluran udara dan bus exciter atau kabel tidak memerlukan pondasi.



Gambar 2. 30 Skema Sistem Eksitasi Tanpa Menggunakan Sikat (*Brushless Excitation*)

Gambar 2.30 menggambarkan sistem eksitasi generator sinkron tipe brushless yang berfungsi untuk menyediakan arus eksitasi pada rotor generator tanpa menggunakan sikat (brush). Sistem ini terdiri dari bagian diam dan bagian berputar yang saling terintegrasi untuk menghasilkan medan magnet pada rotor generator utama. Pada bagian diam, trafo eksitasi (static exciter) berfungsi sebagai sumber tegangan awal yang diambil dari sistem atau terminal generator. Tegangan AC yang dihasilkan kemudian disalurkan menggunakan rangkaian dioda sehingga menghasilkan arus DC. Arus DC ini selanjutnya disalurkan ke lilitan medan pada exciter yang berada di bagian berputar. Pada bagian berputar, rotary exciter bekerja dengan memanfaatkan arus DC dari static exciter untuk membangkitkan medan magnet. Medan magnet ini menginduksikan tegangan AC pada lilitan jangkar exciter. Tegangan AC yang dihasilkan kemudian disalurkan kembali oleh

penyearah putar (*rotating rectifier*) yang terpasang pada rotor. Hasil penyearahan ini berupa arus DC yang disebut sebagai arus rotor, yang langsung digunakan untuk mengalir lilitan rotor generator utama. Selanjutnya, arus DC pada lilitan rotor menghasilkan medan magnet berputar yang kuat. Medan magnet ini memotong lilitan stator generator yang berada pada bagian diam, sehingga melalui prinsip induksi elektromagnetik dihasilkan tegangan listrik AC pada stator sebagai keluaran generator. Selain itu, pada sistem ini juga dilengkapi dengan sensor arus dan tegangan rotor yang berfungsi untuk memantau kondisi eksitasi. Informasi dari sensor tersebut digunakan oleh Automatic Voltage Regulator (AVR) untuk mengatur besar kecilnya arus eksitasi sehingga tegangan keluaran generator tetap stabil [30].

2.9.2.1 Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Baterai

Sistem eksitasi tanpa sikat diaplikasikan pada generator sinkron, sebagaimana suplai arus searah ke belitan medan dilakukan tanpa melalui sikat. Arus searah yang digunakan untuk suplai eksitasi start awal generator menggunakan suplai dari baterai, dimana arus ini selanjutnya disalurkan ke belitan medan AC eksiter. Tegangan keluaran dari generator sinkron ini disearahkan oleh penyearah yang menggunakan dioda, yang disebut *rotating rectifier*, yang diletakkan pada bagian poros ataupun pada bagian dalam rotor generator sinkron, sehingga *rotating rectifier* tersebut ikut berputar sesuai dengan putaran rotor.

2.9.2.2 Sistem Eksitasi dengan Menggunakan Permanent Magnet Generator (PMG)

Suatu generator sinkron harus memiliki sebuah medan magnet yang berputar agar generator tersebut menghasilkan tegangan pada statornya. Medan magnet ini dapat dihasilkan dari belitan rotor yang disuplai dengan sumber listrik arus searah. Cara lain untuk menghasilkan medan magnet pada rotor adalah dengan menggunakan magnet permanen sebagai sumber eksitasinya ini disebut dengan Permanen Magnet Generator.

Pada rotor terdapat magnet permanen, kumparan jangkar generator eksitasi, kumparan medan generator utama. Hal ini memungkinkan generator tersebut tidak menggunakan slip ring dan sikat dalam pengoperasiannya sehingga lebih efektif

dan efisien. Permanent Magnet Generator akan berputar ketika rotor berputar, karena telah terhubung pada satu sumbu atau poros. PMG di sini berfungsi untuk membangkitkan tegangan atau arus AC yang selanjutnya disearahkan dan dimasukkan ke AVR untuk diatur dan dikontrol. Dikarenakan tegangan atau arus AC pada PMG sangat kecil, maka arus AC yang telah disearahkan dimasukkan ke eksiter yang bertujuan untuk membangkitkan tegangan AC yang lebih besar. Arus keluaran dari eksiter kemudian akan disearahkan menggunakan rotating diode. Dan selanjutnya arus eksitasi diinjeksikan ke rotor sehingga terdapat medan magnet pada generator yang akhirnya menimbulkan fluks listrik yang menghasilkan tegangan keluaran pada generator [51].

2.10 Paralel Generator Sinkron

Dewasa sekarang ini, menemukan generator sinkron yang bekerja secara independen sangat jarang ditemukan. Untuk pengaplikasian generator sinkron ini biasanya terdapat lebih dari satu generator yang mensuplay daya yang dibutuhkan beban. Situasi generator sinkron bekerja secara independen biasanya Cuma dapat ditemukan pada beberapa aplikasi *out-of-the-way* seperti generator darurat. Contoh ekstrim dari situasi ini adalah jaringan listrik Amerika, dimana ribuan generator berbagi beban pada sistemnya [33].

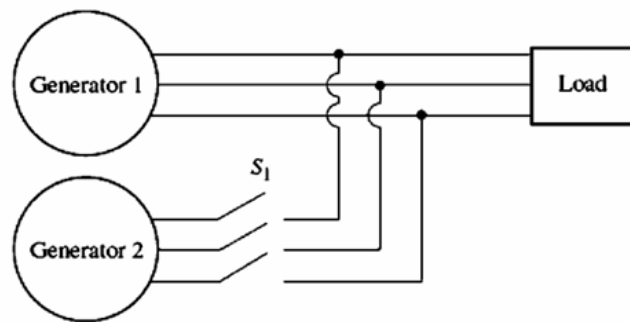
Mengapa generator sinkron dioperasikan secara paralel? Ada beberapa keuntungan utama dari pengoperasian tersebut :

1. Beberapa generator dapat menyuplai beban yang lebih besar daripada satu mesin saja.
2. Memiliki banyak generator akan meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik, karena kegagalan salah satu generator tidak menyebabkan hilangnya daya total pada beban.
3. Memiliki banyak generator yang beroperasi secara paralel memungkinkan satu atau lebih generator dipindahkan untuk dimatikan dan dapat dilakukan pemeliharaan preventif pada generator yang tidak digunakan.
4. Jika hanya satu generator yang digunakan dan tidak beroperasi mendekati beban penuh, maka akan relatif tidak efisien. Dengan beberapa mesin yang kecil secara paralel, dimungkinkan untuk mengoperasikan hanya sebagian

kecil dari mesin tersebut. Mesin yang beroperasi akan beroperasi mendekati beban penuh dan dengan demikian lebih efisien.

Untuk memenuhi kebutuhan pelayanan energi listrik pada beban, maka dilakukan paralel generator sinkron untuk peningkatan kapasitas daya dan keandalan sistem tenaga. Terdapat beberapa syarat yang harus terpenuhi untuk memparalel beberapa generator sinkron dalam 1 sistem distribusi yaitu kesamaan dalam hal nilai tegangan, frekuensi, dan urutan fasa. Sedangkan dalam praktiknya terdapat batas toleransi (ketidaksamaan nilai) yang dibolehkan yaitu beda tegangan 5%, 0,2% beda frekuensi, dan 5o beda sudut [52].

2.10.1 Syarat – Syarat Paralel Generator Sinkron

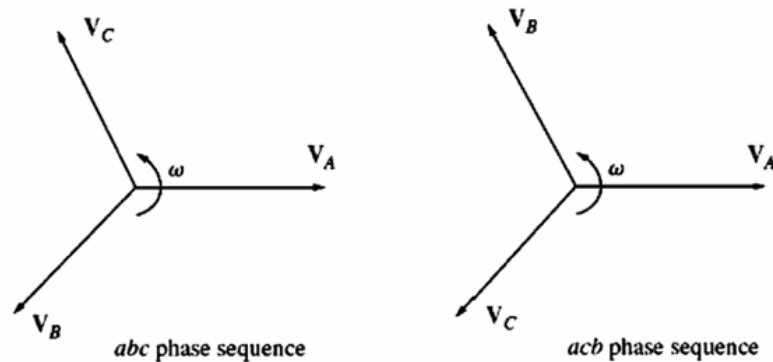


Gambar 2. 31 Sebuah generator diparalelkan dengan sistem tenaga yang sedang berjalan

Gambar 2.31 menunjukkan sebuah generator sinkron G1 menyuplai daya ke suatu beban, dengan generator G2 yang lain akan diparalelkan dengan G1 dengan menutup saklar S1. Kondisi apa yang harus dipenuhi sebelum saklar dapat ditutup dan kedua generator dihubungkan? [33].

Jika saklar ditutup sembarangan pada suatu saat, generator dapat mengalami kerusakan parah, dan beban dapat kehilangan daya. Jika tegangan pada masing-masing penghantar yang diikat tidak sama persis, maka akan terjadi aliran arus yang sangat besar ketika saklar ditutup. Untuk menghindari masalah ini, masing-masing dari ketiga fasa harus mempunyai besar tegangan dan sudut fasa yang sama persis dengan konduktor yang dihubungkan. Dengan kata lain, tegangan pada fasa a harus sama persis dengan tegangan pada fasa a', dan seterusnya untuk fasa b-b' dan c-c'. Untuk mencapai kecocokan ini, kondisi paralel berikut harus dipenuhi :

1. Tegangan saluran RMS (Root Mean Square) dari kedua generator harus sama.
2. Dua generator harus mempunyai urutan fasa yang sama.
3. Sudut fasa dari masing masing fasa harus sama besar.
4. Frekuensi pertama generator baru yang akan diparalel harus sedikit lebih tinggi dari frekuensi sistem yang sedang berjalan.



Gambar 2. 32 Dua Kemungkinan Urutan Fasa dari Sistem Tiga Fasa

Gambar 2.32 menggambarkan bahwa kondisi paralel ini memerlukan beberapa penjelasan. Kondisi no. 1 jelas, yaitu agar dua set tegangan identik, tentu saja keduanya harus memiliki magnitudo tegangan rms yang sama. Tegangan pada fase a dan a' akan sepenuhnya identik setiap saat jika magnitudo dan sudutnya sama, yang menjelaskan kondisi 3 [33]. Kondisi 2 memastikan bahwa urutan puncak tegangan fasa pada kedua generator adalah sama. Jika urutan fasa berbeda (seperti ditunjukkan pada gambar 2.22), maka meskipun sepasang tegangan (fasa a) sefase, dua pasang tegangan lainnya berada di luar fasa sebesar tersebut sebesar 120° . Jika generator dihubungkan dengan cara ini, tidak akan ada masalah dengan fasa a, namun arus yang besar akan mengalir di fasa b dan c, sehingga merusak kedua generator. Untuk memperbaiki masalah urutan fasa, cukup tukar koneksi pada dua dari tiga fasa di salah satu generator [33].

Jika frekuensi generator tidak hampir sama ketika fasa dihubungkan bersamaan, transien daya yang besar akan terjadi sampai generator stabil pada frekuensi yang sama. Frekuensi kedua mesin harus hampir sama, namun tidak bisa sama persis. Perbedaannya harus sedikit sehingga sudut fasa mesin yang melaju

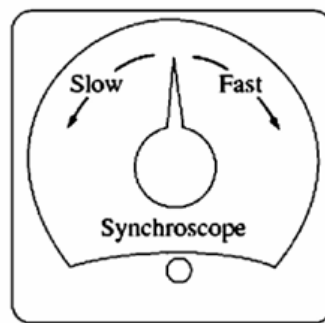
akan berubah secara perlahan terhadap sudut fasa sistem yang sedang berjalan. Dengan cara ini, sudut antara tegangan dapat diamati dan jaringan interkoneksi antar fasa dapat disatukan ketika sistem berada dalam fasa yang tepat [33].

2.10.2 Prosedur Umum Paralel Generator Sinkron

Berikut langkah-langkah yang harus dilakukan untuk melakukan penyambungan parallel yaitu :

1. Pertama, dengan menggunakan voltmeter, arus medan generator yang masuk harus disesuaikan hingga tegangan terminalnya sama dengan tegangan saluran sistem yang sedang berjalan.
2. Kedua, urutan fasa generator yang masuk harus dibandingkan dengan urutan fasa sistem yang sedang berjalan. Urutan fasa dapat diperiksa dengan beberapa cara berbeda. Salah satu caranya adalah dengan menghubungkan motor induksi kecil secara bergantian ke terminal masing-masing dari kedua generator. Jika motor berputar ke arah yang sama setiap kali, maka urutan fasa sama untuk kedua generator. Jika motor berputar ke arah yang berlawanan, maka urutan fasa berbeda, dan dua konduktor pada generator yang masuk harus dibalik. Di dunia industri sekarang sudah menggunakan Phase Rotation Indicator untuk menentukan arah urutan fasa dan masih banyak alat lain yang bias menentukan putaran fasa generator.
3. Selanjutnya, frekuensi generator yang akan dihubungkan diatur menjadi sedikit lebih tinggi dari frekuensi sistem yang sedang berjalan. Hal ini dilakukan terlebih dahulu dengan mengamati pengukur frekuensi hingga frekuensinya mendekati dan kemudian dengan mengamati perubahan fasa antar sistem. Generator yang akan dihubungkan diatur ke frekuensi yang sedikit lebih tinggi sehingga ketika dihubungkan, ia akan mengalir ke saluran yang menyuplai daya sebagai generator, untuk mencegah generator menjadi motor saat diparalelkan.

Bagaimana cara mengetahui kapan kedua sistem akhirnya sefase? Disini kita menggunakan sinkroskop. Sinkroskop adalah alat ukur yang mengukur perbedaan sudut fase antara fase kedua sistem. Tampilan sinkroskop ditunjukkan pada gambar 2.33.



Gambar 2. 33 *Synchroscope*

Dial menunjukkan perbedaan fasa antara kedua fasa, dengan 0 (artinya sefasa) di bagian atas dan 180° di bagian bawah. Karena frekuensi kedua sistem sedikit berbeda, sudut fasa pada meter berubah perlahan. Jika generator atau sistem yang akan datang lebih cepat daripada sistem yang sedang berjalan (situasi yang diinginkan), maka sudut fasa akan maju dan jarum sinkroskop berputar searah jarum jam. Jika mesin yang akan datang lebih lambat, jarum akan berputar berlawanan arah jarum jam. Ketika jarum sinkroskop berada pada posisi vertikal, tegangan berada dalam fasa, dan sakelar dapat dimatikan untuk menghubungkan sistem [33].

Namun, perhatikan bahwa sinkroskop hanya memeriksa hubungan pada satu fasa. Sinkroskop tidak memberikan informasi tentang urutan fasa.

Pada generator besar yang termasuk dalam sistem tenaga, seluruh proses penyambungan generator baru ke saluran diotomatiskan, dan komputer melakukan pekerjaan ini. Namun, untuk generator yang lebih kecil, operator secara manual melakukan langkah-langkah paralelisasi yang baru saja dijelaskan [33].

2.10.3 Prosedur Praktis Paralel Generator Sinkron

Berikut prosedur atau langkah-langkah praktis untuk melakukan paralel generator sinkron [29] yaitu :

1. Pastikan bahwa breaker dari generator yang akan diparalel (*incoming generator*) dalam keadaan terbuka, atau dengan kata lain *incoming generator* terisolasi dengan sistem.

2. Pastikan AVR (*Automatic Voltage Regulator*) dalam keadaan “otomatis”, bukan manual. 28
3. Start prime mover sampai pada spesifikasi putaran tanpa beban.
4. Gunakan governor control untuk mengeset frekuensi incoming generator lebih tinggi 1/10 dari frekuensi sistem.
5. Gunakan AVR untuk mengeset tegangan incoming generator sama atau lebih tinggi dari sistem.
6. Gunakan synchroscope pada incoming generator dan set frekuensi incoming generator berputar perlahan-lahan di daerah “Fast” mendekati 0.
7. Tutup breaker incoming generator saat 1° sampai 2° pada synchroscope sebelum posisi 0. Dengan asumsi breaker mempunyai massa lembam dengan demikian penutupan breaker tepat pada angka 0 pada synchroscope.
8. Matikan synchroscope.
9. Dengan governor control, buat perpindahan beban ke incoming generator secara perlahan-lahan.
10. Jika power factor yang terbaca antara 2 generator atau lebih yang diparalelkan tidak sama maka, set AVR masing-masing generator sampai power factor setiap generator mendekati sama.

2.11 Sinkronisasi Generator

Sinkronisasi merupakan proses penggabungan dua sistem yang bekerja pada tegangan AC, baik pada saat sebuah generator disambungkan ke jaringan tertentu maupun penambahan unit generator yang akan diparalelkan dengan generator yang sebelumnya telah tersambung ke dalam sistem jaringan yang akan diparalelkan [41].

Tujuan dari sinkronisasi adalah mendapatkan daya besar untuk beban yang ada. Keuntungan dari menggabungkan 2 (dua) generator bila salah satu generator tiba-tiba mengalami gangguan, maka generator tersebut dapat dihentikan serta beban dialihkan pada generator lain, sehingga pemutusan secara total dapat dihindari. Kita dapat mengetahui tentang sistem sinkronisasi generator secara otomatis dan daya aktif pada PBus setelah sinkronisasi generator [53].

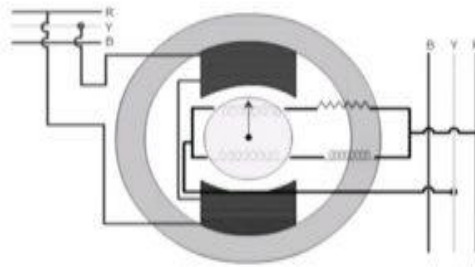
Adapun syarat yang harus dipenuhi dalam melakukan sinkronisasi generator, yaitu[54] :

1. Sudut phasa dan Urutan phasa harus sama
Sudut phasa dan urutan phas antara generator sinkron yang akan di paralelkan harus sama. Untuk menyamakan phasa generator yaitu dengan cara mengatur kecepatan generator dengan katup governor.
2. Tegangan
Tegangan generator (yang akan diparalel) dengan tegangan sistem jaringan harus sama besarnya (nilainya). Pengaturan tegangan generator dapat diatur dengan mengatur arus eksitasinya. Jika nilai tegangan pada generator yang diparalelkan (G2) lebih besar dari tegangan pada generator yang beroperasi (G1) maka Generator (G2) akan berubah fungsi menjadi motor sinkron.
3. Frekuensi
Frekuensi generator dan frekuensi sistem harus sama. Untuk menyamakannya, maka putaran generator harus diatur. Jika jarum pada synchroscope berada pada posisi 0 atau arah jarum jam 12, ini membuktikan bahwa selisih frekuensi adalah 0 (nol).

Berikut merupakan peralatan yang digunakan untuk membantu melakukan proses sinkronisasi generator yaitu :

1. Synchroscope
2. Voltmeter
3. Frekuensi meter
4. Automatic Synchronizer

2.11.1 Synchroscope



Gambar 2. 34 Konstruksi *Synchroscope*

Gambar 2.34 menggambarkan prinsip kerja sinkroskop didasarkan pada prinsip motor AC. Sinkroskop berputar ketika ada perbedaan frekuensi antara generator input dan generator yang sedang beroperasi. Sinkroskop dirancang sedemikian rupa sehingga frekuensi input harus lebih besar daripada frekuensi yang sedang beroperasi. Jarum sinkroskop berputar searah jarum jam hanya ketika frekuensi input lebih besar daripada frekuensi yang sedang beroperasi. Jika sinkroskop menunjukkan perbedaan fasa 0 derajat, maka kedua generator AC tersebut berada dalam fasa dan tersinkronisasi satu sama lain [55].

Suplai dua fasa ke sinkroskop disediakan oleh alternator. Fasa ketiga mesin akan tersinkronisasi secara otomatis jika dua fasa lainnya tersinkronisasi. Stator sinkroskop mendapatkan suplai dari alternator yang ada. Pergeseran fasa antara suplai tersebut memberikan perbedaan antara frekuensi dan fasa alternator, yang terhubung secara paralel satu sama lain. Kecepatan generator yang masuk ditunjukkan oleh sinkroskop. Artinya, sinkroskop memeriksa apakah generator yang masuk beroperasi dengan kecepatan tinggi atau tidak.

Alat ini hanya mulai bekerja ketika dua alternator atau generator, yang memiliki rentang frekuensi berbeda, dihubungkan secara paralel satu sama lain. Rotor dan jarum penunjuk hanya akan diam ketika frekuensi rotor dan stator sama. Jika frekuensi rotor dan stator berbeda, maka rotor akan mulai berputar dan jarum penunjuk sinkroskop akan mulai berbelok ke arah searah jarum jam atau berlawanan arah jarum jam. Perubahan frekuensi yang diberikan menentukan kecepatan rotor yang berputar. Artinya, rotor mulai berputar dengan kecepatan

tinggi ketika perbedaan frekuensi yang diberikan besar. Demikian pula, kecepatan rotor lebih rendah ketika perbedaan frekuensi suplai lebih kecil.

Generator yang masuk memiliki dua kutub yang terhubung melintasi dua fasa. Gulungan armatur terdiri dari dua gulungan paralel yang terhubung ke fasa yang sama dalam sistem bus bar sakelar. Resistansi dihubungkan secara seri ke setengah dari salah satu gulungan. Sedangkan induktansi dihubungkan secara seri dengan setengah lainnya dari gulungan yang lain seperti yang ditunjukkan pada gambar di atas.

Induktansi membantu menggeser aliran arus pada sudut 90 derajat yang berkaitan dengan aliran arus pada resistansi. Kedua arus ini dialirkan ke kumparan jangkar untuk menghasilkan medan magnet berputar bersama dengan kutub medan. Polaritas kedua kutub berubah ketika terjadi perubahan pada dua fasa generator/alternator yang masuk. Medan magnet yang berputar bersama dengan kutub-kutubnya membantu memutar rotor searah jarum jam atau berlawanan arah jarum jam, dan ini mengakibatkan jarum penunjuk sinkroskop berputar. Kedua mesin listrik tersebut harus memiliki tegangan, tingkat frekuensi, dan tingkat fasa yang serupa. Pengukur urutan fasa membantu mengukur perbedaan fasa alternator/generator. Voltmeter digunakan untuk mengukur tingkat tegangan alternator.

Jika jarum sinkroskop berputar berlawanan arah jarum jam, maka generator yang masuk akan memiliki frekuensi yang kecil. Jika jarum sinkroskop berputar searah jarum jam, maka generator yang masuk akan memiliki frekuensi yang lebih besar [55].

2.11.2 Voltmeter

Satuan pengukuran tegangan listrik yang digunakan secara internasional adalah Volt. Standar satuan ini pertama kali ditetapkan pada tahun 1893 bersama dengan satuan Ampere dan satuan Ohm. Hasil akhir dari pertemuan internasional tersebut adalah penetapan nilai dari satuan Volt internasional. Volt internasional dijelaskan sebagai sel Clark pada 15°C dengan gaya gerak listrik sebesar 1,434 Volt. Pada tanggal 1 Januari 1948 ditetapkan sebuah standar baru yang menjadi

standar absolut hingga saat ini. Dalam *standar absolut* ditetapkan bahwa satu Volt internasional sama dengan nilai dari 1,000330 Volt *absolut* [41].



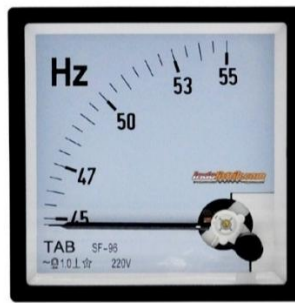
Gambar 2. 35 Voltmeter

Gambar 2.35 memperlihatkan bentuk dari voltmeter sebagai alat ukur tegangan listrik. Voltmeter sering dicirikan dengan simbol V pada setiap rangkaian listrik. Voltmeter harus dipasang paralel dengan ujung ujung hambatan yang akan diukur beda potensialnya. Satuan beda potensial listrik dalam satuan SI adalah volt atau diberi simbol V. Voltmeter sendiri mempunyai hambatan sehingga dengan disisipkannya voltmeter tersebut menyebabkan arus listrik yang melewati hambatan R sedikit berkurang [56].

Pada rangkaian listrik, voltmeter merupakan suatu alat untuk mengukur besar tegangan listrik. Pergerakan jarum penunjuk pada voltmeter terjadi karena adanya gaya magnet yang timbul sebagai hasil interaksi antara medan magnet dan kuat arus listrik. Simpangan yang dihasilkan oleh pergerakan jarum sebanding dengan kuat arus listrik yang mengalir. Arus listrik yang terukur merupakan arus listrik yang melalui kumparan yang diletakkan di antara medan magnet. Peningkatan arus berarti peningkatan simpangan pergerakan jarum sehingga akan menunjuk ke nilai pengukuran tegangan yang lebih besar. Voltmeter dipasang secara paralel dengan komponen yang akan diukur dalam rangkaian listrik [41].

2.11.3 Frekuensi Meter

Frekuensi merupakan jumlah gelombang dalam satu detik. Frekuensi listrik adalah banyaknya gelombang listrik yang terdapat dalam satu detik. Frekuensi listrik merupakan salah satu parameter gelombang listrik yang dapat mempengaruhi kinerja dari sistem tenaga listrik.



Gambar 2. 36 Frekuensi meter

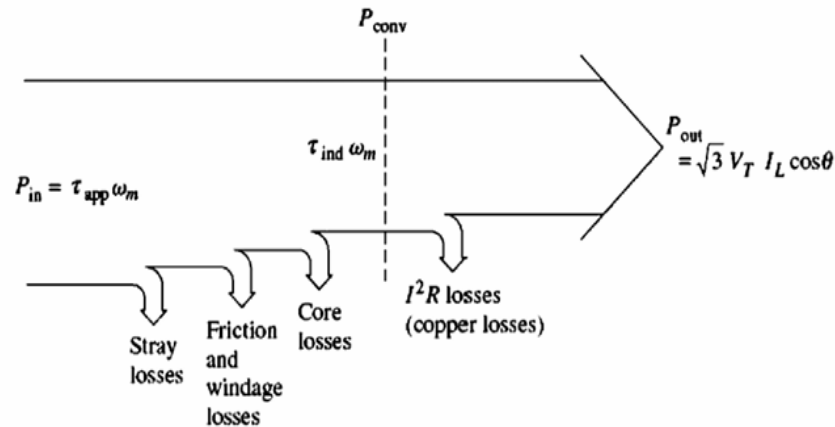
Gambar 2.36 memperlihatkan bentuk dari frekuensi meter yang digunakan untuk mengetahui frekuensi atau gelombang sinusoidal arus bolak balik yg merupakan jumlah siklus gelombang sinusoidal tersebut perdetiknya (cycle / second). Frekuensi meter mempunyai peranan cukup penting untuk mensinkronisasikan (paralelkan) 2 unit mesin pembangkit dan stabilnya frekuensi merupakan petunjuk kestabilan mesin pembangkit.

Prinsip kerja frekuensi meter adalah sinyal yang akan diukur frekuensinya diubah menjadi barisan pulsa, satu pulsa untuk setiap siklus sinyal. Kemudian jumlah pulsa yang terdapat pada interval waktu tertentu dihitung dengan counter elektronik.[41].

2.11.4 *Automatic Synchronizer*

Proses otomatisasi sinkronisasi generator memegang peran penting dalam mencapai kehandalan dan efisiensi pembangkit listrik untuk bekerja parallel. Kegagalan dalam otomatisasi sinkronisasi, dapat menyebabkan kerusakan pada generator serta mempengaruhi peralatan-peralatan pendukung generator karena akibat adanya reverse power. Pengaturan otomatisasi sinkronisasi dilakukan oleh Automatic Synchronizer dengan membandingkan tegangan, frekuensi dan beda sudut fase generator dengan jaringan secara otomatis.

Automatic Synchronizer memberikan perintah kepada AVR dan governor sehingga tercapai kondisi sinkron dan menutup CB generator. Automatic Synchronizer umumnya membaca frekuensi listrik yang masuk di antara lebih dari satu generator yang berbeda output frekuensinya dan selanjutnya akan disamakan. Cara menyamakan frekuensi tersebut adalah dengan mengatur motor servo



Gambar 2. 38 Diagram Aliran Daya Generator Sinkron

Kerugian yang terjadi dalam mesin ac dapat dibagi menjadi empat kategori dasar yaitu :

1. Rugi-rugi tembaga atau listrik.
2. Rugi-rugi inti (*core losses*).
3. Rugi-rugi mekanik (*mechanical losses*).
4. Rugi-rugi beban hilang (*stray load losses*)

2.12.1 Rugi-rugi Tembaga atau Listrik

Kerugian tembaga terjadi pada kerugian di bagian tembaga pada stator, yang merupakan komponen diam. Jenis kerugian ini mengindikasikan jumlah daya yang berubah menjadi panas karena hambatan dalam penghantar tersebut. Banyak kali, dampak negatif pada generator diestimasi dengan merujuk pada klasifikasi isolasi kumparan sesuai standar IEC60034-2-1. Ini melibatkan suhu operasi, yakni 95 derajat Celsius untuk kelas isolasi B, atau 115 derajat Celsius untuk kelas isolasi F [58].

Rugi tembaga yang terdiri dari kumparan armatur, kumparan medan. Rugi-rugi tembaga dapat dilihat pada tiap belitan pada suatu mesin, tahanan efektif dari lilitan pada fluks dan frekuensi kerjanya mempengaruhi tahanan dc dari lilitan pada suhu 75°C [60].

Kerugian tembaga stator dalam mesin 3 fasa AC dapat dihitung menggunakan persamaan[4] :

$$P_{SCL} = 3 x I_s^2 x R_s \dots \dots \dots (2.50)$$

Dengan :

P_{SCL} = Rugi daya stator (Watt)

I_s = Arus pada stator (A)

R_s = Tahanan stator (Ohm)

Sedangkan, kerugian tembaga rotor dalam mesin 3 fasa AC dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$P_{RCL} = 3 x I_r^2 x R_r \dots \dots \dots (2.51)$$

Dengan :

P_{RCL} = Rugi daya rotor (Watt)

I_r = Arus pada rotor (A)

R_r = Tahanan rotor (Ohm)

2.12.2 Rugi-rugi Inti (*Core Losses*)

Kerugian inti besi terjadi saat panas terbentuk di bagian stator dan rotor akibat arus pusar (eddy current) dan efek. Inti stator umumnya terbuat dari lapisan-lapisan tipis baja 70nalisa yang diisolasi satu sama lainnya, membantu mengurangi dampak arus pusar dan. Akibatnya, kerugian besi melibatkan total dari kerugian arus pusar[58].

Rugi-rugi besi juga dikenal sebagai rugi yang mana tebagi menjadi rugi histerisis dan rugi arus pusar (arus eddy) yang dihasilkan dari nilai kerapatan fluks pada besi mesin dengan yang berfungsi sebagai lilitan penetral utama yang diberikan tenaga pada generator sinkron rugi ini dialami oleh besi, walupun pembentukan fluks yang berasal dari mulut celah akan menyebabkan rugi pada besi medan, terutama pada permukaan besi medan. Rugi besi dalam keadaan maksimal

sebagai nilai tegangan yang hasilnya sama dengan tegangan ukuran yang mana perbedaan terlihat pada jatuhnya tahanan ohm pada saat beban maksimal [60].

Rugi hysteresis P_h merupakan rugi yang disebabkan oleh fluks bolak-balik pada inti besi. Pada konduktor yang dipengaruhi fluks bolak-balik, Rugi hysteresis per cycle berbanding dengan luas loop (jerat) hysteresis [60].

$$P_h = K_h \times f \times B_{max}^{1,6} \dots\dots\dots(2.52)$$

Dengan :

P_h = Rugi histerisis (Watt)

K_h = Konstanta histerisis (Watt)

B_{max} = Kerapatan fluks maksimum (T)

f = frekuensi

Rugi arus eddy P_e disebabkan karena terjadinya pemanasan pada inti besi oleh arus yang terinduksi pada inti dan perbedaan tegangan antara sisinya maka akan menghasilkan arus yang berotasi pada setiap sisi yang luas. Arus eddy memberikan perubahan pada fluks yang mana perbedaan tegangan antara sisinya yang memberikan perubahan fluks tersebut. Kemudian untuk perhitungan rugi arus eddy [60].

$$P_e = K_e \times f^2 \times B_{max}^2 \dots\dots\dots(2.53)$$

Dengan :

P_e = Rugi eddy current (Watt)

K_e = Konstanta eddy current

B_{max} = Kerapatan fluks maksimum (T)

f = Frekuensi

2.12.3 Rugi-rugi Mekanik (*Mechanical Losses*)

Kerugian mekanik terjadi akibat gesekan yang timbul dari interaksi permukaan antara komponen yang berputar dengan yang diam pada generator, termasuk gesekan pada bantalan generator dan kerugian akibat hamburan udara. Faktor-faktor ini mempengaruhi total kerugian pada beban penuh sebesar 20% [58].

Rugi-rugi mekanik, terdiri dari gesekan terdiri dari rugi gesekan yang terjadi karena pergesekan antara bagian berputar dengan bagian diam generator seperti gesekan bearing generator dan rugi angin (*Windage loss*) dapat terjadi karena adanya gaya gesek antar part generator yang berputar menggunakan udara di dalam Casing generator [60].

$$P_{mech} = 0,01 \times P_{in} \dots\dots\dots(2.54)$$

Dengan :

P_{mech} = Rugi mekanik

P_{in} = Daya masukan dari prime mover

2.12.4 Rugi-rugi Beban Hilang (*Stray Load Losses*)

Rugi beban stray merupakan hasil dari arus pusar yang terjadi dalam tembaga serta kerugian tambahan di inti besi. Fenomena rugi ini muncul akibat gangguan pada fluks karena arus beban, serta rugi yang muncul akibat hubung singkat komutasi. Rugi beban stray ini tidak termasuk dalam kategori rugi mekanik, rugi besi, atau rugi tembaga. Dalam perhitungannya, besarnya rugi beban stray dihitung sekitar $\pm 1\%$ dari rugi tembaga[58].

Rugi beban stray adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh arus dalam tembaga dan rugi-rugi inti tambahan yang terdapat dalam besi, rugi ini timbul disebabkan oleh pendistorsian fluks oleh arus beban dan rugi-rugi hubung singkat komunitas. Rugi beban stray ini tidak dapat dikategorikan dalam tipe rugi mekanik, rugi besi ataupun rugi tembaga [60].

$$P_{stray} = 0,01 \times P_{scl} \dots\dots\dots(2.55)$$

Dengan :

P_{stray} = Rugi – rugi beban hilang

P_{scl} = Rugi – rugi daya stator

2.13 Efisiensi Generator

Efisiensi adalah ketepatan cara (usaha, kerja) dalam menjalankan sesuatu (dengan tidak membuang waktu, tenaga, dan biaya) atau kemampuan menjalankan tugas dengan baik dan tepat (dengan tidak membuang waktu, tenaga, biaya) [28].

Efisiensi adalah suatu cara atau usaha dalam menjalankan sesuatu untuk menghasilkan suatu hal dengan maksimal. Suatu peralatan atau mesin yang mengubah energi tidak mungkin dapat mengubah seluruh energi yang diterimanya (daya masukan / P_{in}) menjadi energi yang diharapkan (daya keluaran / P_{out}). Sebagian energi akan diubah menjadi energi yang tidak diharapkan. Proses tersebut merupakan sifat alami sehingga ditemukan konsep efisiensi (daya guna). Efisiensi generator adalah perbandingan antara daya output generator dengan daya input generator. Daya masukan merupakan daya keluaran turbin karena turbin dengan generator dan dikoperl dan bekerja bersama [29].

Efisiensi generator merujuk pada perbandingan antara daya output dan daya input. Konsep ini berlaku tidak hanya pada generator sinkron tetapi juga pada mesin listrik lainnya seperti transformator. Maka efisiensi generator sinkron dapat dituliskan seperti persamaan berikut ini [58]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.56)$$

Untuk melakukan perhitungan efisiensi generator sinkron secara tidak langsung, dapat digunakan persamaan dengan melibatkan penghitungan rugi-rugi daya total yang terjadi pada generator seperti pada persamaan berikut ini :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \text{Rugi-rugi daya total}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.57)$$

Dimana :

P_{in} = Daya masuk (Watt)

P_{out} = Daya keluar (Watt)

η = Efisiensi Generator

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Adapun waktu dan tempat pada pelaksanaan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

3.1.1 Waktu

Waktu yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini dimulai dari November 2025 sampai Juni 2026.

Tabel 3. 1 Waktu Penelitian

No.	Keterangan	Bulan Ke							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Kajian Literatur								
2.	Penyusunan Proposal Penelitian								
3.	Penulisan BAB I sampai BAB III								
4.	Seminar Proposal								
5.	Analisa Data								
6.	Seminar Hasil								
7.	Sidang Akhir								

3.1.2 Tempat

Tempat yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini di Jln, Bagan Deli Lama, Medan, Belawan I, Medan Kota Belawan, Kota Medan, Sumatera Utara 20411.

3.2 Alat dan Bahan

Dalam penelitian tugas akhir ini, diperlukan alat serta bahan untuk melakukan pengujian terhadap sistem auxiliary engine sesuai yang diinginkan. Adapun alat dan bahan yang digunakan sebagai berikut:

3.2.1 Alat Pengujian

Dalam pengujian ini penulis menggunakan beberapa alat yang digunakan dalam proses penelitian pada generator sinkron ini. Adapun alat yang digunakan sebagai berikut :

- a. Avo meter berfungsi untuk mengukur tegangan serta frequency pada generator sinkron.
- b. Tang ampere berfungsi untuk mengukur arus pada generator saat pembebanan dilakukan.

3.2.2 Bahan Pengujian

Adapun bahan pengujian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. 2 unit generator sinkron sebagai media yang akan dilakukan pengujian.
- b. Beban – beban kelistrikan pada kapal, mulai dari sistem penerangan, navigasi dan hingga beban elektro motor.

3.3 Data Penelitian

Data penelitian yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari kapal TB. Master Tiga di PT Waruna Shipyard Indonesia. Adapun data yang di ambil di antaranya adalah:

- a. Data Spesifikasi Generator
- b. Data Pembebanan Generator

3.3.1 Data Spesifikasi Generator

Tabel 3. 2 Spesifikasi Generator Sinkron

Spesifikasi Generator Sinkron		
1.	Alternator Brand	Stamford
2.	Genset Model	CDMO80PSOA
3.	Alternator Model	UCM 274D
4.	No. Seri Alternator	TPD221028-2
5.	Rated Voltage	400 / 230 V (Can be adjusted)
6.	Rated Current	152 A
7.	Frequency	50 Hz
8.	Rated Power	80 kW / 100 kVA
9.	Power Factor(COS)	0.8 (lagging)
10.	Rated Speed	1500 RPM
11.	Phase	3 Phase
12.	Insulation Class	H
13.	Type Eksitasi	Brushless, Self – Excited, AVR
14.	Tegangan Eksitasi	6 – 12 V (\approx 8 V)
15.	Voltage Regulator	3P3W
16.	Resistansi Stator	0,035 Ω
17.	Resistansi Rotor	2,67 Ω
18.	Genset Specification Standby Power	88 kW / 110 kVA
19.	Dimension	1860 x 1050 x 1400
20.	Total Weight	1140 Kg

3.3.2 Data Pembebanan Generator

Tabel 3. 3 Data Beban Kapal Tug Boat

No.	Nama Peralatan	Unit	Daya /(W)	Unit Total Daya/(W)
	Penerangan (Lighting)			
1.	Double Fluorescent	48	40	1.920
2.	Single Fluorescent	8	20	160
3.	Ceiling Light	10	20	200
4.	Desk Light (Non Water Tigth)	10	10	100
5.	Berth Light (Non Water Tigth)	17	10	170
6.	Lampu Projector	4	200	800
7.	Red Light (Pada MCB)	4	5	20
8.	Green Light (Pada MCB)	3	5	15
9.	Incandescent lamp, Non Water Tigth untuk penerangan tangga	6	40	240
	Penerangan Navigasi (Navigation Light)			
10.	Musthead Light	2	40	80
11.	Side Light	2	40	80
12.	Stern Light	1	40	40
13.	Anchor Light	1	40	40
14.	Morse Signal Light	1	40	40
15.	Search Light	1	500	500
16.	Chart Table Light	1	15	15
	Alat permesinan untuk daya normal			
17.	Bilge/Ballast Pump	2	7.500	15.000
18.	Sea Water Hydrophore Pump	1	375	375
19.	Fresh Water Hydrophore Pump	1	1.500	1.500
20.	Fuel Oil Transfer	1	1.100	1.100
21.	G.S. Fire Pump	1	5.500	5.500

22.	Sewage Pump	1	3.700	3.700
23.	Oil Bilge Pump	1	1.500	1.500
24.	Oil-Water Separator	1	400	400
25.	Air Compressor	1	2.200	2.200
26.	Stand-by L.O. Pump for Main Engine	1	2.200	2.200
27.	Stand-by L.O. Pump for Gear Box	1	2.200	2.200
28.	Pompa Hidrophore Mesin Jangkar/ Pintu pendarat depan	1	7.500	7.500
29.	Pompa Hidrophore Pintu pendarat belakang	1	7.500	7.500
30.	Pompa Hidropohore Mesin Kemudi	1	5.000	5.000
31.	Peralatan Radio, Telephone, SSB, Radar, dll.	1	1.000	1.000
32.	Fan Kamar ABK, Mess, dll.	1	750	750
33.	Exhaust Fan Dapur, KM / WC	1	600	600
34.	Fan Ruang Penumpang	2	2.200	4.400
35.	Ventilasi Fan Kamar Mesin	1	2.200	2.200
36.	Windlas jangkar	1	6.000	6.000
	Total			75.045

3.4 Tahapan Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa tahap untuk melakukan penelitian diantaranya:

a. Studi Literatur

Pada tahap ini, penulis menyusun konsep dan teori yang melatarbelakanginya dengan mencari dan memahami landasan teori dari berbagai buku, jurnal, artikel, dll. Kemudian menggunakan sumber literatur untuk mendukung pembahasan penelitian ini.

b. Pengolahan Data

Tahap ini dilakukan melalui survei langsung ke lapangan tempat penelitian dan dilakukan pengumpulan data. Data yang dikumpulkan adalah spesifikasi generator dan data beban-beban di kapal serta melakukan

pengukuran disaat penggunaan beban pada generator 1 dan generator 2 di kapal TB. Master Tiga.

c. Analisa Hasil

Perhitungan hasil dari pengolahan data akan di analisa untuk mendapatkan nilai rugi-rugi generator dan nilai efisiensi generator yang tepat.

d. Pembuatan Laporan

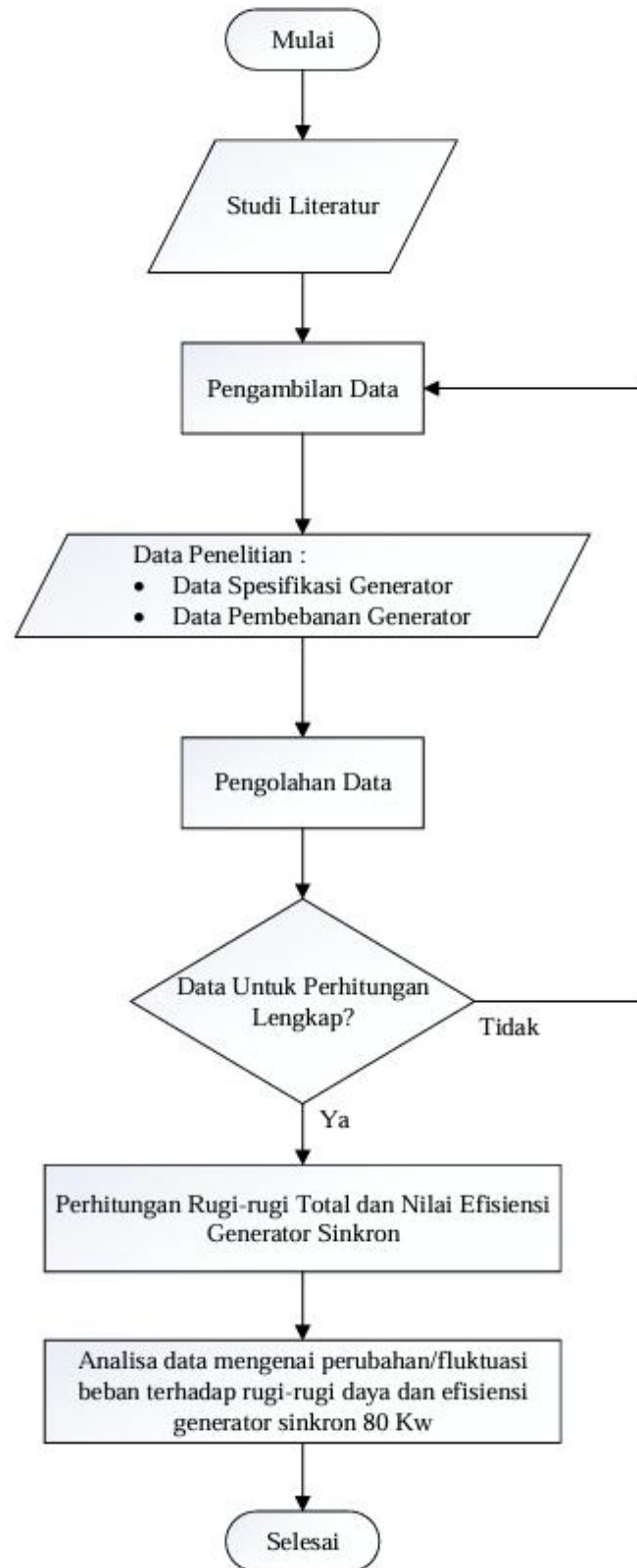
Hasil dari keseluruhan akan dituliskan pada tugas akhir/skripsi. Pelaporan dilakukan secara sistematis dan sesuai dengan prosedur yang diatur atau ditetapkan oleh pihak Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

3.5 Analisa Data

Adapun prosedur analisa yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Menghitung rugi-rugi listrik atau tembaga dengan meliputi (rugi stator dan rugi rotor).
- b. Menghitung rugi-rugi mekanikal (Mechanical Losses) untuk mengetahui kerugian mekanis pada generator.
- c. Menghitung Rugi-rugi Inti (Core Losses) pada generator.
- d. Menghitung Rugi-rugi Beban Hilang (Stray Load Losses).
- e. Menghitung total rugi-rugi daya pada generator.
- f. Menghitung nilai efisiensi pada generator.
- g. Menganalisa bagaimana hubungan dari perubahan beban terhadap rugi-rugi daya generator dan nilai efisiensi generator.

3.6 Diagram Alir (*Flowchart*) Penelitian

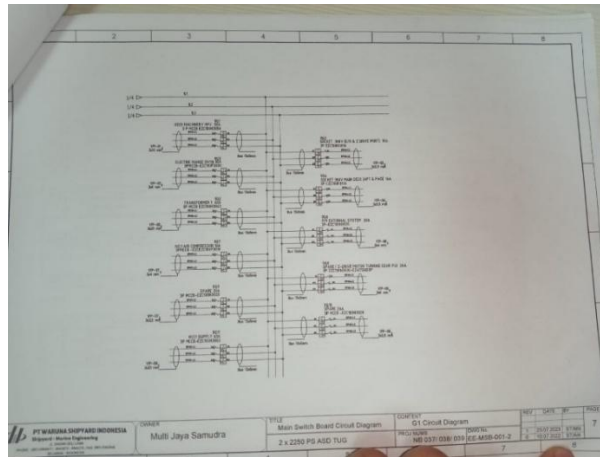


Gambar 3. 1 *Flowchart*

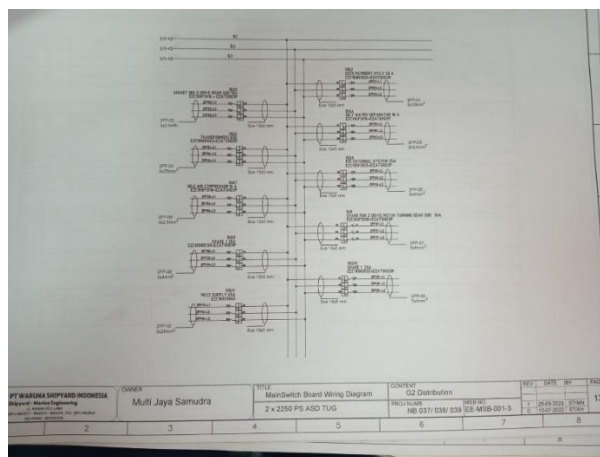
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Sistem Pendistribusian Arus Listrik di Kapal

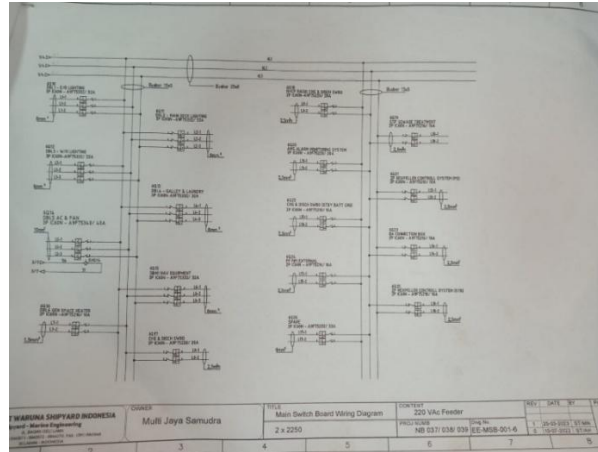
Sistem pendistribusian tenaga listrik dari generator ke pemakai diatas kapal adalah menggunakan sistem distribusi radial, panel-panel hubung bagi listrik menerima arus listrik dari panel utama yang dihubungkan langsung dengan generator satu dan dua. Untuk menghubungkan kedua generator tersebut, panel utama di lengkapi dengan peralatan *synchroscope*. Sistem distribusi ini di pilih karena sederhana dan biaya relatif lebih rendah daripada sistem distribusi lainnya, sistem radial ini banyak digunakan karena sederhana dan biaya investasi yang murah.



(1)



(2)



(3)

Gambar 4. 1 Wiring Diagram Mainswitchboard

Gambar 4.1 menampilkan diagram sistem kelistrikan pada kapal tug boat yang terdiri dari *Main Switch Board* (MSB) circuit diagram dan wiring diagram distribusi listrik. Diagram ini menggambarkan bagaimana energi listrik yang dihasilkan oleh generator didistribusikan ke seluruh peralatan listrik di kapal melalui panel distribusi utama.

Pada bagian (1), ditunjukkan *Main Switch Board* (MSB) circuit diagram yang memperlihatkan aliran daya listrik dari sumber utama melalui tiga fasa, yaitu L1, L2, dan L3. Ketiga fasa tersebut disalurkan melalui busbar sebagai jalur distribusi utama menuju berbagai beban yang terhubung. Setiap jalur beban dilengkapi dengan pengaman berupa MCCB (*Molded Case Circuit Breaker*) yang berfungsi untuk melindungi sistem dari gangguan seperti arus lebih dan hubung singkat. Beban yang terhubung pada sistem ini meliputi peralatan utama kapal seperti deck machinery, kompresor udara, sistem dapur (*electric range*), transformator, serta beberapa jalur cadangan (*spare*). Hal ini menunjukkan bahwa sistem kelistrikan kapal dirancang dengan mempertimbangkan keandalan serta fleksibilitas dalam pengoperasian.

Pada bagian (2), ditampilkan wiring diagram distribusi (G2 Distribution) yang memberikan informasi lebih rinci mengenai jalur kabel dari panel distribusi ke masing-masing beban. Diagram ini menunjukkan ukuran kabel yang digunakan, jumlah fasa, serta jenis beban yang dilayani. Beban yang terhubung antara lain

water separator, sistem eksternal, motor turning gear, dan peralatan bantu lainnya. Penggunaan variasi ukuran kabel menunjukkan bahwa sistem telah disesuaikan dengan kebutuhan daya masing-masing beban, sehingga dapat mengoptimalkan efisiensi dan keamanan sistem distribusi.

Selanjutnya, pada bagian (3) ditunjukkan wiring diagram 220 VAC feeder, yaitu sistem distribusi tegangan satu fasa yang digunakan untuk menyuplai beban-beban ringan. Beban tersebut meliputi sistem penerangan di berbagai area kapal seperti engine room, main deck, dan wheelhouse, serta peralatan pendukung lainnya seperti galley dan laundry, sistem navigasi, alarm monitoring system, radio komunikasi, dan sistem kontrol propeller. Sistem ini juga mencakup peralatan keselamatan seperti sewage treatment dan battery charging system, yang sangat penting dalam menunjang operasional dan keselamatan kapal.

Secara keseluruhan, diagram tersebut menunjukkan bahwa sistem kelistrikan kapal tug boat menggunakan kombinasi distribusi listrik tiga fasa untuk beban besar dan satu fasa untuk beban ringan. Beban yang terhubung memiliki karakteristik yang beragam, namun sebagian besar bersifat induktif, seperti motor listrik dan pompa. Kondisi ini menyebabkan faktor daya sistem cenderung berubah-ubah dan menimbulkan fluktuasi pembebanan.

Fluktuasi pembebanan ini terjadi karena adanya perubahan penggunaan peralatan listrik secara dinamis selama operasi kapal, seperti saat manuver, pengoperasian pompa, maupun penggunaan peralatan bantu lainnya. Akibatnya, arus dan daya yang disuplai oleh generator juga mengalami perubahan yang tidak konstan. Hal ini dapat meningkatkan rugi-rugi pada generator serta menurunkan efisiensi sistem kelistrikan secara keseluruhan.

Dengan demikian, diagram sistem kelistrikan yang ditampilkan memberikan gambaran nyata mengenai kompleksitas distribusi daya pada kapal tug boat serta menunjukkan bahwa variasi beban yang terjadi selama operasi memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja generator sinkron. Hal ini menjadi dasar penting dalam melakukan analisis terhadap pengaruh fluktuasi pembebanan terhadap efisiensi generator pada penelitian ini.

4.1.1 Daya Listrik yang Tersedia

Besarnya daya listrik yang tersedia pada di kapal dapat dihitung dengan cara mengalikan faktor daya mesin dengan daya yang dibangkitkan generator kemudian dikalikan kembali dengan jumlah generator yang ada di kapal. Berdasarkan data yang diperoleh dan pengamatan di kapal, pemakaian daya listrik keseluruhan dapat dipenuhi oleh daya satu unit generator dan generator yang dioperasikan hanya satu unit. Dengan demikian daya listrik yang tersedia dari satu unit generator adalah.

$$P = P \times \cos \phi \dots\dots\dots(4.1)$$

$$P = 100 \text{ kVA} \times 0,8$$

$$P = 80 \text{ kW}$$

Dalam operasional, TB. Master Tiga menggunakan banyak energi listrik. Energi listrik tersebut digunakan sebagai penerangan akomodasi mulai dari ruang mesin hingga ruang navigasi. Daya listrik untuk penerangan yang digunakan besarnya beragam, hal ini karena di sesuaikan dengan kebutuhan penerangan dan luas ruangan. Distribusi listrik untuk peralatan navigasi digunakan untuk keperluan navigasi kapal sementara beban dari motor listrik digunakan untuk mengoperasikan pesawat bantu untuk membantu aktivitas pekerjaan di atas kapal. Pemakaian beban listrik tersebut didapatkan dengan cara melakukan pengamatan dan mencatat data pemakaian beban listrik yang terpakai. Dari Tabel 3.3 jumlah seluruh pemakaian beban listrik yang terpakai dari beberapa instalasi keseluruhan sebesar 75.045 Watt. Maka efisiensi pemakaian daya listrik keseluruhan dari satu unit generator di hitung menggunakan.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(4.2)$$

$$\eta = \frac{75.045 \text{ W}}{80.000 \text{ W}} \times 100\%$$

$$\eta = 93,8\%$$

Dari hasil perhitungan diatas, efisiensi pemakaian daya listrik keseluruhan sebesar 93,8 %.

4.1.2 Pengaruh Kondisi Operasi Kapal Terhadap Pembebanan Listrik

Dalam operasional kapal TB. Master III, penggunaan energi listrik tidak bersifat konstan, melainkan sangat dipengaruhi oleh kondisi kerja kapal pada saat tertentu. Setiap kondisi operasi memiliki karakteristik penggunaan peralatan listrik yang berbeda, sehingga menyebabkan terjadinya fluktuasi pembebanan pada generator. Perubahan beban ini secara langsung berdampak pada arus, faktor daya, serta efisiensi generator sinkron.

Adapun kondisi operasi kapal yang memengaruhi variasi pembebanan listrik dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Operasi di Pelabuhan (Port Operations)

Pada saat kapal berada di pelabuhan, kebutuhan energi listrik relatif lebih rendah dibandingkan kondisi lainnya. Beban listrik yang dominan pada kondisi ini meliputi sistem penerangan, peralatan navigasi, sistem komunikasi, serta beberapa peralatan bantu seperti pompa dan ventilasi. Namun demikian, walaupun beban tergolong rendah, penggunaan peralatan listrik sering kali tidak berlangsung secara terus-menerus, melainkan aktif dan nonaktif secara bergantian. Hal ini menyebabkan pembebanan generator menjadi tidak stabil (fluktuatif). Selain itu, pada kondisi beban rendah, generator cenderung bekerja di bawah kapasitas optimalnya, sehingga efisiensi generator menjadi menurun karena rugi-rugi tetap masih terjadi. Adapun penggunaan daya listrik pada saat operasi di Pelabuhan (Port Operations) ditampilkan pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Pemakaian Daya Listrik pada saat Operasi di Pelabuhan

No.	Distribusi	Daya (W)
1.	Instalasi Penerangan	1.345
2.	Peralatan Listrik dan Navigasi	9.510
3.	Pesawat Bantu	40.103
Jumlah		50.958

2. Operasi Penarikan (*Towing Operations*)

Operasi penarikan merupakan kondisi kerja paling berat pada kapal tug boat. Pada kondisi ini, banyak peralatan listrik yang bekerja secara bersamaan, terutama yang berkaitan dengan sistem propulsi, pompa hidrolik (HPU), winch, dan motor-motor listrik lainnya. Beban listrik pada kondisi ini cenderung tinggi dan dapat mengalami perubahan secara tiba-tiba akibat variasi gaya tarik dan manuver kapal. Hal ini menyebabkan arus yang mengalir pada generator meningkat secara signifikan, sehingga rugi-rugi tembaga juga meningkat sesuai dengan hubungan kuadrat arus (I^2R). Fluktuasi beban yang tinggi pada kondisi ini dapat menyebabkan generator bekerja mendekati atau bahkan melebihi kapasitas nominalnya, yang berdampak pada peningkatan temperatur serta penurunan efisiensi apabila tidak dikendalikan dengan baik. Adapun pemakaian daya listrik pada saat operasi penarikan (*towing operations*) ditampilkan pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Pemakaian Daya Listrik pada saat Operasi Penarikan

No.	Distribusi	Daya (W)
1.	Instalasi Penerangan	2.100
2.	Peralatan Listrik dan Navigasi	10.215
3.	Pesawat Bantu	52.560
Jumlah		64.875

3. Kondisi Berlayar Normal (*Sea Going / Cruising*)

Pada saat kapal berlayar normal, penggunaan energi listrik cenderung lebih stabil dibandingkan kondisi penarikan. Beban listrik yang digunakan meliputi sistem navigasi, penerangan, ventilasi, serta peralatan bantu lainnya yang bekerja secara kontinu. Meskipun demikian, masih terdapat fluktuasi beban akibat perubahan penggunaan peralatan tertentu, seperti pompa atau sistem pendingin. Namun, fluktuasi yang terjadi relatif lebih kecil sehingga generator dapat beroperasi lebih mendekati kondisi optimalnya. Pada kondisi ini, efisiensi generator umumnya lebih baik karena beban yang relatif stabil memungkinkan generator bekerja pada titik

operasi yang lebih efisien. Adapun penggunaan daya listrik pada saat kondisi berlayar normal (*sea going/cruising*) ditampilkan pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Pemakaian Daya Listrik pada saat Kondisi Berlayar Normal

No.	Distribusi	Daya (W)
1.	Instalasi Penerangan	2.685
2.	Peralatan Listrik dan Navigasi	9.200
3.	Pesawat Bantu	47.675
Jumlah		59.560

4. Kondisi Khusus dan Darurat

Kondisi khusus dan darurat meliputi situasi seperti gangguan sistem, kegagalan peralatan, atau kebutuhan daya mendadak untuk sistem keselamatan. Pada kondisi ini, penggunaan energi listrik dapat meningkat secara tiba-tiba atau justru menurun drastis tergantung situasi yang terjadi. Sebagai contoh, saat terjadi gangguan, sistem darurat seperti pompa kebakaran, alarm, dan sistem keselamatan akan diaktifkan secara bersamaan. Hal ini dapat menyebabkan lonjakan beban yang signifikan dalam waktu singkat. Sebaliknya, pada kondisi tertentu, beberapa beban utama mungkin dimatikan untuk mengutamakan sistem vital. Kondisi ini menyebabkan perubahan pembebanan yang sangat dinamis dan tidak terprediksi. Fluktuasi ekstrem pada kondisi ini dapat memengaruhi kestabilan tegangan dan frekuensi generator serta meningkatkan rugi-rugi, sehingga efisiensi generator menjadi tidak optimal. Adapun penggunaan daya listrik saat kondisi khusus atau darurat ditampilkan pada tabel 4.4.

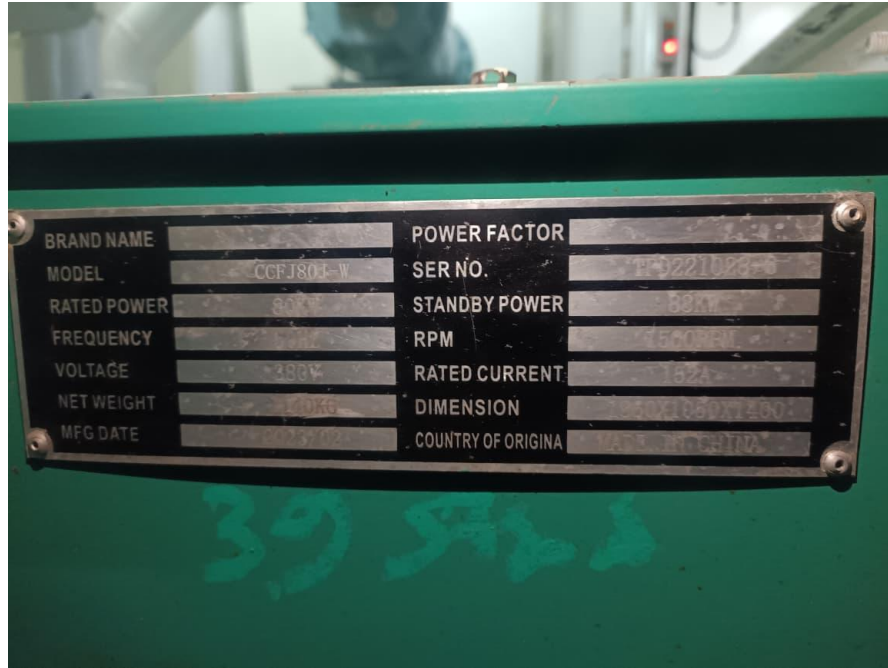
Tabel 4. 4 Penggunaan Daya Listrik pada saat Kondisi Khusus dan Darurat

No.	Distribusi	Daya (W)
1.	Instalasi Penerangan	1.650
2.	Peralatan listrik dan navigasi	10.450
3.	Pesawat bantu	48.565
Jumlah		60.665

4.2 Data

Selama penelitian penulis memperoleh beberapa data dari tanggal 2-10 Maret 2026, diantaranya:

4.2.1 Data Spesifikasi Generator



Gambar 4. 2 Nameplate Spesifikasi Generator

Tabel 4. 5 Spesifikasi Generator

Spesifikasi Generator Sinkron		
1.	Alternator Brand	Stamford
2.	Genset Model	CDMO80PSOA
3.	Alternator Model	UCM 274D
4.	No. Seri Alternator	TPD221028-2
5.	Rated Voltage	400 / 230 V (Can be adjusted)
6.	Rated Current	152 A
7.	Frequency	50 Hz
8.	Rated Power	80 kW / 100 kVA
9.	Power Factor(COS)	0.8 (lagging)
10.	Rated Speed	1500 RPM
11.	Phase	3 Phase

12.	Insulation Class	H
13.	Type Eksitasi	Brushless, Self – Excited, AVR
14.	Tegangan Eksitasi	6 – 12 V (\approx 8 V)
15.	Voltage Regulator	3P3W
16.	Resistansi Stator	0,035 Ω
17.	Resistansi Rotor	2,67 Ω
18.	Genset Specification Standby Power	88 kW / 110 kVA
19.	Dimension	1860 x 1050 x 1400
20.	Total Weight	1140 Kg

4.2.2 Data Pengukuran Generator

Data hasil pengukuran dan monitoring berdasarkan kondisi operasional kapal TB. Master III dari tanggal 2-10 Maret 2026 maka diketahui parameter-parameter generator pada tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Data Pengukuran Generator

Data Operasi	Pout Generator (W)	Arus Eksitasi (A)	Arus Generator (A)	Tegangan (V)	Cos ϕ
Operasi di Pelabuhan	50.958	2,8	90,37	383	0,85
Operasi Penarikan	64.875	3,44	135,73	378	0,73
Kondisi Berlayar	59.560	3,18	110,06	381	0,82
Kondisi Khusus	60.665	3,22	113,19	382	0,81

4.3 Perhitungan Rugi-rugi Generator

Efisiensi generator (η_G) dapat diketahui dengan menghitung besarnya rugi daya terlebih dahulu. Berikut contoh perhitungan rugi-rugi generator pada sample data yang didapat berdasarkan kondisi operasional kapal. Dengan perhitungan Rugi daya pada stator ($P_{cu,s}$), Rugi daya rotor ($P_{cu,r}$), Rugi mekanik, Rugi inti (besi), dan Rugi beban hilang dapat dihitung sebagai berikut.

1. Rugi Stator

$$P_{cu,s} = 3 \cdot I_A^2 \cdot R_A \dots \dots \dots (4.3)$$

$$P_{cu,s} = 3 \times (90,37)^2 \times 0,035$$

$$P_{cu,s} = 3 \times 8.166,73 \times 0,035$$

$$P_{cu,s} = 857,50$$

Rugi Rotor

$$P_{cu,r} = I_f^2 \cdot R_f \dots \dots \dots (4.4)$$

$$P_{cu,r} = (2,8)^2 \cdot 2,67$$

$$P_{cu,r} = 20,93$$

$$\text{Rugi Beban Penuh} = \frac{\text{Rugi Tembaga}}{30\%} = \frac{878,43}{0,3} = 2.928,10 \text{ W}$$

2. Rugi Besi = 30% x Rugi Beban Penuh(4.5)

$$= 0,3 \times 2.928,10$$

$$= 878,43 \text{ W}$$

3. Rugi Mekanik = 0,01 x Pout(4.6)

$$= 0,01 \times 50.958$$

$$= 509,58 \text{ W}$$

4. Rugi Beban Hilang (P_{stray}) = 0,01 x $P_{cu,s}$(4.7)

$$= 0,01 \times 857,50$$

$$= 8,575 \text{ W}$$

Rugi Total = (Rugi Tembaga + Rugi Besi + Rugi Mekanik + Rugi Beban Hilang)

$$= (878,43 \text{ W} + 878,43 \text{ W} + 509,58 \text{ W} + 8,575 \text{ W})$$

$$= 2.275,015 \text{ W} = 2,2 \text{ kW}$$

Perhitungan analisis hilang daya pada generator sinkron terdiri dari perhitungan hilangnya daya dari rugi tembaga, rugi besi, rugi mekanik, dan rugi beban hilang. Seluruh data rugi generator sebagai berikut :

Tabel 4. 7 Total Rugi – rugi pada generator

Data Operasional	Rugi Stator (W)	Rugi Rotor (W)	Rugi Inti /Besi (W)	Rugi Mekanik (W)	Rugi Beban Hilang (W)	Total Rugi – Rugi (W)
Operasi di Pelabuhan	857,50	20,93	878,43	509,58	8,575	2.275,01
Operasi Penarikan	1.934,37	31,59	1.965,96	648,75	19,34	4.600,01
Kondisi Berlayar	1.271,88	27	1.298,88	595,6	12,71	3.206,07
Kondisi Khusus	1.345,25	27,68	1.372,93	606,65	13,45	3.365,96

Berdasarkan tabel 4.7 diperoleh nilai rugi total generator diantaranya yaitu rugi stator, rotor, besi, mekanik, dan beban hilang. Berdasarkan tabel 4.7 bahwa perubahan arus pada generator dan arus eksitasi dapat mempengaruhi nilai rugi stator dan rotor, dimana ketika nilai arus generator dan arus eksitasi besar maka nilai rugi pada stator dan rotor akan semakin meningkat, sedangkan ketika nilai arus generator dan arus eksitasi kecil maka nilai rugi pada stator dan rotor akan menurun. Pada tabel 4.7 juga menunjukkan bahwa beban tertinggi terjadi pada saat kapal beroperasi penarikan (*towing operation*) dan juga mengakibatkan rugi-rugi yang paling tinggi yaitu 4,6 kW.

4.4 Perhitungan Daya Input Generator (Pin)

Perhitungan Pin generator yaitu dengan menjumlahkan nilai Pout generator dengan total rugi-rugi generator. Berikut contoh perhitungan daya masukan generator (Pin) berdasarkan sampel data yang didapat sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 P_{in} &= P_{out} + \Sigma P_{\text{rugi-rugi}} \dots \dots \dots (4.8) \\
 &= 50.958 \text{ W} + 2.275,01 \text{ W} \\
 &= 53.233,01 \text{ W}
 \end{aligned}$$

4.5 Perhitungan Efisiensi Generator

Sampel data perhitungan pada kondisi kapal operasi di pelabuhan. Persentase efisiensi generator diperoleh dari data pembebanan generator sebagai berikut:

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Sigma P_{\text{rugi-rugi}}} \times 100\% \dots \dots \dots (4.9)$$

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{50.958}{50.958 + 2.275,01} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{50.958}{53.233,01} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{gen}} = \dots \times 100\%$$

$$\eta_{\text{gen}} = 95,72\%$$

Untuk perhitungan nilai efisiensi generator di tunjukkan pada tabel 4.8. Nilai efisiensi dihitung berdasarkan beban yang digunakan sesuai dengan kondisi operasional kapal. Sehingga nilai efisiensi pada generator sebagai berikut :

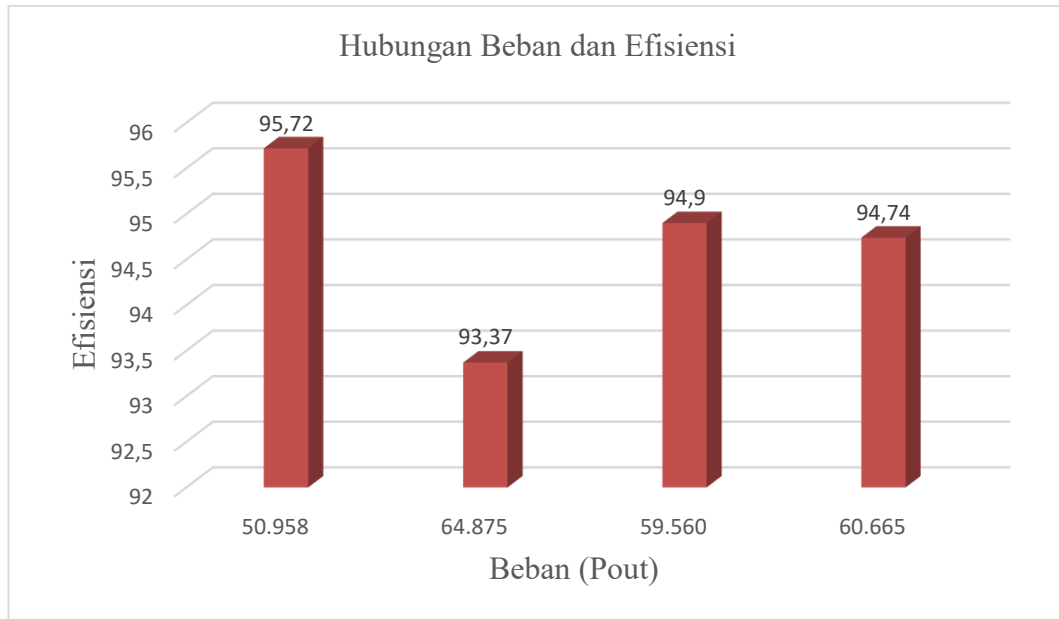
Tabel 4. 8 Hasil Perhitungan Efisiensi Generator

Data Operasional	Pin Generator (W)	Pout Generator (W)	Efisiensi Perhitungan (%)
Operasi di Pelabuhan	53.233,01	50.958	95,72
Operasi Penarikan	69.475,01	64.875	93,37
Kondisi Berlayar	62.766,07	59.560	94,9
Kondisi Khusus	64.030,96	60.665	94,74
Rata-rata	62.376,26	59.014,5	94,68

Berdasarkan tabel 4.8, efisiensi rata-rata generator sebesar 94,68% dan beban rata-rata sebesar 59.014,5 W. Tabel 4.8 menunjukkan nilai efisiensi terendah saat beban kapal beroperasi penarikan (*Towing Operations*) sebesar 64.875 W dengan nilai efisiensi sebesar 93,37%, sedangkan efisiensi tertinggi pada saat beban kapal beroperasi di pelabuhan (*Port Operations*) sebesar 50.958 W dengan nilai efisiensi sebesar 95,72%. Dari Tabel 4.8 terlihat bahwa perubahan beban generator dapat mempengaruhi nilai efisiensi, dengan nilai beban yang tinggi atau daya generator yang tinggi maka efisiensinya akan lebih rendah. Sedangkan dengan nilai beban yang lebih rendah atau daya generator yang rendah maka efisiensinya meningkat.

Tabel 4. 9 Data Hubungan Beban dan Efisiensi

Data Operasional	Beban (W)	Efisiensi (%)
Operasi di Pelabuhan	50.958	95,72
Operasi Penarikan	64.875	93,37
Kondisi Berlayar	59.560	94,9
Kondisi Khusus	60.665	94,74
Rata-rata	59.014,5	94,68



Gambar 4. 3 Grafik Hubungan Beban dan Efisiensi

Berdasarkan gambar 4.3 grafik dan tabel 4.9 tersebut menunjukkan hubungan antara besar pembebanan generator (Pout) dengan efisiensi generator sinkron pada berbagai kondisi operasi kapal tug boat. Dari data yang ditampilkan, terlihat bahwa nilai beban dan efisiensi generator mengalami perubahan sesuai dengan kondisi operasional kapal, yang menunjukkan adanya fluktuasi pembebanan.

Pada kondisi operasi di pelabuhan, beban generator sebesar 50.958 W dengan efisiensi mencapai 95,72%, yang merupakan nilai efisiensi tertinggi. Hal ini disebabkan karena beban yang relatif rendah dan penggunaan peralatan listrik yang tidak terlalu berat, sehingga generator masih mampu bekerja dengan cukup efisien meskipun tidak pada beban penuh.

Selanjutnya pada operasi penarikan, beban meningkat menjadi 64.875 W, namun efisiensi justru menurun menjadi 93,37%, yang merupakan nilai terendah. Penurunan efisiensi ini disebabkan oleh tingginya beban induktif seperti motor, pompa, dan sistem hidrolik yang bekerja secara bersamaan. Beban yang besar dan fluktuatif menyebabkan arus meningkat secara signifikan, sehingga rugi-rugi tembaga juga meningkat dan berdampak pada penurunan efisiensi generator.

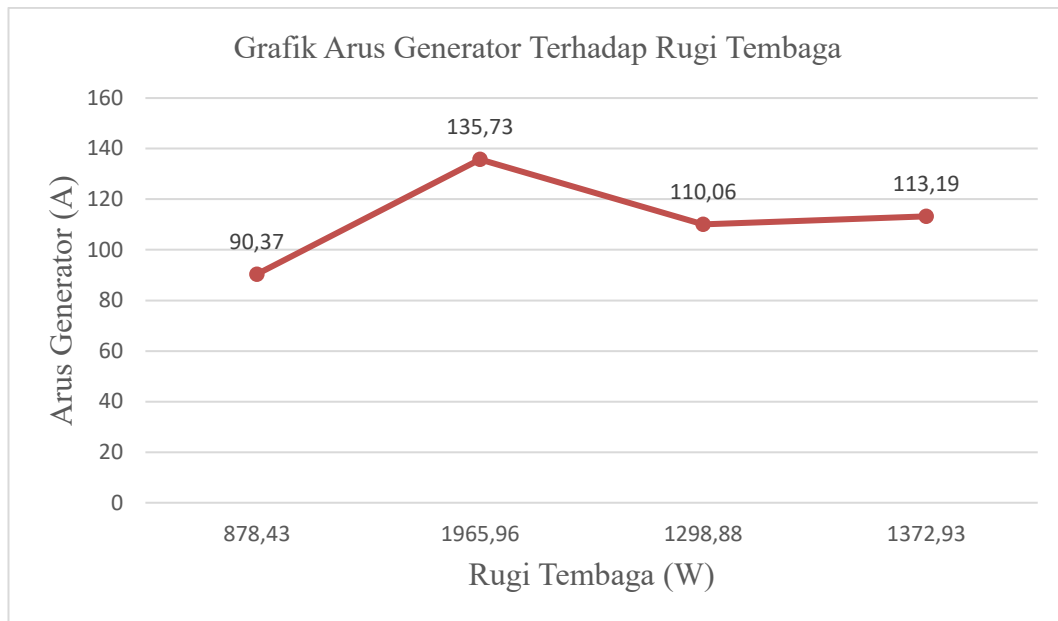
Pada kondisi berlayar normal, beban generator sebesar 59.560 W dengan efisiensi 94,9%. Nilai ini menunjukkan bahwa generator bekerja pada kondisi yang lebih stabil dibandingkan saat penarikan. Beban yang relatif konstan memungkinkan generator beroperasi lebih mendekati titik optimal, sehingga efisiensi yang dihasilkan lebih baik.

Sementara itu, pada kondisi khusus, beban sebesar 60.665 W dengan efisiensi 94,74%. Kondisi ini mencerminkan adanya penggunaan peralatan tertentu secara mendadak atau tidak teratur, sehingga beban mengalami perubahan yang cukup dinamis. Hal ini menyebabkan efisiensi sedikit menurun dibandingkan kondisi berlayar normal.

Secara keseluruhan, rata-rata beban generator adalah 59.014,5 W dengan efisiensi rata-rata sebesar 94,68%. Dari grafik terlihat bahwa tidak selalu beban yang lebih besar menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi, melainkan sangat dipengaruhi oleh kestabilan beban dan karakteristiknya.

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa fluktuasi pembebanan generator sangat berpengaruh terhadap efisiensi. Beban yang berubah-ubah, terutama pada kondisi operasi penarikan, menyebabkan peningkatan rugi-rugi dan penurunan efisiensi. Sebaliknya, pada kondisi beban yang lebih stabil seperti saat berlayar, generator mampu bekerja lebih optimal.

Dengan demikian, grafik ini menunjukkan bahwa kestabilan pembebanan lebih berpengaruh terhadap efisiensi dibandingkan besarnya beban itu sendiri, sehingga pengelolaan beban listrik pada kapal tug boat menjadi faktor penting dalam menjaga kinerja generator tetap optimal.



Gambar 4. 4 Grafik Arus Generator Terhadap Rugi Tembaga

Gambar 4.4 tersebut menunjukkan hubungan antara arus generator terhadap rugi tembaga (*copper losses*) pada generator sinkron. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa nilai arus generator berbanding lurus dengan peningkatan rugi tembaga, meskipun tidak sepenuhnya linier karena dipengaruhi oleh kondisi pembebanan yang fluktuatif.

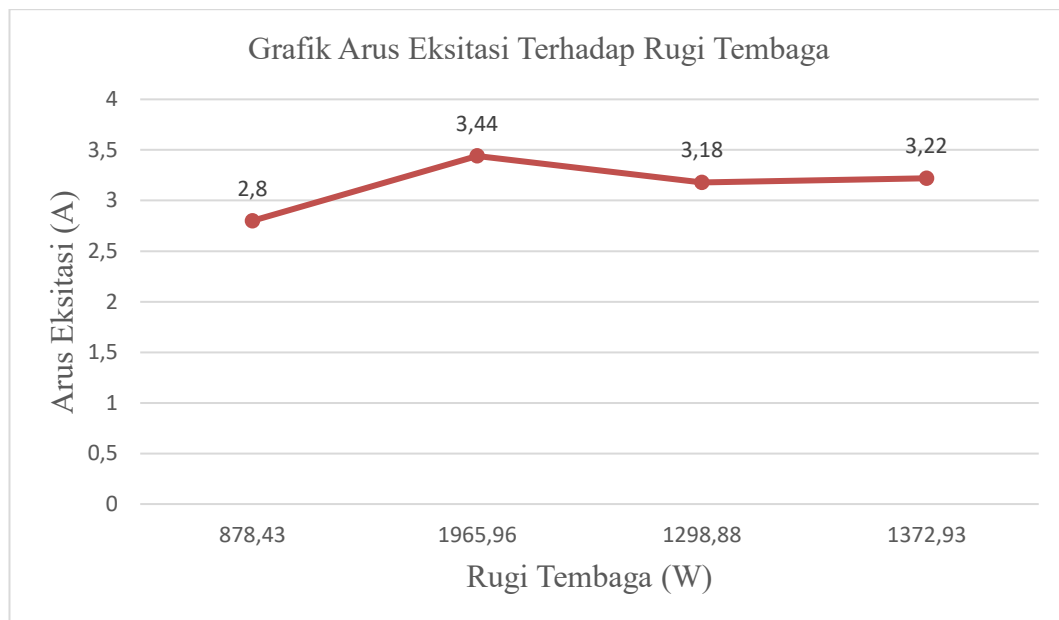
Pada kondisi pertama, arus generator sebesar 90,37 A menghasilkan rugi tembaga sebesar 878,43 W. Nilai ini merupakan kondisi beban relatif rendah, sehingga arus yang mengalir juga kecil dan rugi tembaga masih dalam batas rendah.

Selanjutnya, pada kondisi kedua terjadi peningkatan arus yang cukup signifikan menjadi 135,73 A, yang diikuti dengan kenaikan rugi tembaga menjadi 1965,96 W. Kenaikan ini menunjukkan bahwa rugi tembaga sangat dipengaruhi oleh arus. Dengan demikian, peningkatan arus yang besar akan menyebabkan kenaikan rugi-rugi yang jauh lebih besar.

Pada kondisi ketiga, arus generator menurun menjadi 110,06 A, sehingga rugi tembaga juga menurun menjadi 1298,88 W. Hal ini menunjukkan bahwa ketika beban berkurang, arus yang mengalir juga berkurang, sehingga rugi tembaga ikut menurun.

Pada kondisi keempat, arus generator kembali meningkat menjadi 113,19 A, yang menyebabkan rugi tembaga naik menjadi 1372,93 W. Meskipun kenaikannya tidak sebesar kondisi kedua, hal ini tetap menunjukkan hubungan yang konsisten antara arus dan rugi tembaga.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa rugi tembaga sangat dipengaruhi oleh besar arus yang mengalir pada generator. Semakin besar arus akibat peningkatan beban, maka rugi tembaga akan meningkat secara signifikan. Hal ini menjadi salah satu faktor utama yang menyebabkan penurunan efisiensi generator, terutama pada kondisi pembebanan tinggi dan fluktuatif.



Gambar 4. 5 Grafik Arus Eksitasi Terhadap Rugi Tembaga

Gambar 4.5 menunjukkan grafik hubungan antara arus eksitasi (I_f) terhadap rugi tembaga (*copper losses*) pada generator sinkron. Dari data yang ditampilkan, terlihat bahwa perubahan arus eksitasi diikuti oleh perubahan nilai rugi tembaga, yang menunjukkan adanya keterkaitan antara keduanya dalam sistem kerja generator.

Pada kondisi pertama, arus eksitasi sebesar 2,8 A menghasilkan rugi tembaga sebesar 878,43 W. Nilai ini menunjukkan kondisi awal dengan

pembebanan relatif rendah, sehingga kebutuhan eksitasi untuk membangkitkan medan magnet juga masih kecil, dan rugi tembaga yang terjadi relatif rendah.

Pada kondisi kedua, arus eksitasi meningkat menjadi 3,44 A, yang diikuti dengan kenaikan rugi tembaga secara signifikan menjadi 1965,96 W. Hal ini menunjukkan bahwa ketika arus eksitasi meningkat, medan magnet yang dihasilkan rotor juga meningkat, sehingga arus pada stator bertambah untuk memenuhi kebutuhan beban. Akibatnya, rugi tembaga yang berbanding dengan kuadrat arus juga meningkat secara signifikan.

Selanjutnya, pada kondisi ketiga, arus eksitasi menurun menjadi 3,18 A, dan rugi tembaga juga turun menjadi 1298,88 W. Hal ini menunjukkan bahwa ketika kebutuhan eksitasi berkurang, maka arus yang mengalir dalam sistem juga menurun sehingga rugi tembaga ikut berkurang.

Pada kondisi keempat, arus eksitasi kembali sedikit meningkat menjadi 3,22 A, yang menyebabkan rugi tembaga meningkat menjadi 1372,93 W. Perubahan ini menunjukkan bahwa hubungan antara arus eksitasi dan rugi tembaga bersifat dinamis mengikuti kondisi pembebanan generator.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa arus eksitasi memiliki hubungan tidak langsung namun signifikan terhadap rugi tembaga. Peningkatan arus eksitasi akan meningkatkan medan magnet rotor, yang pada akhirnya meningkatkan arus stator untuk melayani beban, sehingga rugi tembaga juga meningkat.

4.6 Perhitungan Daya Aktif, Reaktif, dan Semu Pada Generator

Berikut merupakan contoh dari perhitungan daya semu, aktif dan reaktif pada pembebanan generator yaitu:

$$\begin{aligned}
 S &= \sqrt{3} \times V_g \times I_g \dots\dots\dots(4.10) \\
 &= \sqrt{3} \times 383 \times 90,37 \\
 &= 59.949,24 \\
 &= 59.949 \text{ VA}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{3} \times V_g \times I_g \times \text{Cos } \phi \dots\dots\dots(4.11) \\
 &= \sqrt{3} \times 383 \times 90,37 \times 0,85 \\
 &= 50.956,85 \\
 &= 50.957 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{3} \times V_g \times I_g \times \text{Sin } \phi \dots\dots\dots(4.12) \\
 &= \sqrt{3} \times 383 \times 90,37 \times \text{Sin } 0,55 \\
 &= \sqrt{3} \times 383 \times 90,37 \times 0,52 \\
 &= 31.173,60 \\
 &= 31.173 \text{ VAR}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.10 menampilkan hasil perhitungan dari pembebanan daya semu, aktif, dan reaktif sebagai berikut:

Tabel 4. 10 Hasil Perhitungan Pembebanan

Data Operasional	S (VA)	P (W)	Q (VAR)
Operasi di Pelabuhan	59.949	50.957	31.173
Operasi Penarikan	88.864	64.871	60.573
Kondisi Berlayar	72.630	59.556	41.009
Kondisi Khusus	74.891	60.662	43.514

Tabel 4.10 menampilkan hasil perhitungan pembebanan yang terjadi berdasarkan kondisi-kondisi operasional kapal yang selalu berubah-ubah sehingga menghasilkan nilai daya semu, aktif, dan reaktif. Pada saat kapal beroperasi

penarikan (*Towing Operations*) terjadi pembebanan yang paling tinggi dengan daya semu sebesar 88.864 VA, daya aktif sebesar 64.871 W, dan daya reaktif sebesar 60.573 VAR. Sedangkan pembebanan terendah terjadi pada saat kapal beroperasi di pelabuhan (*Port Operations*) dengan daya semu sebesar 59.949 VA, daya aktif sebesar 50.957 W dan daya reaktif sebesar 31.173. Pembebanan berbanding lurus dengan faktor daya, semakin rendah faktor daya maka daya aktif dan daya reaktif juga akan semakin tinggi. Faktor daya juga dipengaruhi dengan arus listrik, semakin tinggi arus listrik maka nilai faktor daya juga akan semakin turun.

4.7 Analisa

Berdasarkan Analisa yang dilakukan bahwa nilai efisiensi terendah terjadi pada saat kapal beroperasi penarikan (*Towing Operations*) saat beban mencapai 64.871 W dengan nilai efisiensi sebesar 93,37%. Sebaliknya, nilai efisiensi tertinggi terjadi pada saat kapal beroperasi di pelabuhan (*Port Operations*) saat beban mencapai 50.957 W dengan nilai efisiensi sebesar 95,72%.

Efisiensi generator tidak bisa 100% karena adanya rugi generator yang disebabkan oleh peningkatan daya input. Penggunaan generator pada saat beban berat atau puncak untuk waktu yang lama juga dapat mengakibatkan pada kinerja generator dalam mengubah energi gerak (mekanik) putar menjadi energi Listrik. Rugi generator terdiri dari rugi tembaga belitan, inti besi, dan mekanik, serta rugi beban hilang akibat gesekan selama putaran.

Semakin tinggi efisiensi generator, maka akan semakin bagus keandalan dari system. Oleh karena itu, analisis efisiensi generator harus tetap dilakukan agar mengetahui kinerja dari generator masih layak beroperasi atau tidak. Arus listrik mengalir ketika generator terhubung dengan beban. Besar kecilnya arus listrik, akan bergantung dengan besar kecilnya beban. Untuk kinerja yang optimal, penting untuk menjaga stabilitas selama generator beroperasi. Perbedaan beban kerja dapat mempengaruhi ketidakstabilan generator, yang akan mengakibatkan penurunan efisiensi generator itu sendiri.

Daya eksitasi/arus eksitasi sangat mempengaruhi perubahan beban yang dibangkitkan pada generator karena dengan eksitasi maka akan membangkitkan

medan magnet pada kumparan rotor yang diinduksikan sesuai dengan proses elektromagnetik untuk menghasilkan ggl induksi yang akan menimbulkan arus bolak balik.

Perubahan arus pada generator dan arus eksitasi dapat mempengaruhi nilai rugi pada stator dan rotor, dimana ketika nilai arus generator dan arus eksitasi besar maka nilai rugi pada stator dan rotor akan semakin meningkat, sedangkan ketika nilai arus generator dan arus eksitasi kecil maka nilai rugi stator dan rotor akan menurun. Efisiensi generator dapat dipengaruhi oleh perubahan bebannya, dengan beban tinggi menghasilkan efisiensi yang lebih rendah sedangkan pada beban rendah menyebabkan efisiensi meningkat.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan terhadap pengaruh fluktuasi pembebanan pada generator sinkron di kapal tug boat, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Fluktuasi pembebanan pada kapal tug boat berpengaruh signifikan terhadap efisiensi generator. Hal ini disebabkan oleh perubahan kondisi operasi kapal seperti di pelabuhan, penarikan, berlayar normal, dan kondisi khusus yang menyebabkan variasi penggunaan energi listrik. Perubahan beban ini memengaruhi arus yang mengalir sehingga berdampak pada kinerja generator.
2. Rugi-rugi generator meningkat akibat perubahan beban yang dinamis. Peningkatan arus akibat pembebanan yang tinggi menyebabkan rugi tembaga meningkat secara signifikan. Kondisi ini menjadi faktor utama penurunan efisiensi generator. Rugi-rugi terjadi pada operasi penarikan (*Towing Operations*) dengan beban tertinggi yaitu sebesar 64.875 W dengan nilai rugi-rugi sebesar 4.600,01 W dan rugi-rugi terendah terjadi pada operasi di pelabuhan (*Port Operations*) beban paling rendah yaitu sebesar 50.958 W dengan nilai rugi-rugi sebesar 2.275,01 W.
3. Efisiensi generator tertinggi terjadi pada kondisi beban rendah dan stabil. Efisiensi tertinggi sebesar 95,72% dengan beban sebesar 50.958 W terjadi pada kondisi operasi di pelabuhan, sedangkan efisiensi terendah sebesar 93,37% dengan beban 64.875 W terjadi pada kondisi penarikan yang memiliki beban tinggi dan fluktuatif. Pada kondisi berlayar dan kondisi khusus, efisiensi masing-masing sebesar 94,9% dan 94,74%. Kondisi operasi kapal menentukan karakteristik pembebanan generator. Setiap kondisi operasi memiliki pola pembebanan yang berbeda, di mana kondisi penarikan menghasilkan beban terbesar dan paling fluktuatif sehingga paling berpengaruh terhadap peningkatan rugi-rugi dan penurunan efisiensi.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka disampaikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan manajemen pembebanan (load management) yang baik. Penggunaan beban listrik pada kapal sebaiknya diatur agar tidak terjadi lonjakan arus secara tiba-tiba yang dapat meningkatkan rugi-rugi dan menurunkan efisiensi generator.
2. Pengaturan sistem eksitasi perlu dioptimalkan. Arus eksitasi harus dikontrol secara tepat agar tidak berlebihan, karena peningkatan arus eksitasi dapat menyebabkan kenaikan rugi tembaga dan menurunkan efisiensi.
3. Pengoperasian generator pada kondisi beban optimal. Generator sebaiknya dioperasikan pada rentang beban yang stabil dan mendekati kapasitas nominal untuk mendapatkan efisiensi yang maksimal.
4. Penggunaan sistem paralel generator. Untuk mengatasi fluktuasi beban yang tinggi, disarankan menggunakan lebih dari satu generator agar pembagian beban lebih merata dan kinerja sistem lebih efisien.
5. Pengembangan penelitian selanjutnya. Penelitian berikutnya disarankan menggunakan sistem monitoring berbasis digital atau data real-time agar analisis fluktuasi pembebanan dan efisiensi generator dapat dilakukan dengan lebih akurat dan mendalam.

TINJAUAN PUSTAKA

- [1] M. U. Pawara, A. Yosefan, A. N. Anugerah, and B. Y. Pratama, "Optimizing Generator Power Usage Through LED Lighting Distribution on Tugboats : A Case Study of a 26 . 80-Meter Vessel," vol. 03, no. 01, pp. 1–8, 2025.
- [2] R. Davicky and Z. Abidin, "Analisis Pembebanan dan Pengujian Sistem Kelistrikan pada Kapal Tugboat Delta Cakra 31," vol. 2, no. 4, 2025.
- [3] A. A. Firdaus, "EFFICIENCY OF GENERATOR SET ON CHANGES IN ELECTRICAL LOAD ON FISHERY VESSELS," vol. 1, no. 2, pp. 2022–2025, 2024, doi: 10.35991/mein.v1i2.
- [4] R. Mustofa, "Analisis Pengaruh Fluktuasi Beban Terhadap Rugi Daya Stator dan Rotor Pada Generator Sinkron Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi," vol. 2, no. 2, pp. 65–70, 2024.
- [5] R. Syahputra, A. W. Nugroho, A. Nur, N. Chamim, and T. I. Prasetyo, "Performance Analysis of Synchronous Generator : A Case Study in Steam Power Plant at PT POMI Paiton Unit 7 Probolinggo , East Java , Indonesia," vol. 2, no. 4, pp. 144–152, 2024.
- [6] R. D. Yulisetiawan, E. S. Koenhardono, and S. Sarwito, "Effect Analysis of Unbalanced Electric Load in Ship at Three Phase Synchronous Generator on Laboratory Scale," vol. 5, no. 2, pp. 389–395, 2016.
- [7] F. I. Pasaribu, E. S. Nasution, and A. Rizki, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Trafo Distribusi 200 KVA," pp. 59–63, 2021.
- [8] T. H. Kifune, K. Hir, and S. Komeda, "Efficiency estimation method of synchronous generator in low power factor condition," vol. 2, no. 6, pp. 271–272.
- [9] S. Adiyansa, "Studi Analisa Efisiensi Konsumsi Energi Listrik pada Kapal Tug Boat Studi Analisa Efisiensi Konsumsi Energi Listrik pada Kapal Tug Boat Sei Deli DI PT . DOK dan Perkapalan Surabaya Sri Adiyansa," pp.

219–223, 2018.

- [10] O. S. Clever, “Analisis pengaruh pembebanan terhadap efisiensi generator di pltu embalut unit 3,” vol. 2, no. 2, 2024.
- [11] I. Refaldi, Y. Basir, D. Utari, and Y. Wardhani, “ANALISIS FLUKTUASI BEBAN TERHADAP EFISIENSI GENERATOR SINKRON DI PT . PEMBANGKIT LISTRIK PALEMBANG JAYA,” vol. 6, no. 2, 2021.
- [12] A. P. Djoko Prasetyo, M. Zaki Latif Abrori, “The Efficiency of Generator Toward Changes Electric Loading in Fishing Vessels,” vol. 10, no. 02, pp. 287–294, 2021.
- [13] R. Fadilah, S. Yahya, S. M. Ilman, and K. Kunci, “Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator 55 MW Unit 3 di PLN Indonesia Power UBP Kamojang,” pp. 24–25, 2024.
- [14] H. Kifune and M. K. Zadhe, “Efficiency Estimation of Synchronous Generators for Marine Applications and Verification With Shop Trial Data and Real Ship Operation Data,” pp. 195541–195550, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033404.
- [15] I. M. A. Nugraha, I. G. Made, N. Desnanjaya, P. I. Pramana, W. Manggarai, and E. N. Tenggara, “Generator Load Optimization Management on Tourist Ships in Labuan Bajo,” vol. 7, no. 3, pp. 144–152, 2024.
- [16] F. Pujiyanto, E. Darmana, P. S. Teknika, and F. Teknik, “Power Management System (PMS) Sebagai Kontrol Utama Dalam Perkembangan Power Listrik Kapal 1,2,” vol. 19, no. 2, pp. 137–150, 2021, doi: 10.33489/mibj.v19i2.268.
- [17] D. Tarnapowicz, S. German-galkin, and A. Nerc, “Improving the Energy Efficiency of a Ship ’ s Power Plant by Using an Autonomous Hybrid System with a PMSG,” 2023.
- [18] J. D. Nugroho, E. P. Hidayat, and A. Z. Arfianto, “ANALISIS IMPLEMENTASI BIRO KLASIFIKASI INDONESIA (BKI) PADA

PENGUJIAN PANEL MAIN SWITCH BOARD KAPAL PERINTIS 2000 GT Oleh :,” vol. 4, no. 2, pp. 52–65, 2019.

- [19] B. B. L. dan H. Febriansyah, “Standardisasi industri nasional kapal di indonesia,” vol. 2, pp. 11–24, 2017.
- [20] S. Armansyah, “Pengaruh Penguatan Medan Generator Sinkron Terhadap Tegangan Terminal,” vol. 1, no. 3, 2016.
- [21] G. P. Tambunan *et al.*, “Analisis Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron 11KV Unit 2 ULPLTA Sipansihaporas,” vol. 3, no. 1, pp. 117–128, 2026.
- [22] W. Sunarlik, “Prinsip kerja generator sinkron *,” 2021.
- [23] M. S. N. Muchsin Harahap, Yoga Tri Nugraha, Muhammad Adam, “Pengaruh Perubahan Variasi Eksitasi Tegangan Terhadap Daya Reaktif Pada Generator,” pp. 71–76, 2021.
- [24] M. J. Denny R. Pattiapon, Jacob J. Rikumahu, “PENGUNAAN MOTOR SINKRON TIGA PHASA TIPE SALIENT POLE SEBAGAI GENERATOR SINKRON,” vol. 9, no. 2, pp. 197–207, 2019.
- [25] Perawati, “KARAKTERISTIK GENERATOR SINKRON YANG BERBEBAN BERAT DAN TIDAK KONSTAN,” vol. 2, pp. 115–120, 2017.
- [26] M. Rimbawati, Abdul Azis Hutasuhut, Faisal Irsan Pasaribu, Cholish, “Design of motor induction 3-Phase from waste industry to generator for microhydro at isolated village,” 2017, doi: 10.1088/1757-899X/237/1/012021.
- [27] R. E. Pratama and U. Situmeang, “STUDI PENGARUH PENGUATAN MEDAN TERHADAP TEGANGAN KELUARAN GENERATOR SINKRON SATU PHASA,” vol. 3, no. 2, pp. 69–76, 2019.
- [28] F. Candra, “Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Generator di PLTU Tanjung Jati B Unit 1 dan 2,” 2023.

- [29] R. AZHARNY, “ANALISA PERBANDINGAN EFISIENSI GENERATOR SINKRON UNIT 1 DAN 2 DI PLTA SIPANSIHAPORAS.” 2021.
- [30] A. Nurdin, A. Azis, and R. A. Rozal, “PERANAN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR SEBAGAI PENGENDALI TEGANGAN GENERATOR,” vol. 3, no. 1, pp. 163–173, 2018.
- [31] A. S. Pramudianto and E. N. Hidayat, “Pembangkit Listrik Tenaga Ombak Laut atau Angin Laut dengan Pengendali Gravitasi Bumi,” vol. 21, no. 1, 2019.
- [32] E. Tridianto and F. H. Sholihah, “Rancang Bangun Cascade Generator untuk Meningkatkan Torsi Awal pada Kincir Angin secara Elektris,” pp. 531–534, 2019.
- [33] S. J. Chapman, “ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS”.
- [34] S. Abdussamad, “Implementasi Pengukuran Beban Resistif Pada Lampu Pijar,” vol. 4, pp. 83–86, 2022.
- [35] F. D. Kurniawan, N. Amelia, H. Hidayat, and S. Mayasari, “Analisis Pengaruh Tegangan dan Kuat Arus Terhadap Resistor dengan Percobaan Rangkaian Seri Menggunakan Hukum Ohm,” vol. 1, no. 4, pp. 2–6, 2023.
- [36] D. T. Saputri, A. W. Putri, A. Marfa, and B. Buanasari, “Pengaruh Tegangan Terhadap Besar Kuat Arus Listrik Pada Pengukuran Hukum OHM Berbasis Simulasi Phet HTML5,” vol. 4, 2025.
- [37] I. Kartika, “ANALISA RUGI-RUGI DAYA DIAKIBATKAN ARUS KAPASITIF,” vol. 1, no. 2, pp. 100–111, 2017.
- [38] A. R. I. Lukman Aditya, “ANALISIS KONSUMSI DAYA PEMASANGAN KAPASITOR BANK PADA SISTEM JARINGAN LISTRIK TEGANGAN RENDAH DI HOTEL THE 101 CENGKARENG,” vol. 10, no. 1, pp. 85–95, 2022.
- [39] F. Zulyanti, Y. Ermawati, A. Paldano, J. T. Elektro, and U. Baturaja,

- “KAPASITOR BANK SEBAGAI SOLUSI EFISIENSI SISTEM KELISTRIKAN PADA PABRIK SEMEN DI BATURAJA,” vol. 2, no. 1.
- [40] F. Sari, A. Darwanto, P. Studi, T. Elektro, S. Tinggi, and T. Ronggolawe, “Analisis Sistem Eksitasi Pada Generator Pararel Terhadap Daya Reaktif,” pp. 10–19, 2021.
- [41] A. R. SARAGIH, “ANALISIS PENGARUH ARUS EKSITASI TERHADAP DAYA REAKTIF PADA GENERATOR KAPAL YANG BEKERJA PARALEL Di PT. WARUNA SHIPYARD INDONESIA,” 2024.
- [42] Rusilawati, “PEMBENTUKAN KURVA KAPABILITAS GENERATOR MENGGUNAKAN PENDEKATAN SISTEM MODIFIED SINGLE MACHINE TO INFINITE BUS (M-SMIB) UNTUK BATASAN OPTIMISASI SISTEM PEMBANGKITAN,” vol. 4, no. 2, pp. 132–139, 2020.
- [43] Mokh. Sidqi Fahmi and Irwanto, “SUPPLAY EKSITASI OUTPUT GENERATOR 300 MW MENGGUNAKAN METODE POLA TITIK DAYA REAKTIF,” vol. 5, no. 1, pp. 11–20, 2020.
- [44] B. I. Maulititus Eko Pramono, Romdhoni Graha Pribadi, “Rangkaian Segitiga Daya (E8),” pp. 1–5, 2018.
- [45] T. Rusdiansyah, Cornelius Sarri, “Analisis Perbaikan Faktor Daya Untuk Efisiensi Pembebanan Pada RSUD I.A. Moeis Samarinda,” vol. 1, no. 1, pp. 126–139, 2023.
- [46] W. Ramadhoni, B. S. K. , Faisal Irsan Pasaribu, E. S. Nasution, Rimbawati, N. Evalina, and A. Amiruddin, “ANALISA KAPASITAS PENGGUNAAN GENERATOR TURBIN 800 KW TERHADAP PEMAKAIAN BEBAN DI PTPN IV UNIT PKS BERANGIR,” vol. 13, no. 2, pp. 41–47, 2024.
- [47] M. Putri and F. I. Pasaribu, “Analisis Kualitas Daya Akibat Beban Reaktansi Induktif (X L) di Industri,” vol. 3, no. 2, pp. 1–5, 2018.
- [48] W. N. Agustianingsih, F. Kurniawan, and P. Setiawan, “Analisis Ketepatan

- Pengukur Daya dan Faktor Daya Listrik Berbasis Arduino Uno R3 328P,” vol. 3, no. 1, pp. 15–27, 2021.
- [49] R. Sutjipto, H. Sungkowo, and E. Epiwardi, “ANALISIS KINERJA GENERATOR INDUKSI 3 FASA BERDASARKAN REGULASI TEGANGANNYA,” no. 9, pp. 91–98, 2022.
- [50] M. Farhan, R. Hidayat, and Y. Saragih, “PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP ARUS EKSITASI GENERATOR UNIT 2 PLTMH CURUG,” vol. 11, no. 1, pp. 398–403, 2021.
- [51] A. Zulhakim, Y. S. Handayani, I. Priyadi, P. T. Pln, I. Power, and U. Ta, “PENGARUH SISTEM EKSITASI TERHADAP GENERATOR SINKRON TIGA FASA,” vol. 17, no. 1, pp. 1–12, 2023.
- [52] D. N. Suharno, J. T. Elektro, and P. N. Bandung, “Rancang Bangun Simulator Sinkronisasi Generator Sinkron 3 Fasa Semiotomatis Berbasis Mikrokontroler Arduino,” vol. 19, no. 02, pp. 161–170, 2020.
- [53] R. I. FAUZI, “SISTEM SINKRONISASI GENERATOR PADA PLTMG SEMATANG BORANG,” 2017.
- [54] G. T. A. dan M. T. Prasetyo, “SINKRONISASI GENERATOR 3 PHASA DENGAN KAPASITAS DAYA 511 KVA DAN 820 KVA YANG BERBEBAN DI PT UNGARAN SARI GARMENTS,” pp. 37–41, 2018.
- [55] WatElectronics, “Apa itu Sinkroskop: Rangkaian dan Cara Kerjanya,” 2021. <https://www.watelectronics.com/synchroscope-circuit-working/>
- [56] A. Hanif, S. D. Prasetyo, and B. Kusharjanta, “Penggunaan Amperemeter Dan Voltmeter Dalam Pengukuran Listrik DC,” pp. 1–7, 2020.
- [57] Z. Muna *et al.*, “STUDI PERUBAHAN BEBAN TERHADAP RUGI-RUGI DAYA OUTPUT GENERATOR SINKRON TIGA PHASE 20 MW PADA GENERATOR TURBIN GAS UNIT 2 PADA PT PUPUK ISKANDAR MUDA,” vol. 7, no. 1, pp. 1–6, 2023.

- [58] A. Ardiansyah and R. Syahputra, “STUDI PENGARUH PERUBAHAN BEBAN TERHADAP EFISIENSI,” vol. 8, no. 1, 2024.
- [59] R. Septiyan, M. W. Kasrani, and B. Sugeng, “ANALISA HILANG DAYA PADA GENERATOR SINKRON 3 FASA (6.6 KV) 11 MVA TYPE 1DT4038 – 3EE02 – Z,” vol. 4, no. 1, pp. 2–6, 2019.
- [60] H. F. Wibowo, P. Jannus, and B. Nainggolan, “Analisis Efisiensi dan Rugi-rugi Daya Pada Generator Terhadap Kinerja Generator PLTMG SPBG Klender,” pp. 1652–1660, 2024.
- [61] R. N. Ricesno, “PERHITUNGAN DAN PENGUJIAN BEBAN PADA GENERATOR DI KAPAL TUGBOAT HANGTUAH V,” vol. 3, no. 1, pp. 10–21, 2020.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Data Pribadi

Nama : Azri Adlih
 Tempat/Tanggal Lahir : Kisaran, 22 Desember 2002
 Jenis kelamin : Laki-laki
 Umur : 23
 Agama : Islam
 Status : Belum Kawin
 Tinggi Badan / Berat Badan : 170 cm / 53 kg
 Kewarganegaraan : Indonesia
 Alamat : Jl. Budi Utomo, Siumbut-umbut LK VI, Kota
 Kisaran Timur
 No Hp : 081265732780
 Email : azriadlih221202@gmail.com

Data Orang Tua

Nama Ayah : Hendrianto
 Agama : Islam
 Kewarganegaraan : Indonesia
 Nama Ibu : Ayu Sukaesih
 Agama : Islam
 Kewarganegaraan : Indonesia
 Alamat : Jl. Budi Utomo, Siumbut-umbut LK VI, Kota
 Kisaran Timur

Latar Belakang Pendidikan

SDN 013849 : Tahun 2009 - 2015
 SMP N 1 Kisaran : Tahun 2015 - 2018
 SMK N 2 Kisaran : Tahun 2018 - 2021
 Mahasiswa Prodi Teknik
 Elektro Fakultas Teknik
 Universitas Muhammdiyah
 Sumatera Utara



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA (UMSU)
FAKULTAS TEKNIK – TEKNIK ELEKTRO

BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR (SKRIPSI)

Nama : Azri Adlih
NPM : 2207220080
Fakultas/Jurusan : Teknik / Teknik Elektro
Judul Tugas Akhir : “Analisis Pengaruh Fluktuasi Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator Sinkron Pada Kapal *Tug Boat* di PT. Waruna Shipyards Indonesia”.

No.	Tanggal	Catatan Asistensi	Paraf Pembimbing
1.	15/12/2025	Revisi BAB I Pendahuluan (Latar belakang penelitian sebelumnya)	
2.	20/12/2025	Revisi Tujuan penelitian dan Manfaat penelitian	
3.	10/01/2026	Revisi BAB II Tinjauan Pustaka (masukkan tanda titik-titik pada tiap persamaan rumus)	
4.	15/01/2026	Revisi BAB II Tinjauan Pustaka (Menambahkan penjelasan setiap gambar)	
5.	18/01/2026	Revisi BAB II Metodologi Penelitian (Perbaiki flowchart penelitian)	
6.	26/01/2026	ACC Sempro	

Mengetahui
Dosen Pembimbing


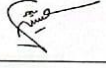


Dr. Faisal Irsan Pasaribu, S.T., S.Pd., M.T.
NIDN. 0130118101



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA (UMSU)
FAKULTAS TEKNIK – TEKNIK ELEKTRO

BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR (SKRIPSI)

Nama : Azri Adlih
NPM : 2207220080
Fakultas/Jurusan : Teknik / Teknik Elektro
Judul Tugas Akhir : “Analisis Pengaruh Fluktuasi Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator Sinkron Pada Kapal *Tug Boat* di PT. Waruna Shipyard Indonesia”.

No.	Tanggal	Catatan Asistensi	Paraf Pembimbing
1.	05/03/2026	Revisi Abstrak (masukkan latar belakang, tujuan penelitian, metode, dan hasil kesimpulan).	
2.	10/03/2026	Revisi Sistematika penulisan BAB IV	
3.	15/03/2026	Revisi menambahkan keterangan dan penjelasan gambar pada BAB IV	
4.	30/03/2026	Revisi BAB IV untuk memasukkan penjelasan pada setiap grafik	
5.	03/04/2026	Revisi BAB V (urutan kesimpulan sesuai rumusan masalah)	
6.	05/04/2026	ACC Semhas	

Mengetahui
Dosen Pembimbing



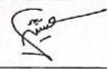

Dr. Faisal Irsan Pasaribu, S.T., S.Pd., M.T.
NIDN. 0130118101



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA (UMSU)
FAKULTAS TEKNIK – TEKNIK ELEKTRO

BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR (SKRIPSI)

Nama : Azri Adlih
NPM : 2207220080
Fakultas/Jurusan : Teknik / Teknik Elektro
Judul Tugas Akhir : “Analisis Pengaruh Fluktuasi Pembebanan Terhadap Efisiensi Generator Sinkron Pada Kapal *Tug Boat* di PT. Waruna Shipyards Indonesia”.

No.	Tanggal	Catatan Asistensi	Paraf Pembimbing
1.	10/04/2025	Revisi BAB IV (Mengganti nama subjudul pada hasil dan pembahasan)	
2.	11/04/2026	ACC Sidang	

Mengetahui
Dosen Pembimbing



Dr. Faisal Irsan Pasariibu, S.T., S.Pd., M.T.
NIDN. 0130118101