



**ANALISA PERHITUNGAN EFFISIENSI ENERGI LISTRIK DAN BIAYA
OPERASIONAL ENGINE GAS JENBACHER JGS 620 NS F-L DENGAN
KAPASITAS 3,3 MW DI PT MUSIM MAS MARTUBUNG**

**Disusun dan Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan Ujian Akhir Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik dari Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Pembangunan Panca Budi**

SKRIPSI

OLEH:

NAMA : DONY PRABOWO
NPM : 1824210257
PROGRAM STUDI : TEKNIK ELEKTRO
KONSENTRASI : TEKNIK ENERGI LISTRIK

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN PANCA BUDI
MEDAN
2021**

PENGESAHAN SKRIPSI

JUDUL : ANALISA PERHITUNGAN EFFISIENSI ENERGI LISTRIK DAN BIAYA
OPERASIONAL ENGINE GAS JENBACHER JGS 620 NS F-L DENGAN
KAPASITAS 3,3 MW DI PT MUSIM MAS MARTUBUNG

NAMA : DONY PRABOWO
N.P.M : 1824210257
FAKULTAS : SAINS & TEKNOLOGI
PROGRAM STUDI : Teknik Elektro
TANGGAL KELULUSAN : 06 Agustus 2021

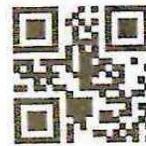
DIKETAHUI

DEKAN



Hamdani, ST., MT.

KETUA PROGRAM STUDI



Siti Anisah, S.T., M.T

**DISETUJUI
KOMISI PEMBIMBING**

PEMBIMBING I



Dr Rahmaniar, ST.,MT.

PEMBIMBING II



Pristisal Wibowo, ST., MT

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Sebagai civitas akademi Universitas Pembangunan Panca Budi, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Dony Prabowo
NPM : 1824210257
Fakultas : Sains dan Teknologi
Program Studi : Teknik Elektro
Jenis Karya : Skripsi

Dalam pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Pembangunan Panca Budi Hak Bebas Non-eksklusif (Non Exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah yang berjudul **“Analisa Perhitungan Effisiensi Energi Listrik Dan Biaya Operasional Engine Gas Jenbacher JGS 620 NS F-L Dengan Kapasitas 3,3 MW Di PT Musim Mas Martubung”** Universitas Pembangunan Panca Budi berhak menyimpan, mengalih-media/format mengelola dalam bentuk pangkalan data (Data Base) merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Medan, 29 Maret 2021


Dony Prabowo

Hal : Permohonan Meja Hijau

FM-BPAA-2012-041

Medan, 06 Juni 2021
 Kepada Yth : Bapak/Ibu Dekan
 Fakultas SAINS & TEKNOLOGI
 UNPAB Medan
 Di -
 Tempat

Dengan hormat, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : DONY PRABOWO
 Tempat/Tgl. Lahir : MEDAN / 30 Nopember 1995
 Nama Orang Tua : SUHAIRY
 N. P. M : 1824210257
 Fakultas : SAINS & TEKNOLOGI
 Program Studi : Teknik Elektro
 No. HP : 081377309127
 Alamat : Jl. Tangguk Bongkar No 11

Datang bermohon kepada Bapak/Ibu untuk dapat diterima mengikuti Ujian Meja Hijau dengan judul Analisa Perhitungan Efisiensi Energi Listrik Dan Biaya Operasional Engine Gas Jenbacher JGS 620 Ns F-L Dengan Kapasitas 3,3 MW di PT Musim Mas Martubung. Selanjutnya saya menyatakan :

1. Melampirkan KKM yang telah disahkan oleh Ka. Prodi dan Dekan
2. Tidak akan menuntut ujian perbaikan nilai mata kuliah untuk perbaikan indek prestasi (IP), dan mohon diterbitkan ijazahnya setelah lulus ujian meja hijau.
3. Telah tercap keterangan bebas pustaka
4. Tertampir surat keterangan bebas laboratorium
5. Tertampir pas photo untuk ijazah ukuran 4x6 = 5 lembar dan 3x4 = 5 lembar Hitam Putih
6. Tertampir foto copy STTB SLTA dilegalisir 1 (satu) lembar dan bagi mahasiswa yang lanjutan D3 ke S1 lampirkan ijazah dan transkripnya sebanyak 1 lembar.
7. Tertampir pelunasan kwintasi pembayaran uang kuliah berjalan dan wisuda sebanyak 1 lembar
8. Skripsi sudah dijilid lux 2 exemplar (1 untuk perpustakaan, 1 untuk mahasiswa) dan jilid kertas jeruk 5 exemplar untuk penguji (bentuk dan warna penjiilidan diserahkan berdasarkan ketentuan fakultas yang berlaku) dan lembar persetujuan sudah di tandatangi dosen pembimbing, prodi dan dekan
9. Soft Copy Skripsi disimpan di CD sebanyak 2 disc (Sesuai dengan Judul Skripsinya)
10. Tertampir surat keterangan BKKOL (pada saat pengambilan ijazah)
11. Setelah menyelesaikan persyaratan point-point diatas berkas di masukan kedalam MAP
12. Bersedia melunaskan biaya-biaya uang dibebankan untuk memproses pelaksanaan ujian dimaksud, dengan rincian sbb :

1. [102] Ujian Meja Hijau	: Rp.	1,000,000
2. [170] Administrasi Wisuda	: Rp.	1,750,000
Total Biaya	: Rp.	2,750,000

Ukuran Toga :



Diketahui/Dijetujui oleh :

Hormat saya



Hamdani, ST., MT.
 Dekan Fakultas SAINS & TEKNOLOGI



DONY PRABOWO
 1824210257

Catatan :

- 1. Surat permohonan ini sah dan bertaku bila :
 - a. Telah dicap Bukti Pelunasan dan UPT Perpustakaan UNPAB Medan.
 - b. Melampirkan Bukti Pembayaran Uang Kuliah aktif semester berjalan
- 2. Dibuat Rangkap 3 (tiga), untuk - Fakultas - untuk BPAA (asli) - Mhs.ybs.

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan disuatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam skripsi ini dan diterbitkan dalam daftar pustaka.

Medan, 29 Maret 2021



Dony Prabowo

NPM: 1824210257

SURAT PERNYATAAN KEHILANGAN DOKUMEN/BERKAS

Sebagai civitas akademi Universitas Pembangunan Panca Budi, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Dony Prabowo

NPM : 1824210257

Fakultas : Sains dan Teknologi

Program Studi : Teknik Elektro

Menerangkan bahwa benar saya telah kehilangan sebuah dokumen/berkas sebagai berikut:

NO	NAMA DOKUMEN/BERKAS	KETERANGAN
1	Permohonan Judul Tesis / Skripsi / Tugas Akhir	Judul: "ANALISA PERHITUNGAN EFFISIENSI ENERGI LISTRIK DAN BIAYA OPERASIONAL ENGINE GAS JENBACHER JGS 620 NS F-L DENGAN KAPASITAS 3,3 MW DI PT MUSIM MAS MARTUBUNG".

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Medan, 3 Maret 2022

Diketahui;

Yang Menyatakan;

Ka. Prodi



Siti Anisah, S.T., M.T



Dony Prabowo

**ANALISA PERHITUNGAN EFISIENSI ENERGI LISTRIK
DAN BIAYA OPERASIONAL *ENGINE GAS* JENBACHER JGS
620 NS F-L DENGAN KAPASITAS 3,3 MW DI PT MUSIM MAS
MARTUBUNG**

Dony Prabowo

Dr. Rahmانيar, S.T., M.T

Pristisal Wibowo, S.T., M.T

Email: prabowodony95@gmail.com

Program Studi Teknik Elektro

ABSTRAK

Pada saat ini perkembangan di bidang industri dan bidang teknologi sudah mengalami kemajuan yang sangat cepat. Hal ini sangat mempengaruhi peningkatan kebutuhan energi listrik. Dengan melihat perkembangan tersebut, maka diperlukan suatu peningkatan dalam hal produksi listrik dalam suatu perusahaan yang selama ini hanya menggunakan energi listrik dari PLN. Penelitian dengan judul Analisa Perhitungan dan Effisiensi Energi Listrik Dan Biaya Operasional *Engine Gas Jenbacher* JGS 620 NS F-l. *Engine Gas* menjadi solusi untuk pembangkit listrik dengan efisiensi yang tinggi serta ramah lingkungan. Dengan teknologi *Leannox* dimana mesin menggunakan metode *Lean Mix* memanfaatkan surplus udara sehingga bahan bakar yang dibutuhkan tidak terlalu banyak dan meminimalisir polusi udara. Terdapat 2 masalah dalam penelitian ini, masalah pertama tentang efisiensi energi listrik dan rasio penggunaan bahan bakar, yang kedua perhitungan dan biaya operasionalnya dari engine gas berapa besar untuk beroperasi. Dengan metode kuantitatif maka didapatkan hasil efisiensi energi listrik sebesar **42,67%** dengan biaya operaional **Rp. 410.438.832**

Kata Kunci: **Engine Gas, Leannox, Lean Mix, Effisiensi**

***ANALYSIS OF ELECTRIC ENERGY EFFICIENCY CALCULATIONS AND
OPERATIONAL COST OF JENBACHER ENGINE GAS JGS 620 NS F-L
WITH A CAPACITY OF 3.3 MW AT PT MUSIM MAS MARTUBUNG***

Dony Prabowo

Dr. Rahmaniar, S.T., M.T

Pristisal Wibowo, S.T., M.T

Email: prabowodony95@gmail.com

Electrical Engineering Department

ABSTRACT

*At this time, developments in the industrial sector and in the technology sector have progressed very rapidly. This greatly affects the increasing demand for electrical energy. By looking at these developments, it is necessary to increase in terms of electricity production in a company that so far only uses electrical energy from PLN. The research entitled Calculation Analysis and Efficiency of Electrical Energy and Operating Costs for the Jenbacher Gas Engine JGS 620 NS F-l. Gas Engines is a solution for power plants with high efficiency and environmentally friendly. With Leannox technology, the engine uses the Lean Mix method to take advantage of the surplus air so that the fuel needed is not too much and minimizes air pollution. There are 2 problems in this research, the first problem is about the efficiency of electrical energy and the ratio of fuel usage, the second is the calculation and the operational cost of how much gas engine operates. . With the quantitative method, the results of electrical energy efficiency are **42.67%** with an operational cost of **Rp. 410,438,832***

Keywords: *Gas Engine, Leannox, Lean Mix, Efficiency*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya penulis masih diberikan nikmat iman, nikmat islam, nikmat sehat sehingga penulis bisa menyelesaikan skripsi ini. Tak lupa sholawat dan salam senantiasa tercurahkan kepada baginda Nabi Muhammad SAW juga kepada segenap keluarga dan para sahabat.

Penyusunan skripsi ini yang berjudul “**Analisa Perhitungan Effisiensi Energi Listrik dan Biaya Operasional Engine Gas Jenbacher JGS 620 NS F-L dengan Kapasitas 3,3 MW di PT Musim Mas Martubung**” bertujuan untuk memenuhi syarat-syarat untuk bisa mencapai gelar Sarjana Teknik di Universitas Pembangunan Panca Budi. Karena nya penulis mencoba menyusun laporan skripsi ini sesuai dengan jurusan yang diambil.

Selama menyelesaikan laporan tugas akhir ini, penulis telah mendapat bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, baik berupa material, spiritual, informasi maupun dari segi administrasi. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. M. Isa Indrawan, S.E., M.M selaku Rektor Universitas Pembangunan Panca Budi.
2. Bapak Hamdani, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Pembangunan Panca Budi.
3. Ibu Siti Anisah, S.T., M.T selaku Ketua Prodi Teknik Elektro Universitas Pembangunan Panca Budi sekaligus ketua penguji penulis yang telah berkenan menguji skripsi yang penulis kerjakan.
4. Ibu Dr. Rahmaniar, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan ide, saran dan waktu bimbingannya kepada penulis dalam menyelesaikan laporan skripsi ini.
5. Bapak Pristisal Wibowo, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang sudah berkenan memberikan ilmu dan juga solusi untuk perbaikan tata tulis laporan skripsi ini.
6. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Teknik Elektro Universitas Pembangunan Panca Budi yang sudah berkenan memberikan pengetahuan dan ilmu yang bermanfaat selama masa perkuliahan penulis.
7. Dan secara khusus penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada kedua orangtua penulis, Ibunda Afriani dan Ayahanda Suhairi yang selalu memberikan dukungan doa dan semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

8. Seluruh teman-teman angkatan terutama untuk kelas Reguler II LG J/S selama masa perkuliahan sangat supportif dan kompak dalam menjalani hari-hari.

Walaupun penulis sudah berupaya semaksimal mungkin, namun penulis juga menyadari kemungkinan terdapat kekurangan. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun yang dapat memperbaiki laporan tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi siapa pun yang membacanya.

Medan, 29 Maret 2021

Dony Prabowo

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK

ABSTRACT

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR RUMUS	viii

BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metode Penelitian.....	4
1.6 Sistematis Penulisan	4
BAB 2 LANDASAN TEORI	6
2.1 Generator Sinkron	6
2.1.1 Konstruksi Generator Sinkron.....	7
2.1.2 Stator.....	8
2.1.3 Rotor	9
2.1.4 Prinsip Kerja Generator Sinkron	10
2.1.5 Karakteristik Generator Sinkron	14
2.1.6 Pengaturan Tegangan Generator	15
2.1.7 Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron	16
2.1.8 Sistem Eksitasi Dengan Sikat.....	17
2.1.9 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat	19
2.1.10 Daya Listrik.....	21

2.1.11 Faktor Daya, Daya Reaktif, dan Daya Nyata	21
2.1.12 Efisiensi Generator	23
2.2 Motor Bakar	24
2.2.1 Siklus Kerja Motor Bakar	25
2.2.2 Siklus Ideal Otto (Siklus Volume Konstan).....	28
2.2.3 Tekanan Efektif Rata-Rata.....	32
2.2.4 Daya Indikator.....	33
2.2.5 Piston Speed	33
2.2.6 Daya Poros	34
2.2.7 Konsumsi Bahan Bakar	35
2.2.8 Efisiensi Thermal	36
2.2.9 Efisiensi Mekanis	36
2.2.10 Efisiensi Volumetris	36
2.2.11 Engine Gas Jenbacher	37
2.2.12 Sistem Pembakaran Pada Engine Gas	39
2.2.13 Emisi Gas Buang Engine Gas	43
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	45
3.1 Umum.....	45
3.2 Tempat dan Waktu	45
3.3 Metode Penelitian.....	45
3.4 Tahapan Perhitungan.....	46
3.5 Flowchart Alur Penelitian.....	47
3.6 Spesifikasi Mesin	48
BAB 4 HASIL PENELITIAN.....	50
4.1 Perhitungan Nilai LHV	50
4.2 Revolusi per Menit	51
4.3 Volume Cylinder	51
4.4 Piston Speed.....	52
4.5 Data Operasional Engine Gas	52
4.6 Analisa Data.....	53

4.7 Perbandingan Tagihan/Biaya Listrik Dari PLN.....	63
4.8 Tegangan Drop.....	65
4.9 Kerugian Jika PLN TRIP.....	67
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA	71

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konversi Satuan Gas ke Daya	41
Tabel 2.2 Sifat Fisiokimia Bahan Bakar Gas Alam, Bensin dan Solar	42
Tabel 4.1 Data Kandungan Natural Gas PGN	50
Tabel 4.2 Data operasional	52
Tabel 4.3 Hasil Analisa Data	60
Tabel 4.4 Data Pemakaian PLN	63
Tabel 4.5 Data Teknis Distribusi	65

DAFTAR RUMUS

Rumus 2.1 Putaran Generator.....	10
Rumus 2.2 Gaya Gerak Listrik	11
Rumus 2.3 Gaya Gerak Listrik	11
Rumus 2.4 Gaya Gerak Listrik	11
Rumus 2.5 GGL Induksi	12
Rumus 2.6 GGL Induksi	14
Rumus 2.7 Faktor Daya = 1.....	15
Rumus 2.8 Faktor Daya Tertinggal.....	15
Rumus 2.9 Faktor Daya Mendahului	15
Rumus 2.10 Pengaturan Tegangan Generator	16
Rumus 2.11 Daya Listrik	21
Rumus 2.12 Cos phi.....	22
Rumus 2.13 Daya Reaktif	22
Rumus 2.14 Daya Nyata.....	23
Rumus 2.15 Daya Nyata.....	23
Rumus 2.16 Effisiensi Generator.....	24
Rumus 2.17 Volume Langkah.....	27
Rumus 2.18 Rasio Kompresi.....	27
Rumus 2.19 Langkah Hisap	28
Rumus 2.20 Kompresi Langkah	29
Rumus 2.21 Kompresi Langkah	29
Rumus 2.22 Kompresi Langkah	29

Rumus 2.23 Kompresi Langkah	29
Rumus 2.24 Kompresi Langkah	29
Rumus 2.25 Pembakaran Kalor	30
Rumus 2.26 Pembakaran Kalor	30
Rumus 2.27 Ekspansi Isentropik	31
Rumus 2.28 Pembuangan Kalor	32
Rumus 2.29 Tekanan Efektif Rata-Rata.....	32
Rumus 2.30 Daya Indikator.....	33
Rumus 2.31 Piston Speed.....	34
Rumus 2.32 Daya Poros.....	34
Rumus 2.33 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik.....	35
Rumus 2.34 Effisiensi Thermal	36
Rumus 2.35 Effisiensi Mekanis	36
Rumus 2.36 Effisiensi Volumetris	37

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagian-Bagian Generator Sinkron.....	6
Gambar 2.2 Konstruksi Generator Sinkron	8
Gambar 2.3 Inti Stator dan Alur Pada Stator.....	9
Gambar 2.4 Rotor Kutub Menonjol.....	10
Gambar 2.5 Gelombang Tegangan Bolak Balik.....	13
Gambar 2.6 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban dan Grafik Hubungan Arus Penguat Medan E_a	14
Gambar 2.7 Voltage Drop Pada Saluran Distribusi.....	16
Gambar 2.8 Hubungan Fasa Dengan Beban Induktif.....	17
Gambar 2.9 Sistem Eksitasi dengan Sikat (<i>Brush Excitation</i>)	19
Gambar 2.10 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (<i>Brushless Excitation</i>).....	21
Gambar 2.11 Motor Bakar.....	25
Gambar 2.12 Siklus Motor Bakar Pada Mesin 4 Langkah	26
Gambar 2.13 Diagram p-v dan T-s Siklus Otto.....	29
Gambar 2.14 Engine Gas Jenbacher.....	39
Gambar 2.15 Sistem Bahan Bakar Engine Gas	41
Gambar 2.16 Grafik Bahan Bakar	44
Gambar 3.1 Flowchart Analisa Data	47
Gambar 3.2 Nameplate Engine Gas	48
Gambar 3.3 Technical Data	49
Gambar 4.1 Grafik Hasil Analisa Data.....	61

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dilatar belakangi dari buku *Natural Gas Engines* karya Kalyan Kumar Srinivasan (2019) menjelaskan di antara banyak alternatif pengganti bensin dan solar, gas alam dianggap sebagai bahan bakar yang layak untuk aplikasi transportasi dan pembangkit listrik di masa depan. Di buku tersebut memberikan gambaran pengantar tentang peran gas alam dalam transportasi masa depan dan sistem pembangkit listrik tren saat ini dan yang diproyeksikan hingga 2040 untuk konsumsi energi global dan kontribusi terkait gas alam di berbagai sektor industri, transportasi, perumahan dan lain-lain sedang dalam pembicaraan. Keuntungan dan tantangan gas alam sebagai bahan bakar pembakaran, penyimpanan bahan bakar gas alam dan tantangan transportasi (seperti gas alam terkompresi dan gas alam cair), dan pemanfaatan gas alam dalam mesin pembakaran internal (*Internal Combustion*) ditinjau. Strategi lanjutan untuk gas alam pembakaran suhu rendah (*Low Temperature Combustion*) untuk mesin, mesin pembakaran gas alam dalam pengapian percikan (*Spark Ignition*) dengan fokus khusus pada injeksi langsung gas alam, pemanfaatan gas alam di mesin kapal dan pengapian kompresi (*Compression Ignition*).

Generator sinkron merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran *flywheel engine gas* sedangkan

energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotor yang terdapat di generator sinkron. Effisiensi energi listrik adalah perbandingan antara daya keluar (P_{out}) dibagi dengan daya masuk (P_{in}) dan dinyatakan dalam bentuk persentase (%), dimana daya keluaran berupa energi listrik (Kw) dan daya masuk berupa nilai *Low Heat Value* (LHV) dikali jumlah bahan bakar (*Natural Gas/Nm³*). Dalam skripsi ini effisiensi energi listrik dapat dikonversikan menjadi biaya operasional *engine gas* dengan membandingkan invoice pemakaian energi listrik dari PLN dan invoice penggunaan bahan bakar berupa *Natural Gas*.

Engine gas menjadikan pembangkit listrik yang efisien, handal, serta ramah lingkungan jika dibandingkan dengan turbin uap yang memiliki kekurangan di segmen polusi dan biaya operasionalnya. Dengan sistem kerja *Cogeneration Heat and Power* energi yang dapat dihasilkan oleh *engine gas* bukan hanya energi listrik, tetapi juga energi panas yang dapat dimanfaatkan menjadi bahan bakar untuk boiler HRSG yang dapat menghasilkan steam untuk kebutuhan produksi.

PT Musim Mas perusahaan yang beroperasi secara global di seluruh spektrum bisnis kelapa sawit. Sebagai perusahaan yang mendukung gerakan go green, PT Musim Mas berupaya untuk meminimalisir polusi udara dan limbah B3. Salah satunya adalah pembaruan penggunaan peralatan pembangkit listrik, pergerakkan dari pembangkit listrik menggunakan bahan bakar solar, batu bara dan cangkang kelapa sawit. Kini PT Musim Mas membangun pembangkit listrik dari energi gas alam/natural gas dengan unit mesin Jenbacher JGS 620 N/S F-1.

Untuk itu pada tugas akhir ini akan dibahas bagaimana karakteristik generator sinkron dari *engine gas* Jenbacher JGS 620 N/S F-1, pola pengoperasian dan biaya

operasional serta efisiensi energi listrik dimana untuk mendapatkan hasil tersebut akan dilakukan penelitian terlebih dahulu.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari tugas akhir ini yaitu:

1. Berapa efisiensi energi listrik yang dihasilkan oleh *engine gas* selama beroperasi serta ratio penggunaan bahan bakar dengan energi listrik yang dihasilkan
2. Bagaimana perhitungan biaya operasional *engine gas selama* beroperasi dan berapa jumlah biaya yang harus dikeluarkan untuk menjalankan *engine gas* tersebut

1.3 Tujuan Penulisan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penulisan skripsi ini adalah:

1. Untuk mengetahui efisiensi energi listrik yang dihasilkan dan ratio bahan bakar oleh *engine gas* tersebut.
2. Untuk mengetahui jumlah biaya operasional *engine gas* selama tidak menggunakan daya listrik dari PLN

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini yaitu:

1. Penelitian menggunakan generator *engine gas* Jenbacher JGS 620 Ns F-L di PT Musim Mas Martubung

2. Biaya operasional dihitung selama *engine gas* beroperasi di PT Musim Mas Martubung
3. Perbandingan biaya operasional menggunakan *engine gas* dengan daya listrik dari PLN

1.5 Metode Penelitian

Metode yang dilakukan pada penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Studi literatur

Yaitu dengan mempelajari buku referensi, artikel dari internet, dan bahan kuliah yang mendukung dan berkaitan dengan topik tugas akhir ini.

2. Metode diskusi

Yaitu berupa tanya jawab dengan dosen pembimbing mengenai masalah yang timbul selama penulisan tugas akhir ini berlangsung.

3. Studi lapangan

Yaitu dengan melakukan penelitian di PT Musim Mas Martubung

1.6 Sistematis Penulisan

Sistematika penulisan dibuat dalam 5 bab dengan pembahasan masing-masing bab adalah sebagai berikut:

BAB 1: PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang pemilihan judul, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penulisan, dan manfaat penelitian.

BAB 2: LANDASAN TEORI

Bab ini menguraikan secara singkat mengenai teori-teori dasar dan pendukung yang dapat menunjang penelitian dan pembuatan skripsi ini.

BAB 3: METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini penjelasan dapat meliputi diagram blok, diagram alur sistem kerja atau deskripsi matematis dari objek yang diteliti.

BAB 4: HASIL PENELITIAN

Bab ini berisi penjabaran analisa penerapan dan pengujian sistem berdasarkan indikator kerja yang telah dijelaskan sebelumnya. Penjabaran analisa pada bab ini dilakukan hingga muncul hasil akhir dari penelitian

BAB 5: KESIMPULAN DAN SARAN

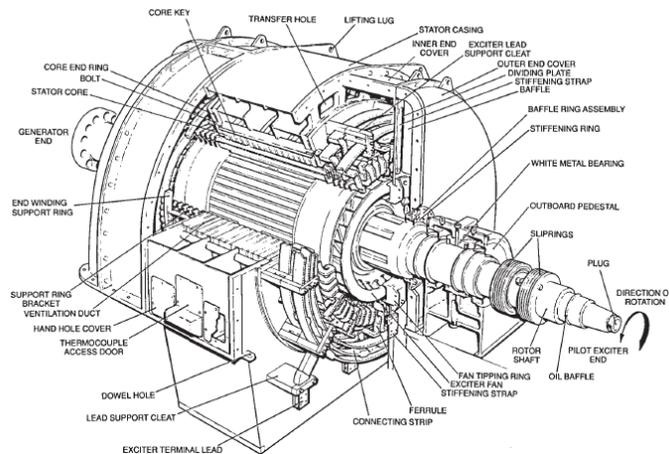
Bab ini berisi kesimpulan hasil penelitian serta saran perbaikan metode atau sistem yang dianjurkan dalam penelitian selanjutnya

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Generator Sinkron

Generator arus bolak-balik (AC) atau disebut dengan alternator adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik dengan perantara induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator). Dikatakan generator sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Kumparan medan pada generator sinkron terletak pada rotornya sedangkan kumparan jangkarnya terletak pada stator.



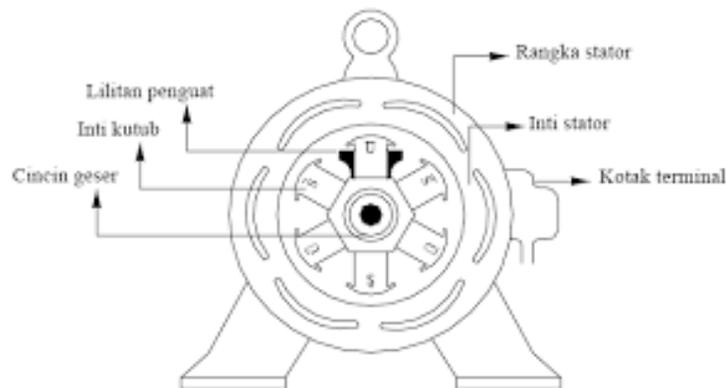
Gambar 2.1 Bagian-Bagian Generator Sinkron

Sumber: Shahl, Suad Ibrahim, 2015

2.1.1 Konstruksi Generator Sinkron

Secara umum konstruksi generator sinkron terdiri dari stator dan rotor. Keduanya merupakan rangkaian magnetik yang berbentuk simetris dan silindris. Selain itu generator sinkron memiliki celah udara ruang antara stator dan rotor yang berfungsi sebagai tempat terjadinya fluksi atau induksi energi listrik dari rotor ke stator. Adapun konstruksi generator AC adalah sebagai berikut:

- Rangka stator terbuat dari besi tuang yang merupakan rumah stator tersebut.
- Stator adalah bagian yang diam. Memiliki alur-alur sebagai tempat meletakkan lilitan stator. Lilitan stator berfungsi sebagai tempat GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi.
- Rotor adalah bagian yang berputar, pada bagian ini terdapat kutu-kutub magnet dengan lilitannya yang dialiri arus searah, melewati cincin geser dan sikat-sikat.
- Cincin geser terbuat dari bahan kuningan atau tembaga yang dipasang pada poros dengan memakai bahan isolasi. Slip ring ini berputar bersamasama dengan poros dan rotor.



Gambar 2.2 Konstruksi Generator Sinkron

Sumber: Shahl, Suad Ibrahim, 2015

2.1.2 Stator

Stator merupakan bagian yang diam (statis) dan merupakan gulungan kawat penghantar yang disusun sedemikian rupa dan ditempatkan pada alur-alur inti besi yang disebut dengan belitan jangkar. Pada penghantar tersebut adalah tempat terbentuknya GGL induksi yang diakibatkan dari medan magnet putar dari rotor yang memotong kumparan penghantar stator. Bagian yang diam (stator) terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

- Inti Stator Bentuk dari inti stator ini berupa cincin laminasi-laminasi yang diikat serapat mungkin untuk menghindari rugi-rugi arus eddy (*eddy current losses*). Pada inti ini terdapat slot-slot untuk menempatkan konduktor dan untuk mengatur arah medan magnetnya. Untuk menghindari arus pusar dan panas yang timbul, maka inti stator dibuat dari lempengan baja tipis dan isolasi satu terhadap yang lain.

- Belitan Stator adalah bagian stator yang terdiri dari beberapa batang konduktor yang terdapat di dalam slot dan ujung kumparan. Masing-masing slot dihubungkan untuk mendapatkan tegangan induksi.
- Alur Stator merupakan bagian stator yang berperan sebagai tempat belitan stator ditempatkan.
- Rumah Stator yaitu bagian dari stator yang umumnya terbuat dari besi tuang yang berbentuk silinder. Bagian belakang dari rumah stator ini biasanya memiliki sirip-sirip sebagai alat bantu dalam proses pendinginan.



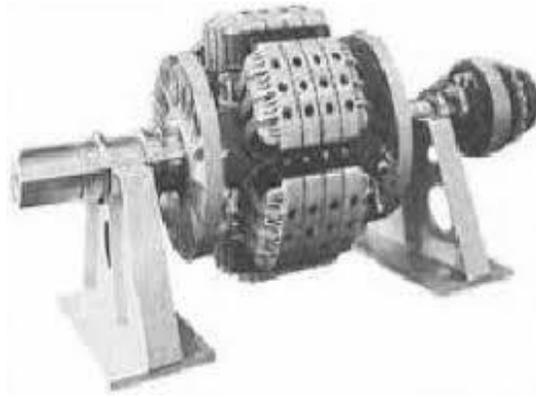
Gambar 2.3 Inti Stator dan Alur Pada Stator

Sumber: Pribadi

2.1.3 Rotor

Rotor merupakan bagian yang bergerak. Rotor berfungsi untuk membangkitkan medan magnet sehingga menghasilkan tegangan kemudian akan diinduksikan ke stator. Rotor pada generator juga berfungsi sebagai tempat belitan medan (eksitasi). Dimana Kumparan medan magnet disusun pada alur-alur inti besi

rotor, sehingga apabila pada kumparan tersebut dialirkan arus searah (DC) maka akan membentuk kutub-kutub magnet utara dan selatan pada inti rotor.



Gambar 2.4 Rotor Kutub Menonjol

Sumber: Shahl, Suad Ibrahim, 2015

2.1.4 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang akan disuplai oleh arus searah sehingga menimbulkan fluks yang besarnya tetap terhadap waktu. Kemudian penggerak mula (*Prime Mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya sesuai dengan persamaan:

$$n = \frac{120.f}{p} \quad (2.1)$$

Dimana:

n = Kecepatan putar 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 menginduksikan tegangan tiga fasa pada kumparan jangkar sehingga akan menimbulkan medan putar pada stator. Perputaran tersebut menghasilkan 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. GGL induksi (E_a) pada alternator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator bila rotor diputar di sekitar stator. Besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan (I_f) yang diberikan pada rotor.

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

$$E = 4,44 \times f \cdot \varphi \cdot T \quad (2.2)$$

Jika $f = \frac{n \cdot p}{120}$, maka:

$$E = 4,44 \times \frac{n \cdot p}{120} \cdot \varphi \cdot T \quad (2.3)$$

$$E = \frac{44,4 \cdot n \cdot p \cdot \varphi \cdot T}{120} \quad (2.4)$$

Bila $C = \frac{44,4 \cdot p \cdot T}{120}$, maka:

$$E = C n \varphi \quad (2.5)$$

Dimana:

E = GGL induksi (volt)

n = Putaran (rpm)

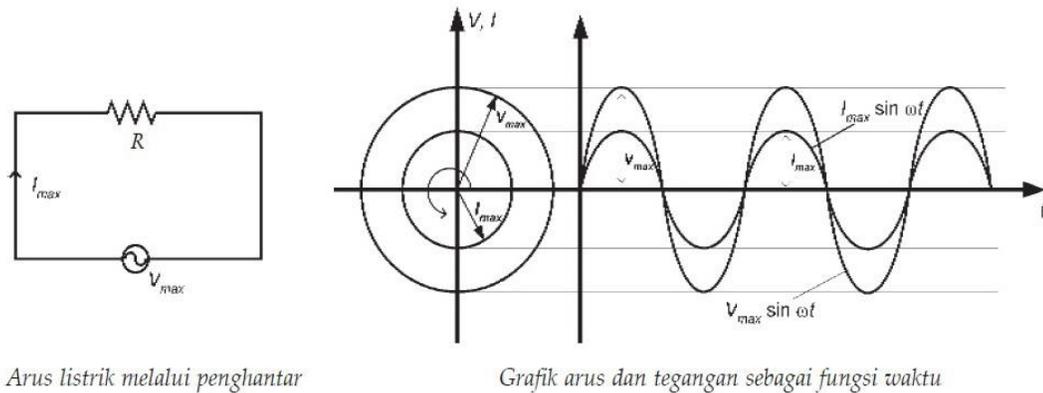
p = Jumlah kutub

T = Banyak lilitan/fase = $1/2$

φ = Fluks Magnetik (weber)

Z = Banyak sisi kumparan

Prinsip kerja dari generator sesuai dengan hukum Lens, yaitu arus listrik yang diberikan pada stator akan menimbulkan momen elektromagnetik yang bersifat melawan putaran rotor sehingga menimbulkan GGL pada kumparan rotor. Tegangan GGL ini akan menghasilkan suatu arus jangkar. Jadi *engine gas* sebagai *prime mover* akan memutar rotor generator, kemudian rotor diberi eksitasi agar menimbulkan medan magnet yang berpotongan dengan konduktor pada stator dan menghasilkan tegangan pada stator. Karena terdapat dua kutub yang berbeda yaitu utara dan selatan, maka pada 90° pertama akan dihasilkan tegangan maksimum positif dan pada sudut 270° kedua akan dihasilkan tegangan maksimum negatif. Ini terjadi secara terus menerus/kontinyu. Bentuk tegangan seperti ini lebih dikenal sebagai fungsi tegangan bolak-balik



Arus listrik melalui penghantar

Grafik arus dan tegangan sebagai fungsi waktu

Gambar 2.5 Gelombang Tegangan Bolak Balik

Sumber: Dijiteng Marsuadi, 2015

2.1.5 Karakteristik Generator Sinkron

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

$$E_a = C n \varphi \quad (2.6)$$

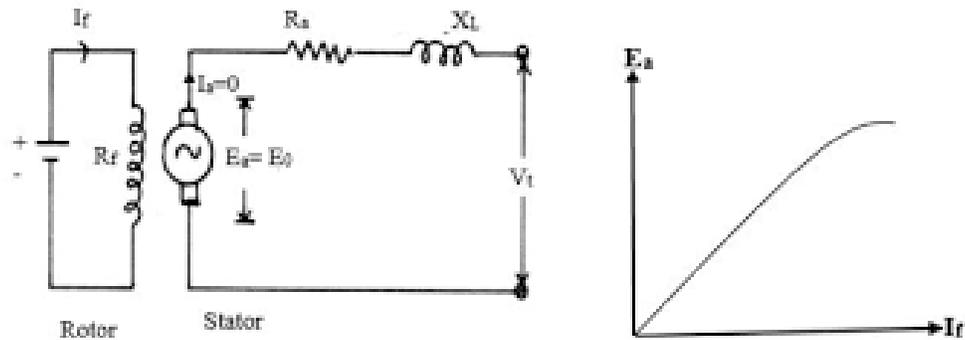
Dimana :

C = konstanta mesin

n = kecepatan putaran (rpm)

φ = fluks yang dihasilkan oleh I_f

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f)



Gambar 2.6 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban dan Grafik Hubungan Arus Penguat Medan E_a

Sumber: Suad Ibrahim Shahl, 2015

Besar GGL armatur tanpa beban pada faktor daya beban = 1, PF(Power Factor/Cosphi) tertinggal dan PF mendahului adalah sebagai berikut :

- Pf = 1

$$E_a = \sqrt{(V_t + I_a \cdot R_a)^2 + (I_a \cdot X_L)^2} \quad (2.7)$$

- Pf = tertinggal

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \sin \theta + I_a \cdot X_L)^2} \quad (2.8)$$

- Pf = mendahului

$$E_a = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \sin \theta - I_a \cdot X_L)^2} \quad (2.9)$$

Dimana :

E_a = tegangan induksi pada jangkar per fasa (Volt)

V_t = tegangan terminal output per fasa (Volt)

R_a = resistansi jangkar per fasa (ohm)

X_L = reaktansi bocor per fasa (ohm)

2.1.6 Pengaturan Tegangan Generator

Jika beban ditambahkan pada generator AC yang sedang bekerja pada kecepatan konstan dan dengan eksitasi medan konstan, tegangan terminal akan berubah. Besarnya perubahan akan bergantung pada rancangan mesin dan pada faktor daya beban. Persen pengaturan (pada faktor daya tertentu)

$$\% = \frac{\text{tegangan tanpa beban} - \text{tegangan beban penuh}}{\text{tegangan beban penuh}} \times 100 \quad (2.10)$$

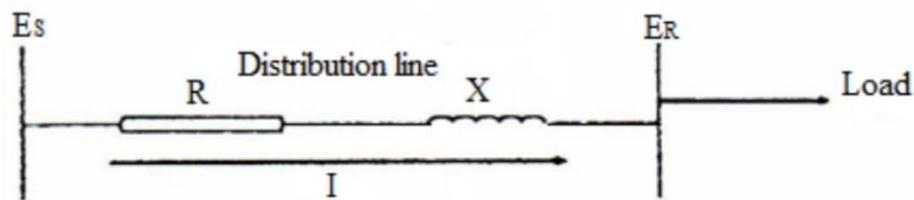
Faktor-faktor yang mempengaruhi pengaturan generator adalah sebagai berikut:

- Penurunan tegangan I.R pada lilitan jangkar.
- Penurunan tegangan I .XL pada lilitan jangkar.
- Reaksi jangkar (pengaruh magnetisasi dari arus jangkar).

Karena tegangan terminal generator AC banyak berubah dengan berubahnya beban, maka untuk operasi hampir semua peralatan listrik diperlukan usaha untuk menjaga agar tegangannya konstan. Cara yang biasa dilakukan untuk ini adalah menggunakan alat pembantu yang disebut pengatur tegangan (*voltage regulator*) untuk mengendalikan besarnya eksitasi medan DC yang dicatukan pada generator. Bila tegangan terminal generator turun karena perubahan beban, pengatur tegangan secara otomatis menaikkan pembangkitan medan sehingga tegangan kembali normal. Sama halnya bila tegangan terminal naik karena perubahan beban, maka pengatur akan mengembalikan nilai tegangan normalnya dengan mengurangi eksitasi medan.

2.1.7 Penurunan Tegangan (*Voltage Drop*)

Penurunan tegangan (*Voltage Drop*) adalah beda tegangan yang dihitung dari titik sumber sampai ke titik beban sesuai dengan panjang penyulang. Jika karakteristik beban resistansi (R) dan reaktansi (X) dari saluran distribusi diketahui dan juga power factor ($\cos \varphi$) beban diketahui maka dapat langsung dihitung *Voltage Drop* nya. Pada gambar dibawah terlihat bahwa pada saluran distribusi merupakan beban (R) resistif dan (X) reaktif.

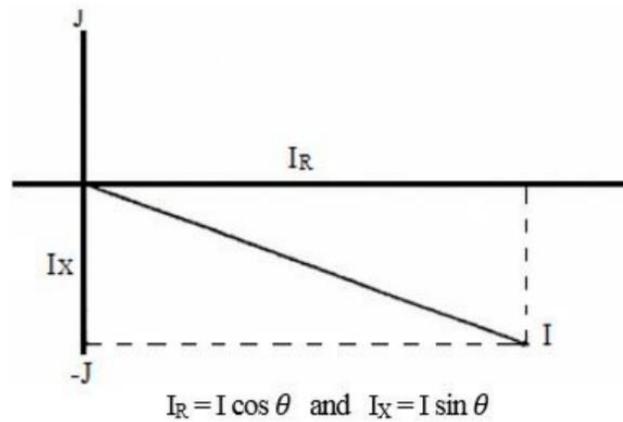


Gambar 2.7 Voltage Drop Pada Saluran Distribusi

Sumber: Feri Saswoyo Hadisantoso, 2016

Penurunan tegangan sama dengan $E_S - E_R$. Jika diproyeksikan pada sumbu axis E_R dapat dilihat pada gambar bahwa penurunan tegangan hampir sama dengan $I_R \cdot R + I_x \cdot X$ dan komponen penurunan tegangan di luar fasa ($-j I_x \cdot R$ dan $j I_R \cdot X$) tidak mempengaruhi hasil totalnya. Untuk alasan ini, persamaan berikut ini berlaku untuk hampir seluruh penggunaan;

$$\text{Voltage Drop} = I (R \cos \theta + X \sin \theta)$$



Gambar 2.8 Hubungan Fasa Dengan Beban Induktif

Sumber: Feri Saswoyo Hadisantoso, 2016

Formula ini memberikan penurunan tegangan pada satu konduktor, line to netral. Satu fasa penurunan tegangan adalah 2 kali nilai persamaan di atas. Tiga fasa lline to line penurunan tegangan adalah $\sqrt{3}$ kali dari nilai persamaan diatas. Dengan demikian persamaan untuk penurunan tegangan 3 fasa menjadi sebagai berikut:

$$\text{Voltage Drop} = \sqrt{3} \times I \times l (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

Dimana:

I = Arus (A)

l = Panjang Penyulang (m)

R = Resistansi (Ω/m)

X = Reaktansi (Ω/m)

Φ = Sudut Power Factor

2.1.8 Sistem Eksitasi pada Generator Sinkron

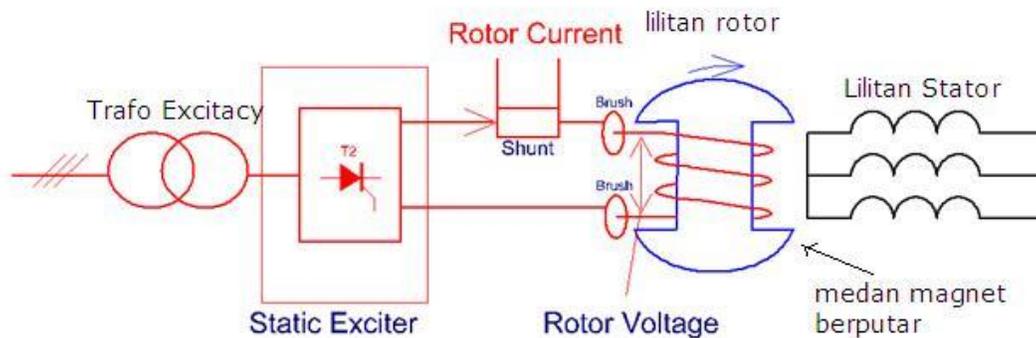
Eksitasi atau penguatan medan merupakan bagian yang penting dari sebuah generator sinkron. Tidak hanya untuk menjaga tegangan terminal tetap konstan tetapi juga harus merespon terhadap perubahan beban yang tiba-tiba. Eksitasi pada generator sinkron adalah pemberian arus searah pada belitan medan yang terdapat pada rotor. Sesuai dengan prinsip elektromagnet, apabila suatu konduktor yang berupa kumparan yang dialiri listrik arus searah maka kumparan tersebut akan menjadi magnet sehingga akan menghasilkan fluks-fluks magnet. Apabila 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 akan menghasilkan tegangan bolak-balik. 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 dihasilkan oleh sebuah generator.

Sistem eksitasi pada generator listrik ini dapat dibedakan menjadi 2 macam, yaitu sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*) dan sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*).

2.1.9 Sistem Eksitasi Dengan Sikat

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 permanen. Untuk mengalirkan arus eksitasi dari eksiter utama ke rotor generator, menggunakan slip ring dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari pilot exciter ke main exciter.



Gambar 2.9 Sistem Eksitasi dengan Sikat (*Brush Excitation*)

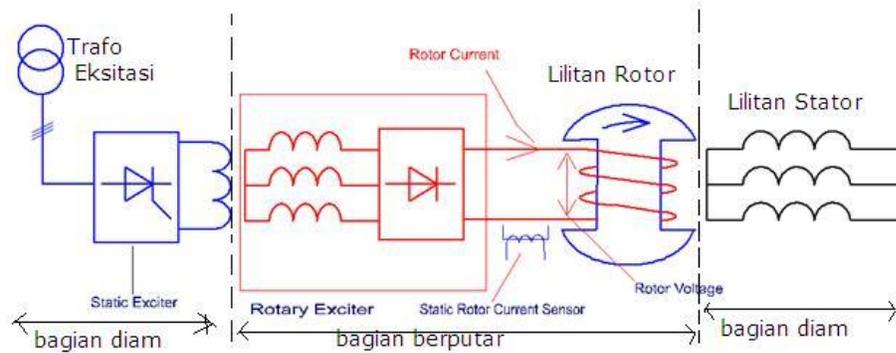
Sumber: Dijiteng Marsuadi, 2015

Generator penguat yang pertama, adalah generator arus searah hubungan paralel yang menghasilkan arus penguat bagi generator penguat kedua. Generator penguat (*exciter*) untuk generator sinkron merupakan generator utama yang diambil dayanya. Pengaturan tegangan pada generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus eksitasi dengan cara mengatur potensiometer. Potensiometer mengatur arus penguat generator pertama dan generator penguat kedua menghasilkan arus penguat generator utama. Dengan cara ini arus penguat yang diatur tidak terlalu besar nilainya (dibandingkan dengan arus generator penguat kedua) sehingga kerugian daya pada potensiometer tidak terlalu besar. PMT arus penguat generator utama dilengkapi tahanan yang menampung energi medan magnet generator utama karena jika dilakukan pemutusan arus penguat generator utama harus dibuang ke dalam tahanan.

2.1.10 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

Penggunaan sikat atau *slip ring* untuk menyalurkan arus eksitasi 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:

- Energi yang diperlukan untuk eksitasi diperoleh dari poros utama (*main shaft*), sehingga keandalannya tinggi.
- Biaya perawatan berkurang karena pada sistem eksitasi tanpa sikat tidak terdapat sikat, komutator dan *slip ring*.
- Pada sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada farnish akibat sikat arang.
- Mengurangi kerusakan akibat udara buruk sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup.
- Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.



Gambar 2.10 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

Sumber: Sumber: Dijiteng Marsuadi, 2015

Generator penguat pertama disebut *pilot exciter* dan generator penguat kedua disebut *main exciter* (penguat utama). *Main exciter* adalah generator AC 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 oleh *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.

2.1.11 Daya Listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam rangkaian listrik. Satuan SI daya listrik adalah watt yang menyatakan banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu.

Besar daya listrik dapat dilihat dalam persamaan berikut:

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad (2.11)$$

Dimana:

P = Daya Listrik (Watt)

V = Tegangan (Voltage)

I = Arus (Ampere)

$\cos \varphi$ = Faktor Daya

2.1.12 Faktor Daya, Daya Reaktif dan Daya Nyata

Daya aktif adalah daya yang ditimbulkan oleh aliran arus listrik melalui hambatan seperti lampu pijar atau alat pemanas. Daya ini digunakan untuk

melakukan kerja sesuai dengan kebutuhan tenaga listrik. Satuan dari daya aktif ialah Watt.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.12)$$

Dimana :

P = Daya Aktif (kW)

S = Daya Nyata (kVA)

Daya reaktif terdiri dari dua jenis daya reaktif-induktif dan daya reaktif-kapasitif. Daya reaktif-induktif adalah daya yang timbul aliran listrik melalui kumparan-kumparan kawat seperti pada motor listrik dan transformator. Sementara daya reaktif-kapasitif ditimbulkan oleh aliran arus listrik melalui sebuah kapasitor.

Satuan daya reaktif ini adalah volt-ampere-reaktif (VAR), dinyatakan dalam rumus sebagai berikut:

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \quad (2.13)$$

Dimana :

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (Voltage)

I = Arus (Ampere)

$\sin \varphi$ = Faktor Daya

Daya nyata adalah hasil perkalian antara arus dan tegangan listrik pada suatu beban. Hal ini dirumuskan sebagai berikut:

$$S = V \times I \quad (2.14)$$

Dimana :

S = Daya Nyata (Va)

V = Tegangan (Voltage)

I = Arus (Ampere)

Hal ini juga bisa dijelaskan dengan penjumlahan secara vektoris antara daya aktif dengan daya reaktif. Hubungan antara ketiga daya listrik tersebut secara matematis adalah:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.15)$$

2.1.13 Effisiensi Generator

Efisiensi generator adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Seperti halnya dengan mesin- mesin listrik lainnya, maupun transformator, maka efisiensi generator sinkron dapat dituliskan seperti Persamaan :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.16)$$

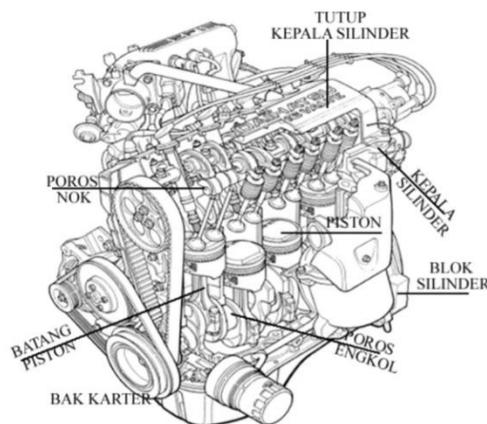
Dimana :

P_{out} = Daya keluaran

P_{in} = Daya masukan

2.2 Motor Bakar

Motor bakar merupakan salah satu jenis mesin penggerak yang banyak dipakai dengan memanfaatkan energi kalor dari proses pembakaran menjadi energi mekanik. Motor bakar merupakan salah satu jenis mesin kalor yang proses pembakarannya terjadi dalam motor bakar itu sendiri sehingga gas pembakaran yang terjadi sekaligus sebagai fluida kerjanya. Mesin yang bekerja dengan cara seperti tersebut disebut mesin pembakaran dalam. Adapun mesin kalor yang cara memperoleh energi dengan proses pembakaran di luar disebut mesin pembakaran luar. Sebagai contoh mesin uap, dimana energi kalor diperoleh dari pembakaran luar, kemudian dipindahkan ke fluida kerja melalui dinding pemisah.

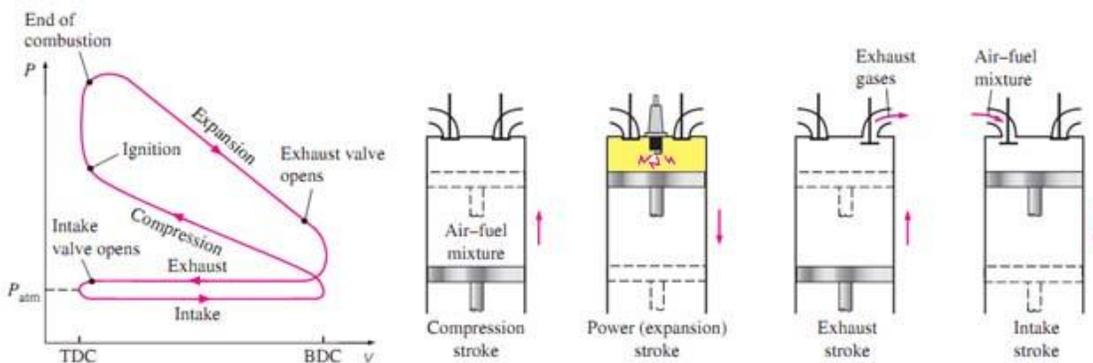


Gambar 2.11 Motor Bakar

Sumber: Aris Munandar, Wiranto 1983

2.2.1 Siklus Kerja Motor Bakar

Siklus Otto pada motor bakar disebut juga dengan siklus volume konstan, dimana pembakaran terjadi pada saat volume konstan. Pada mesin gas dengan siklus Otto dikenal dua jenis mesin, yaitu mesin 4 langkah (*four stroke*) dan 2 langkah (*two stroke*). Untuk mesin 4 langkah terdapat 4 kali gerakan piston atau 2 kali putaran poros engkol (*crank shaft*) untuk tiap siklus pembakaran, sedangkan untuk mesin 2 langkah terdapat 2 kali gerakan piston atau 1 kali putaran poros engkol untuk tiap siklus pembakaran. Sementara yang dimaksud langkah adalah gerakan piston dari TMA (Titik Mati Atas) atau TDC (*Top Death Center*) sampai TMB (Titik Mati Bawah) atau BDC (*Bottom Death Center*) maupun sebaliknya dari TMB ke TMA.



Gambar 2.12 Siklus Motor Bakar Pada Mesin 4 Langkah

Sumber: Pulkrabek Willard W, 2004

- Langkah hisap (*suction/Intake stroke*) Pada langkah ini bahan bakar yang telah bercampur dengan udara dihisap oleh mesin. Pada langkah ini katup hisap (*intake valve*) membuka sedang katup buang (*exhaust valve*) tertutup, sedangkan piston bergerak menuju TMB sehingga tekanan

dalam silinder lebih rendah dari tekanan atmosfer. Dengan demikian maka campuran udara dan bahan bakar akan terhisap ke dalam silinder.

- Langkah Kompresi (*compression stroke*) Pada langkah ini kedua katup baik *intake* maupun *exhaust* tertutup dan piston bergerak dari TMB ke TMA. Karena itulah maka campuran udara dan bahan bakar akan terkompresi, sehingga tekanan dan suhunya akan meningkat. Beberapa saat sebelum piston mencapai TMA terjadi proses penyalaan campuran udara dan bahan bakar yang telah terkompresi oleh busi (*spark plug*). Pada proses pembakaran ini terjadi perubahan energi dari energi kimia menjadi energi panas dan gerak.
- Langkah Ekspansi (*expansion stroke*) Karena terjadi perubahan energi dari energi kimia menjadi energi gerak dan panas menimbulkan langkah ekspansi yang menyebabkan piston bergerak dari TMA ke TMB. Gerakan piston ini akan mengakibatkan berputarnya poros engkol sehingga menghasilkan tenaga. Pada saat langkah ini kedua katup dalam kondisi tertutup
- Langkah Buang (*exhaust stroke*) Pada langkah ini piston bergerak dari TMB ke TMA, sedangkan katup buang terbuka dan katup isap tertutup, sehingga gas sisa pembakaran akan terdorong keluar melalui saluran buang (*exhaust manifold*) menuju udara luar.

Volume langkah atau volume nominal (V_L) atau *stroke volume* merupakan hasil perkalian antara luas penampang silinder (A) dengan panjang langkah (L). Besarnya volume langkah (V_L) adalah

$$V_L = A \times L \times n$$

$$V_L = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L \times n \quad (2.17)$$

Dimana :

V_L = volume langkah piston (mm^3) atau *cc*.

D = diameter silinder (*mm*).

L = panjang langkah piston (*mm*),

n = jumlah silinder.

Rasio kompresi (C_r) adalah perbandingan antara volume langkah piston ditambah dengan volume sisa (V_C) terhadap volume ruang sisa. Besarnya C_r adalah

$$C_r = \frac{V_L + V_C}{V_C} \quad (2.18)$$

Dimana :

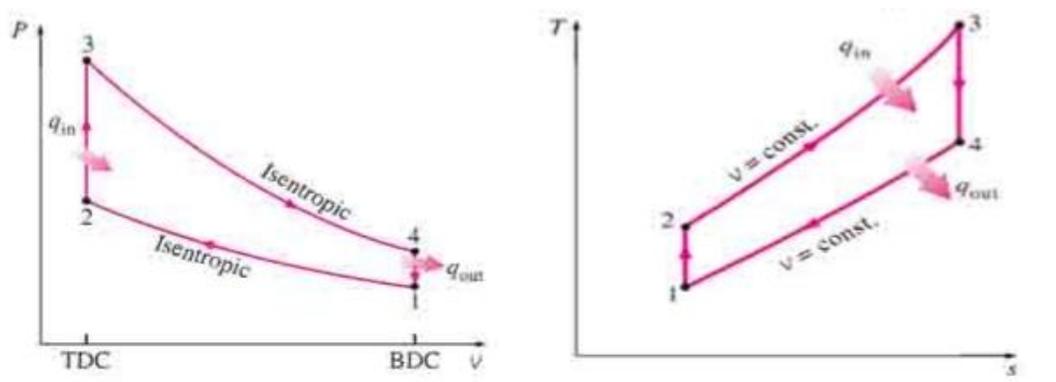
C_r = rasio kompresi.

V_L = volume langkah piston (mm^3) atau *cc*.

V_C = volume sisa (mm^3).

2.2.2 Siklus Ideal Otto (Siklus Volume Konstan)

Agar dapat lebih mudah memahami diagram p-v motor bakar torak, maka dilakukan terlebih dahulu idealisasi. Proses yang terjadi sebenarnya berbeda dengan proses ideal. Beberapa idealisasi pada siklus mencakup fluida kerja dalam silinder adalah udara, dianggap gas ideal dengan konstanta kalor yang konstan, proses kompresi dan ekspansi berlangsung secara isentropik, proses pembakaran dianggap sebagai proses pemanasan fluida kerja. Pada akhir proses ekspansi, yaitu pada saat piston mencapai titik mati bawah, fluida kerja didinginkan sehingga tekanan dan temperatur turun mencapai tekanan dan temperatur atmosfer.



Gambar 2.13 Diagram p-v dan T-s Siklus Otto

Sumber: Pulkrabek Willard W, 2004

Proses siklusnya sebagai berikut:

- Proses 0-1 (Langkah Hisap) menghisap udara pada tekanan konstan, katup masuk terbuka dan katup buang tertutup. Campuran bahan bakar udara mengalir ke dalam silinder melalui lubang katup masuk

$$P_0 = P_1 \quad (2.19)$$

- Proses 1-2 (Kompresi Langkah) semua katup tertutup. Campuran bahan bakar dan udara yang berada di dalam silinder tadi ditekan dan dimampatkan oleh piston yang bergerak ke titik mati atas (TMA). Akibatnya, tekanan dan suhu dalam silinder naik menjadi P_2 dan T_2

$$P_1 V_1 = m_m R T_1 \quad (2.20)$$

$$V_1 = V_d + V_c$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \longrightarrow T_2 = T_1 (r_c)^{k-1} \quad (2.21)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \longrightarrow P_2 = P_1 (r_c)^{k-1} \quad (2.22)$$

$$W_{1-2} = \frac{m_m R (T_2 - T_1)}{(1-k)} \quad (2.23)$$

$$r_c = (V_d + V_c)/V_c \quad (2.24)$$

Dimana :

P_1 = tekanan pada titik 1 (kPa)

P_2 = tekanan pada titik 2 (kPa)

T_1 = temperatur spesifik pada titik 1 (K)

T_2 = temperatur spesifik pada titik 2 (K)

V_1 = Volume pada titik 1 (m^3)

V_2 = Volume pada titik 2 (m^3)

W_{1-2} = Kerja pada siklus 1-2 (kJ)

m_m = Massa campuran gas di dalam silinder (*kg*)

r_c = Rasio kompresi

$k = C_p/C_v$ = Rasio kalor spesifik

- Proses 2-3 adalah proses pembakaran kalor pada volume konstan

$$Q_{2-3} = Q_{in} = m_f Q_{hv} \eta_c = m_m C_v (T_3 - T_2) \quad (2.25)$$

$$\frac{p_3}{p_2} = \left(\frac{T_3}{T_2}\right)$$

$$V_2 = V_3$$

$$T_3 = T_{maks} \text{ dan } p_3 = p_{maks} \quad (2.26)$$

Dimana :

C_v = Panas jenis gas pada volume konstan (*kJ/kg K*)

P_3 = Tekanan pada titik 3 (*kPa*)

Q_{hv} = Heating value (*kJ/kg*)

Q_{in} = Kalor yang masuk (*kJ*)

T_3 = Temperatur pada titik 3 (*K*)

η_c = Effisiensi pembakaran

- Proses 3-4 ekspansi isentropik

$$\frac{P_4}{P_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^k = \left(\frac{1}{r_c}\right)^k \quad (2.27)$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = \left(\frac{1}{r_c}\right)^{k-1}$$

Kerja ekspansi dari titik 3 ke titik 4 dari siklus otto juga merupakan proses isentropis, persamaannya ditunjukkan sebagai berikut:

$$W_{3-4} = \frac{mR(T_4 - T_3)}{(1-k)}$$

Dimana :

P_4 = Tekanan pada titik 4 (kPa)

T_3 = Temperatur pada titik 3 (K)

T_4 = Temperatur pada titik 4 (K)

W_{3-4} = Kerja (kJ)

V_3 = Volume pada titik 3 (m^3)

V_4 = Volume pada titik 4 (m^3)

- Proses 4-1 adalah proses pembuangan kalor pada volume konstan

$$Q_{4-1} = Q_{out} = m_m C_v (T_1 - T_4) \quad (2.28)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = r^{k-1}$$

$$W_{nett} = W_{1-2} + W_{3-4}$$

$$V_4 = V_1$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{nett}}{Q_{in}}$$

Dimana :

Q_{out} = Kalor yang dibuang (kJ)

T_4 = Temperatur pada titik 4 (K)

W_{nett} = Kerja netto (kJ)

η_{th} = Effisiensi thermal

2.2.3 Tekanan efektif rata-rata

Selama siklus berlangsung temperatur dan tekanannya selalu berubah. Oleh karena itu dapat dihitung nilai tekanan tertentu (konstan) ketika mendorong piston sepanjang langkahnya dapat menghasilkan kerja pada satu siklus yang sama dengan siklus yang dianalisis. Tekanan itu disebut tekanan efektif rata-rata (mep).

Persamaannya ditunjukkan sebagai berikut:

$$mep = \frac{W_{nett}}{V_d} \quad (2.29)$$

Dimana :

mep = Tekanan efektif rata-rata (kPa)

W_{nett} = Kerja netto dalam satu siklus (kJ)

V_d = Volume langkah piston (m^3)

2.2.4 Daya Indikator

Merupakan daya yang dihasilkan dalam silinder motor sehingga merupakan dasar perhitungan atau penentuan efisiensi pembakaran atau besarnya laju panas akibat pembakaran di dalam silinder, dengan persamaan sebagai berikut:

$$W_i = \frac{W_{nett} \times N}{n} \quad (2.30)$$

Dimana :

W_i = Daya indikasi (kW)

N = Putaran mesin (rpm)

n = Jumlah siklus ($putaran/siklus$)

2.2.5 Piston Speed

Piston speed merupakan kecepatan naik-turun piston di dalam silinder dari titik mati atas (TMA) ke titik mati bawah (TMB) dan sebaliknya. Piston speed ini sangat penting, sebab jika mesin berkitir melebihi limit piston speed, akan jadi masalah.

Piston bisa jebol karena kecepatan gerak melebihi kemampuan piston itu sendiri.

(Wahyu Hidayat, 2012) Dengan persamaan:

$$C = \frac{2 \times L \times F}{60} \quad (2.31)$$

Dimana:

C = Piston Speed (m/det)

L = Stroke / Langkah Piston (m)

F = Frekuensi Putaran Mesin (rpm)

2.2.6 Daya Poros

Daya yang dihasilkan suatu mesin pada poros keluarannya disebut sebagai daya poros (atau biasa dikenal dengan *brake horse power*). Yang dapat dihitung dengan rumus:

$$W_b = 2\pi \times N \times t \quad (2.32)$$

Dimana :

W_b = Daya poros (kW)

N = Putaran mesin (rpm)

t = Torsi (Nm)

Seperti yang telah diketahui, dari sejumlah gaya yang dihasilkan oleh mesin, maka sebagian darinya dipakai untuk mengatasi gesekan/friksi antara bagian-bagian mesin yang bergerak, sebagian lagi dipakai untuk menghisap udara dan bahan bakar serta mengeluarkannya dalam bentuk gas buang.

2.2.7 Konsumsi Bahan Bakar

Adalah bahan bakar yang dikonsumsi per satuan unit daya yang dihasilkan per satu jam operasi. Secara tidak langsung konsumsi bahan bakar spesifik merupakan indikasi efisiensi mesin dalam menghasilkan daya dari pembakaran bahan bakar, dengan persamaan:

$$sfc = \frac{m_f}{W_b} \quad (2.33)$$

$$\dot{m}_f = \frac{m_f \times N \times \text{Jumlah Silinder}}{n}$$

Dimana :

sfc = Konsumsi bahan bakar spesifik (gr/kwh)

\dot{m}_f = Laju aliran rata-rata bahan bakar ($kg/detik$)

m_f = Massa bahan bakar (kg)

2.2.8 Effisiensi Thermal

Effisiensi thermal adalah perbandingan antara energi yang keluar dengan energi yang masuk dari bahan bakar ke dalam ruang bakar atau silinder. Persamaannya disebutkan sebagai berikut:

$$\eta_{th} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2}\right) \quad (2.34)$$

Dimana :

η_{th} = Effisiensi thermal

2.2.9 Effisiensi Mekanis

Besarnya kerugian daya dapat dihitung dalam effisiensi mekanis yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta_m = \frac{W_b}{W_i} \quad (2.35)$$

Dimana :

η_m = Effisiensi mekanis

2.2.10 Effisiensi Volumetrik

Effisiensi ini didefenisikan sebagai perbandingan antara massa udara yang masuk karena dihisap piston pada langkah hisap dan massa udara pada tekanan dan

temperatur atmosfer yang dapat dihisap masuk kedalam volume satuan yang sama, dengan rumus:

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_a \times V_d} \quad (2.36)$$

Dimana :

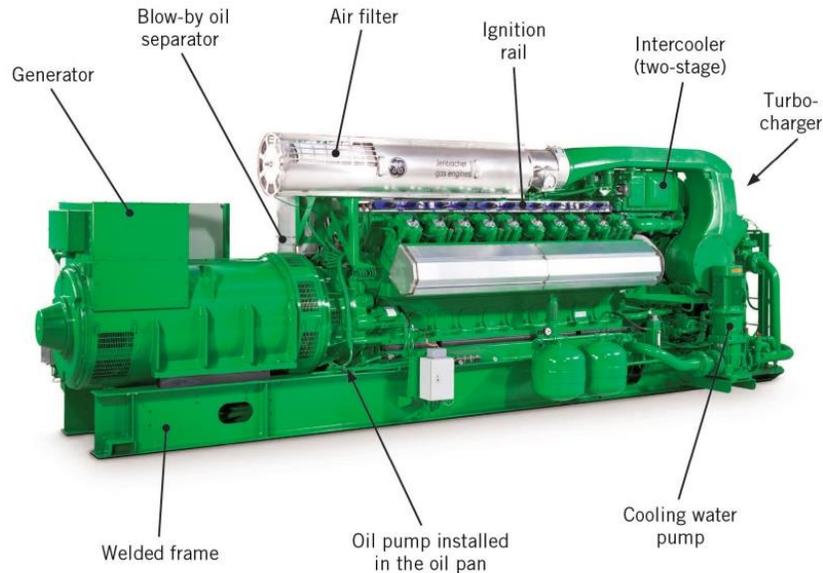
η_v = Effisiensi volumetrik

ρ_a = Massa jenis udara (kg/m^3)

m_a = Massa udara (kg)

2.2.11 Engine Gas Jenbacher

Mesin gas Jenbacher tersedia dalam kisaran output listrik 0,3-9,5MW untuk unit individu. Mesin gas Jenbacher diproduksi di kota Jenbach, Austria di Tyrol. Mesin gas Jenbacher dirancang untuk berjalan hanya pada berbagai jenis gas, dan untuk berbagai jenis aplikasi . Jenbacher telah memimpin inovasi mesin gas selama 50 tahun terakhir dengan perkembangan termasuk filosofi kontrol *LEANOX*, mesin gas 20 silinder pertama di dunia, mesin gas 24 silinder pertama di dunia, mesin gas twin-turbocharger pertama di dunia, konsep 4-seri efisiensi tinggi. Mesin telah dikembangkan menjadi varian yang cocok untuk berbagai aplikasi yang berbeda termasuk gas alam, biogas, gas lapisan batubara dan gas minyak bumi yang terkait.



Gambar 2.14 Engine Gas Jenbacher

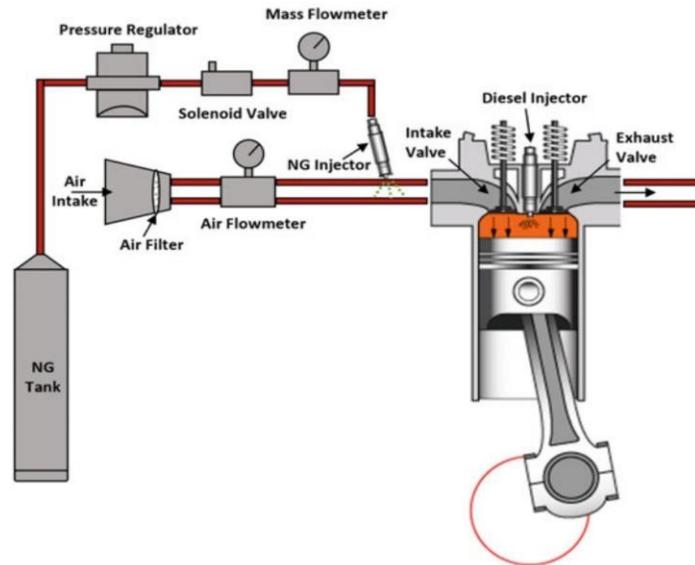
Sumber: Clarke Energy

Efisiensi terdepan di kelasnya hingga 47,8% dari *engine Jenbacher* menghasilkan penghematan bahan bakar yang luar biasa dan secara paralel dengan tingkat kinerja lingkungan tertinggi. Dalam kombinasi dengan sistem *LEANOX* mixer gas *Jenbacher* menyeimbangkan *fluktuasi* nilai kalor, yang terjadi terutama dalam aplikasi biogas. Terus menyempurnakan pengalaman mesin Jenbacher yang lebih luas, mesin Jenbacher tipe 6 adalah produk yang handal dan canggih yang mampu menghasilkan energi listrik dengan rentang daya 1,8 hingga 4,5 MW. Kecepatan mesin 1.500 rpm menghasilkan kepadatan daya yang tinggi dan biaya pemasangan yang rendah. *Pre-chamber combustion* tipe 6 mencapai efisiensi maksimum dengan emisi rendah. Desain yang terbukti dan komponen yang dioptimalkan memungkinkan masa pakai 60.000 jam operasi sebelum perbaikan besar pertama. Tingkat efisiensi listrik tertinggi, kehandalan tingkat tertinggi, sejarah perkembangan panjang, desain yang

kuat untuk berbagai gas, kepadatan output tinggi pada 1.500 rpm, kontrol pembakaran ramping *LEANOX* memastikan emisi gas buang yang minimal, *Pre-chamber combustion* memastikan efisiensi energi maksimum, *Turbocharger bypass* kondisi pengoperasian yang ekstrem, manifold knalpot kering eksternal memastikan masa pakai kepala silinder yang panjang, kontrol *knocking* selektif untuk setiap silinder memastikan perlindungan optimal.

2.2.12 Sistem Pembakaran Pada Engine Gas

Mesin dapat dibagi menjadi dua, berdasarkan sistem pembakarannya yaitu sistem pembakaran dalam (*Internal Combustion Engines*) dan sistem pembakaran luar (*External Combustion Engines*). Suatu sistem pembakaran memerlukan 3 hal agar dapat menghasilkan energi yang diperlukan oleh mesin, yaitu bahan bakar, media pembakarannya, dan tempat terjadi pembakarannya. Pada engine gas, bahan bakar yang dimaksud adalah gas dan udara. Media pembakarannya berupa busi (*Spark Plug*) untuk menghasilkan api dan sistem silinder sebagai alat kompresinya, sedangkan tempat terjadinya proses pembakaran ada didalam suatu ruang bakar (*Combustion Chamber*). Dikarenakan proses pembakarannya didalam *combustion chamber* (termasuk ruang tertutup) maka engine gas termasuk sistem pembakaran dalam.



Gambar 2.15 Sistem Bahan Bakar Engine Gas

Sumber: Kalyan Kumar Srinivasan, 2019

Keuntungan dari bahan bakar gas sebagai bahan bakar kendaraan adalah dapat digunakan pada mesin pengapian percikan dan pengapian kompresi. Mayoritas kendaraan berbahan bakar gas yang saat ini digunakan dipasang kembali atau diubah dari mesin pengapian bensin dengan menambahkan sistem penyimpanan, pasokan dan injeksi NG, sehingga mempertahankan kemampuan untuk dialihkan kembali ke bahan bakar bensin (Chen et al. 2018). Meskipun kandungan energi bahan bakar dalam hal massa, yang ditunjukkan dengan nilai kalor yang lebih rendah (LHV), gas alam lebih tinggi daripada bensin (49,5 MJ/kg untuk NG dibandingkan dengan 44,5 MJ/kg untuk bensin), mesin mengalami penurunan tenaga sebesar 10–15% (Chen et al. 2018). Hal ini disebabkan oleh beberapa alasan.

Nilai kalor volumetrik (VHV) campuran gas alam-udara, yang menentukan jumlah panas yang diubah menjadi kerja mekanis dalam silinder mesin, sekitar 12% lebih rendah dibandingkan campuran bensin-udara (Chen et al. 2018). Selain itu, kerapatan gas alam yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar cair

menghasilkan efisiensi volumetrik yang lebih rendah (10–15% lebih rendah) karena gas alam menggantikan volume udara yang lebih besar di dalam manifold masuk setelah injeksi. Hal ini membatasi jumlah udara yang dapat diinduksi ke dalam ruang pembakaran dan akibatnya lebih sedikit bahan bakar yang dibakar yang menyebabkan penurunan keluaran daya (Korakianitis et al. 2011; Evans dan Blaszczyk 1997).

Tabel 2.1 Konversi Satuan Gas ke Daya

	← multiply by →				
	kilowatt (kW) = kJ/s	kilocalories/sec (kcal/s)	toncal/day	horsepower (metric) (hp)	British thermal unit/hour (Btu/h)
kW		0.2388	20.64	1.360	3,412
kcal/s	4.187		86.40	5.692	14,286
toncal/day	0.0485	0.0116		0.0659	165.3
hp (metric)	0.7355	0.1757	15.18		2,510
Btu/h	2.931×10^{-4}	7.0×10^{-5}	0.006	3.985×10^{-4}	

Sumber: *International Gas Union, 2012*

Selain itu, metana memiliki kecepatan perambatan api yang lebih lambat dibandingkan dengan bensin di bawah suhu dan tekanan pengisian silinder yang khas yang memperpanjang waktu tunda penyalaan campuran bahan bakar-udara (Korakianitis et al. 2011; Thurnheer et al. 2009). Oleh karena itu, waktu percikan yang sangat maju digunakan pada mesin berbahan bakar NG yang dapat mencapai 10 CAD lebih awal sebelum titik mati atas (*Before Top Death Centre*) dibandingkan dengan pengoperasian bensin (Thurnheer et al. 2009). Ini semakin mengurangi total daya yang dihasilkan per siklus mesin karena muatan yang dinyalakan sebelumnya bekerja melawan piston selama langkah kompresi. Selain itu, mesin *spark ignition* gas alam memiliki efisiensi termal yang relatif lebih rendah dibandingkan mesin

bensin karena kecepatan pembakaran gas alam yang relatif lebih lambat sehingga mengurangi suhu pembakaran. Oleh karena itu, mesin bensin yang diubah untuk berjalan pada NG harus dimodifikasi untuk mengkompensasi kehilangan daya yang disebabkan oleh bahan bakar NG. Mesin berbahan bakar gas alam dapat bekerja pada rasio kompresi yang lebih tinggi, yang merupakan kombinasi. Pembakaran khas dan sifat fisik bahan bakar gas alam, bensin dan solar diuraikan dalam tabel berikut

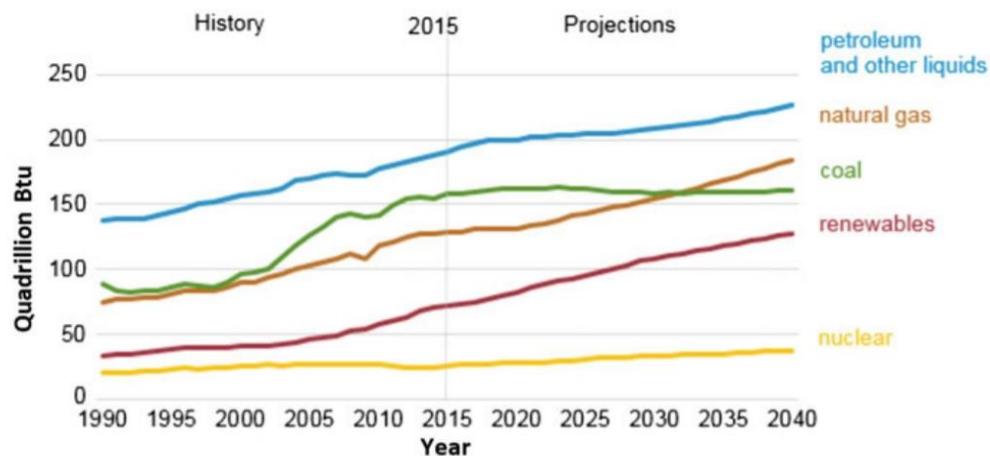
Tabel 2.2 Sifat Fisiokimia Bahan Bakar Gas Alam, Bensin dan Solar

Fuel Properties	Natural Gas	Bensin	Diesel
Low heating value (<i>Mj/kg</i>)	48.6	43.5	42.5
Heating value of stoichiometric mixture (<i>Mj/kg</i>)	2.67	2.78	2.79
Cetane number	-	13-17	52.1
Octane number	130	85-95	-
Auto-ignition temperature ($^{\circ}C$)	650	310	180-220
Adiabatic flame temperature ($^{\circ}C$)	1890	2150	2054
Stoichiometric air-fuel ratio (<i>kg/kg</i>)	17.2	14.56	14.3
Flame propagation speed (<i>m/s</i>)	0.41	0.5	-
Flammability limit in air (<i>vol % in air</i>)	5.3-15	1.4-7.6	1-6
Carbon content (%)	75	85.5	87
Hydrogen content (%)	25	12-15	16-33

Sumber: Kakaee and Paykani, 2013

2.2.13 Emisi Gas Buang Engine Gas

Dalam beberapa tahun terakhir, terdapat kekhawatiran yang semakin besar mengenai pencemaran lingkungan meskipun ada kemajuan teknologi, dengan sektor transportasi menjadi salah satu kontributor utama polutan yang dipancarkan dan gas rumah kaca. Emisi seperti karbon dioksida (CO₂), hidrokarbon tidak terbakar (HC), oksida nitrogen (NO_x), dan emisi materi partikulat (PM) semuanya dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil. Dampak buruknya terhadap perubahan iklim dan kesehatan manusia telah menyebabkan penerapan peraturan yang semakin ketat yang membatasi batas emisi mobil.



Gambar 2.16 Grafik Bahan Bakar
Sumber: Kalyan Kumar Srinivasan, 2019

Karenanya, industri kendaraan terus meneliti dan mengembangkan teknologi kontrol emisi yang tidak hanya memenuhi standar emisi ketat yang diperkenalkan di seluruh dunia seperti yang ditetapkan oleh Environmental Protection Agency (EPA), dan standar EURO 6, tetapi juga untuk memenuhi permintaan konsumen dengan mengirimkan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah tanpa mengorbankan tenaga

kendaraan atau kemampuan kendara. Meskipun kerusakan lingkungan dan efek pemanasan global yang disebabkan oleh pembakaran bahan bakar fosil, penggunaannya diproyeksikan mencapai 77% dari penggunaan energi pada tahun 2040. (Eia.gov)

Oleh karena itu, penggunaan bahan bakar gas dan alternatif dalam mesin pembakaran internal telah mengalami peningkatan minat dalam dekade terakhir karena emisi gas buangnya lebih rendah. Gas alam dapat memainkan peran utama dalam transisi dunia ke energi yang lebih bersih. Saat ini merupakan bahan bakar energi primer ketiga secara global dan satu-satunya bahan bakar fosil yang pangsa konsumsi energi primernya diproyeksikan tumbuh dengan konsumsi NG yang meningkat sebesar 1,4% per tahun (Eia.gov 2018; Sumber daya energi dunia 2016). Meningkatnya minat terhadap NG juga disebabkan oleh cadangan terbukti yang melimpah dan peningkatan produksi NG, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.2 sehingga menjadikannya pesaing kuat bahan bakar cair. Secara global, terdapat 186,6 ribu meter kubik (tcm) cadangan terbukti NG pada tahun 2016, meningkat 19,2% dari level tahun 2004 yang cukup untuk memenuhi

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Umum

Metode penelitian merupakan suatu cara yang harus dilakukan dalam kegiatan penelitian agar pengetahuan yang akan dicapai dari suatu penelitian dapat memenuhi nilai-nilai ilmiah. Dengan demikian penyusunan metode ini dimaksudkan agar peneliti dapat menghasilkan suatu kesimpulan yang dapat di pertanggung jawabkan secara ilmiah. Metode penelitian ini mencakup beberapa hal yang masing-masing tujuannya untuk menentukan keberhasilan pelaksanaan penelitian guna menjawab permasalahan disampaikan dalam penelitian. Langkah-langkah yang telah ditetapkan adalah penetapan tempat dan waktu penelitian, penetapan metode penelitian, dan membuat flowchart penelitian

3.2 Tempat dan Waktu

Penelitian dilaksanakan mulai dari tanggal 21 September 2020 sampai 1 Oktober 2020 dan bertempat di PT Musim Mas Martubung.

3.3 Metode Penelitian

Metode pengumpulan data untuk penelitian ini dilakukan dengan mengambil data langsung berupa logsheet, invoice gas (PGN) dan listrik (PLN) pada PT Musim Mas Martubung. Adapun data-data yang dibutuhkan dalam penelitian ini meliputi:

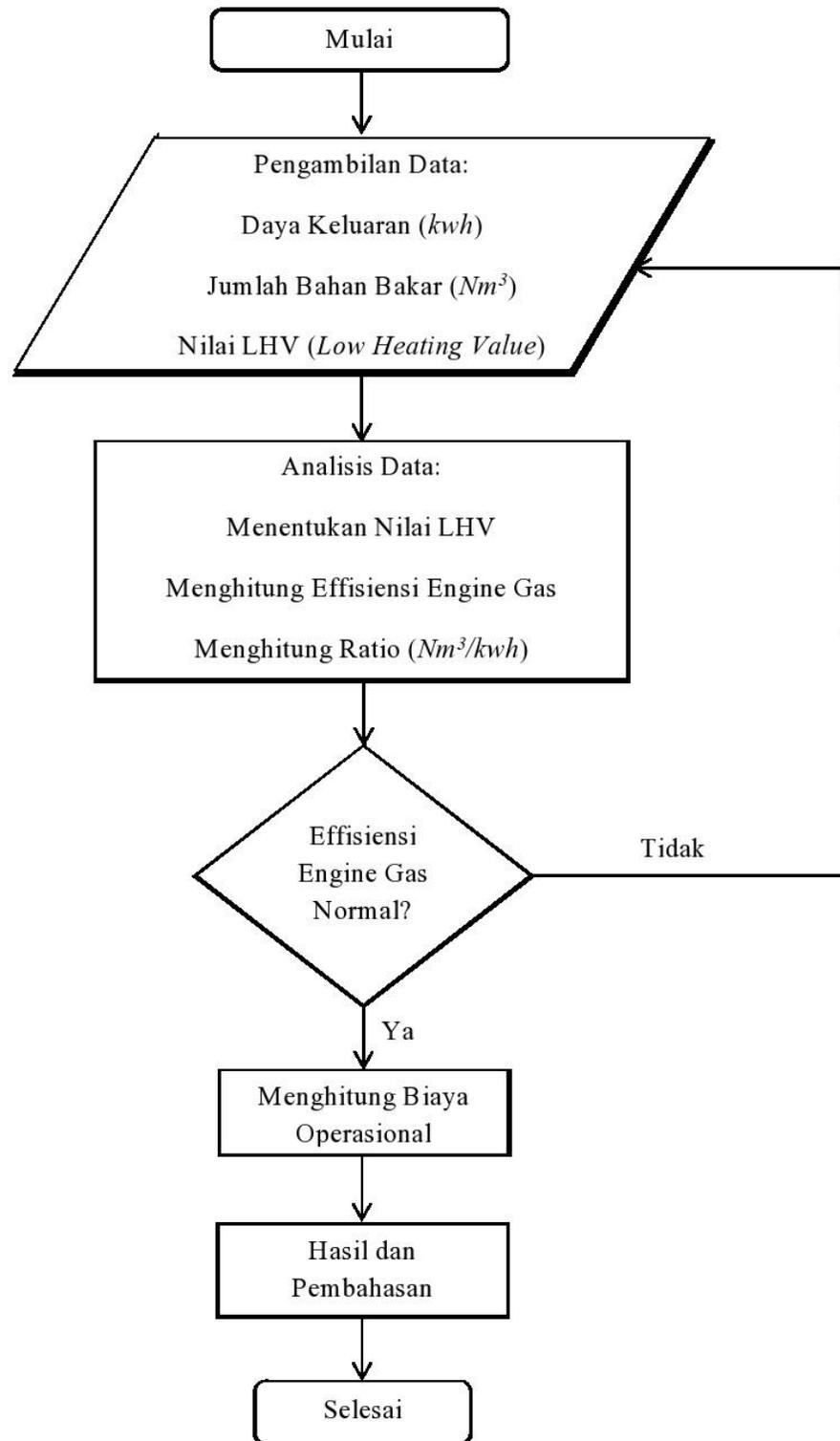
- Data operasional engine gas yaitu berupa daya keluaran (kWh), jumlah bahan bakar (Nm^3), dan nilai LHV atau *Low Heating Value*
- Data biaya tagihan gas dari PGN pemakaian bulan september untuk mengetahui harga jual gas
- Data biaya tagihan listrik dari PLN pemakaian bulan september sebagai perbandingan harga jual listrik
- Selanjutnya kita menganalisa data yang diperoleh untuk mendapatkan efisiensi kerja engine gas dan menghitung berapa biaya operasional dari menjalankan engine gas selama beroperasi
- Selanjutnya memperhatikan hasil analisis berupa besar efisiensi kerja Engine Gas Jenbacher apakah normal atau tidak. Jika tidak kita akan mengambil data kembali sampai dihasilkan besar efisiensi kerja yang normal.
- Selanjutnya jika besar efisiensi kerja Engine Gas normal maka dilanjutkan ke langkah hasil dan pembahasan, yaitu penarikan kesimpulan dari hasil penelitian Tugas Akhir.

3.4 Tahapan Perhitungan

Adapun tahapan perhitungan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Menentukan nilai LHV atau *Low Heating Value*
- Menghitung efisiensi generator engine gas
- Menghitung ratio pemakaian bahan bakar engine gas
- Menghitung biaya operasional (Rp/kWh) engine gas

3.5 Flowchart alur penelitian



Gambar 3.1 Flowchart Analisa Data

3.6 Spesifikasi Mesin

IMPORTED BY			
GE JENBACHER GmbH & Co OG Achensestrasse 1-3 6200 Jenbach Austria			
SYNCHRONOUS GENERATOR			
RATED OUTPUT	4500 kVA BR	TYPE	TD125 - F2G7
STANDARD	IEC - 60034	WEIGHT	17400 kg
NO. OF PHASES	3	ENCLOSURE SYSTEM	IP23
NO. OF POLES	4	COOLING SYSTEM	IC01
RATED VOLTAGE	6600 V	COOLANT TEMP.	40 °C
RATED CURRENT	393.6 A	MAX. T.RISE OF ST. BY RTD	110 °C
RATED FREQUENCY	50 Hz	CLASS OF INS.	ARM. F FLD. H
RATED SPEED	1500 min ⁻¹	BEARINGS.	DE SLEEVE NDE SLEEVE
LIMITING SPEED	1800 min ⁻¹	OIL	ISO VG 32
RATED P.F.	0.8	OIL FLOW (lpm)	DE 7 NDE 7
TYPE OF STATOR CONN.	STAR	OIL QTY (L)	DE 23 NDE 23
NOISE LEVEL	97 dB(A)	PHASE SEQ.	U V W
CONTINUOUS RATED CURRENT @ SPECIFIED MAX AMB TEMP OF 40°C			393.6 A
DIRECTION OF ROTATION VIEWING FROM DRIVEN END.			CLOCKWISE
SPACE HEATER	4 x 0.5 kW 240 V	OIL COOLER MOTOR	750 W 400 V 2.2 A
MACHINE IDENTIFICATION NUMBER WITH REVISION			11052415 R 0
EXCITER VOLTAGE	53 V	SHORT CIRCUIT CURRENT	1650 A
EXCITER CURRENT	7 A	INSTRUCTION BOOK NUMBER	16654
GE DESIGN MEMO NUMBER			TCG GEN_001
GE PART NUMBER WITH REVISION			1241026 R 0
GE PURCHASE ORDER NUMBER			GE#-1713054
YEAR OF MANUFACTURE			2017
MACHINE SERIAL NUMBER			T-04359
MANUFACTURED BY TD POWER SYSTEMS Ltd., INDIA # 59/2 YEDEHALLI VILLAGE, SOMPURA HOBLI, DABASPET, NELAMANGALA TALUK, BANGALORE - 562111, TEL. 0091-080-22635500, WEBSITE : www.tdps.co.in			

Gambar 3.2 Nameplate Engine Gas

Sumber: Pribadi



Technical features

Feature	Description	Advantages
Four-valve cylinder head	Centrally located purged pre-combustion chamber, developed using advanced calculation and simulation methods (CFD)	Reduced charge-exchange losses, highly efficient and stable combustion, optimal ignition conditions
Heat recovery	Flexible arrangement of heat exchanger, two stage oil plate heat exchanger on demand	High thermal efficiency, even at high and fluctuating return temperatures
Air / fuel mixture charging	Fuel gas and combustion air are mixed at low pressure before entering the turbocharger	Main gas supply with low gas pressure, mixture homogenized in the turbocharger
Pre-combustion chamber	The ignition energy of the spark plug is amplified in the pre-combustion chamber	High efficiency, lowest NOx emission values, stable and reliable combustion
Gas dosing valve	Electronically controlled gas dosing valve with high degree of control accuracy (for natural gas)	Very quick response time, rapid adjustment of air / gas ratio, large adjustable calorific value range
2-stage turbocharging	Next generation turbocharging technology concept (for J624 only)	Improved performance in terms of output and efficiency, increased flexibility regarding ambient conditions

Technical data

Configuration	V 60*		
Bore (mm)	190		
Stroke (mm)	220		
Displacement / cylinder (lit)	6.24		
Speed (rpm)	1,500 (50 Hz) 1,500 with gearbox (60 Hz)		
Mean piston speed (m/s)	11 (1,500 1/min)		
Scope of supply	Generator set, cogeneration system, containerized package		
Applicable gas types	Natural gas, flare gas, biogas, landfill gas, sewage gas. Special gases (e.g., coal mine gas, coke gas, wood gas, pyrolysis gas)		
Engine type	J612	J616	J620 J624*
No. of cylinders	12	16	20 24
Total displacement (lit)	74.9	99.8	124.8 149.7
Dimensions l x w x h (mm)			
Containerized package	J612-J620	12,000/15,000 x 3,000/6,000 x 8,100	
	J624	17,000 x 6,000 x 8,400	
Generator set	J612	7,600 x 2,200 x 2,800	
	J616	8,300 x 2,200 x 2,800	
	J620	8,900 x 2,200 x 2,800	
	J624*	12,800 x 2,500 x 2,900	
Cogeneration system	J612	7,600 x 2,200 x 2,800	
	J616	8,300 x 2,200 x 2,800	
	J620	8,900 x 2,200 x 2,800	
	J624*	12,800 x 2,500 x 2,900	
Weights empty (kg)	J612	J616	J620 J624*
Generator set	24,000	29,200	36,900 52,100
Cogeneration system	24,500	29,700	37,500 52,100

1) Dimensions and weights are valid for 50 Hz applications
*J624 with 2-stage turbocharging

Outputs and efficiencies

Natural gas		1,500 rpm 50 Hz					1,500 rpm 60 Hz				
NOx <	Type	Pel (kW) ¹	ηel (%) ¹	Pth (kW) ²	ηth (%) ²	ηtot (%)	Pel (kW) ¹	ηel (%) ¹	Pth (kW) ²	ηth (%) ²	ηtot (%)
500 mg/m ³ _N	J612	2,004	45.2	1,917	43.2	88.4	1,979	44.6	1,928	43.5	88.1
	J616	2,679	45.7	2,508	42.8	88.5	2,654	45.3	2,522	43.0	88.3
	J620	3,360	45.8	3,151	42.9	88.7	3,328	45.3	3,165	43.1	88.5
	J624*	4,404	46.6	3,871	41.0	87.6	4,373	46.3	3,889	41.2	87.5
250 mg/m ³ _N	J612	2,004	44.4	1,924	42.6	87.0	1,979	43.8	1,935	42.9	86.7
	J616	2,679	44.9	2,530	42.4	87.3	2,654	44.5	2,544	42.6	87.1
	J620	3,360	45.0	3,170	42.4	87.4	3,328	44.5	3,184	42.6	87.1
	J624*	4,404	45.7	3,906	40.6	86.3	4,373	45.4	3,924	40.7	86.1
Biogas		1,500 1/min 50 Hz					1,500 1/min 60 Hz				
NOx <	Type	Pel (kW) ¹	ηel (%) ¹	Pth (kW) ²	ηth (%) ²	ηtot (%)	Pel (kW) ¹	ηel (%) ¹	Pth (kW) ²	ηth (%) ²	ηtot (%)
500 mg/m ³ _N	J612	1,820	44.0	1,668	40.3	84.2	1,795	43.3	1,678	40.5	83.8
	J616	2,435	44.1	2,225	40.3	84.4	2,405	43.5	2,238	40.5	84.1
	J620	3,054	44.2	2,782	40.3	84.5	3,020	43.7	2,797	40.5	84.3
250 mg/m ³ _N	J612	1,820	43.0	1,717	40.6	83.6	1,795	42.4	1,727	40.8	83.3
	J616	2,435	43.2	2,292	40.6	83.8	2,405	42.7	2,305	40.9	83.5
	J620	3,054	43.3	2,863	40.6	83.9	3,020	42.8	2,878	40.8	83.7

*J624 with 2-stage turbocharging



1) Technical data according to ISO 3046
2) Total heat output with a tolerance of +/- 8 %, exhaust gas outlet temperature 120°C, for biogas exhaust gas outlet temperature 180°C
All data according to full load and subject to technical development and modification.
Further engines versions available on request.

Find your local support online:
www.gepower.com/distributedpower

GE Power's Distributed Power business is a unit of the General Electric Company. The GE brand and logo are trademarks of the General Electric Company. © 2017 General Electric Company. Information provided is subject to change without notice. All values are design or typical values when measured under laboratory conditions.
GEA-32392EN

Gambar 3.3 Technical Data
Sumber: GE

BAB IV

HASIL PENELITIAN

4.1 Perhitungan Nilai *LHV*

Pipeline gas biasanya dijual dalam basis nilai *Heating Value*, misalnya (MMBtu/cuft) heating value didefinisikan sebagai energi termal per satuan volume gas (Btu/cuft). Gas alam biasanya mengandung *Heating Value* (900-1200 Btu/ft³). *Heating Value* biasanya dihitung pada suhu 60°F dan tekanan 1 atm (15,6 °C / 14,73 psia), keadaan standart di industri gas dan pada kesetimbangan, sebagian berfasa cair dan sebagian lagi berfasa uap.

Data dari PT PGN Solution untuk kandungan natural gas yang diperoleh sebagai berikut:

Tabel 4.1 Data Kandungan Natural Gas PGN

Specific Gravity Gas	0,6402
Net Calorific Value / LHV	1020,1558 Btu/ft ³
Gross Calorific Value / HHV	1128,5419 Btu/ft ³
Gas Compressibility (Factor Z)	0,9973
Wobber Index	1410,4

Sumber: PT PGN Solution

Untuk mendapatkan nilai LHV maka harus mengkonversi satuan dari Btu/ft³ menjadi Kwh/Nm³ yaitu:

$$\text{Low Heating Value} = 1020,1558 \text{ Btu/ft}^3 \times 0,000293 \text{ kWh} = 0,2989056494 \text{ kWh/ft}^3$$

$$\text{Low Heating Value} = 0,2989056494 \text{ kWh/ft}^3 \times 35,31466671875 \text{ Nm}^3 = 10,5 \text{ kWh/Nm}^3$$

4.2 Revolusi Per Menit (rpm)

Adalah unit untuk frekuensi. Umumnya, rpm digunakan untuk menyatakan kecepatan revolusi (perputaran)

$$n = \frac{120 \times f}{p}$$

$$n = \frac{120 \times 50}{4}$$

$$n = 1500 \text{ rpm}$$

4.3 Volume Cylinder

Volume cylinder adalah besarnya volume langkah ditambah volume ruang bakar dengan persamaan:

$$= \frac{\pi}{4} \times \text{Bore}^2 \times \text{Stroke}$$

$$= \frac{\pi}{4} \times (190)^2 \times 220$$

$$= 6,24 \text{ Liter}$$

$$= 624.000 \text{ cc}$$

4.4 Piston Speed

$$C = \frac{2 \times L \times F}{60}$$

$$C = \frac{2 \times 0,22 \times 1500}{60}$$

$$C = 11 \text{ m/s (1500 1/min)}$$

4.5 Data Operasional Engine Gas

Tabel 4.2 Data operasional

Tanggal	Daya Keluaran (Kwh)	Jumlah Bahan Bakar (Nm ³)	Nilai LHV (Low Heating Value)
21 September 2020	28900	6558,72	10,5
22 September 2020	46200	10310,46	10,5
23 September 2020	44900	10210,42	10,5
24 September 2020	48200	10829,69	10,5
25 September 2020	46400	10438,35	10,5
26 September 2020	47100	10777,65	10,5
27 September 2020	46300	10596,08	10,5
28 September 2020	47900	11043,52	10,5
29 September 2020	49100	11071,36	10,5
30 September 2020	48000	10911,27	10,5

1 Oktober 2020	32600	7559,98	10,5
-----------------------	-------	---------	------

Sumber: Logsheet PT Musim Mas Martubung

Pengambilan data dilakukan pada hari senin 21 September 2020 sampai kamis 1 Oktober 2020, untuk tanggal 21 September 2020 dan 1 Oktober 2020 beroperasi hanya 16 jam. Data didapat dari penyuplai gas (PGN) periode 21 sep s/d 1 Okt bahwa jenis bahan bakar natural gas yang digunakan dengan nilai LHV 11,3

4.6 Analisa Data

Berikut ini perhitungan efisiensi engine gas dari tanggal 21 September 2020 sampai 1 Oktober 2020

21 September 2020

$$\begin{aligned} \text{Beban generator } (P_{out}) &= 28,9 \text{ Mwh} \\ &= 28900 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah bahan bakar} &= 409,92 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 16 \text{ Jam} \\ &= 6558,72 \text{ Nm}^3 \end{aligned}$$

Efisiensi (η) generator engine gas adalah:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{\text{Daya keluaran (Kwh)}}{\text{Jumlah bahan bakar Nm}^3 \times \text{LHV}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{28900 \text{ Kwh}}{6558,72 \text{ Nm}^3 \times 10,5} \times 100\%$$

$$\eta = 42,1\%$$

Heat Rate engine gas adalah:

$$\text{HR} = \frac{\text{Jumlah bahan bakar Nm}^3 \times \text{LHV}}{\text{Daya keluaran (Kwh)}}$$

$$\text{HR} = \frac{6558,72 \times 10,5}{28900}$$

$$\text{HR} = 2,38 \text{ Btu/kWh}$$

Ratio bahan bakar engine gas adalah:

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kwh}}$$

$$\text{Ratio} = \frac{6558,72}{28900}$$

$$\text{Ratio} = 0,22$$

22 September 2020

$$\begin{aligned} \text{Beban generator (P}_{out}\text{)} &= 46,2 \text{ Mwh} \\ &= 46200 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Jumlah bahan bakar} &= 429,60 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 24 \text{ Jam} \\ &= 10310,46 \text{ Nm}^3\end{aligned}$$

Efisiensi (η) generator engine gas adalah:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{\text{Daya keluaran (Kwh)}}{\text{Jumlah bahan bakar Nm}^3 \times \text{LHV}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{46200 \text{ Kwh}}{10310,46 \text{ Nm}^3 \times 10,5} \times 100\%$$

$$\eta = 42,67\%$$

Heat Rate engine gas adalah:

$$\text{HR} = \frac{\text{Jumlah bahan bakar Nm}^3 \times \text{LHV}}{\text{Daya keluaran (Kwh)}}$$

$$\text{HR} = \frac{10310,46 \times 10,5}{46200}$$

$$\text{HR} = 2,34 \text{ Btu/kWh}$$

Ratio bahan bakar engine gas adalah:

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kwh}}$$

$$\text{Ratio} = \frac{10310,46}{46200}$$

$$\text{Ratio} = 0,22$$

23 September 2020

$$\begin{aligned} \text{Beban generator } (P_{out}) &= 44,9 \text{ Mwh} \\ &= 44900 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah bahan bakar} &= 425,43 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 24 \text{ Jam} \\ &= 10210,42 \text{ Nm}^3 \end{aligned}$$

Efisiensi (η) generator engine gas adalah:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{\text{Daya keluaran (Kwh)}}{\text{Jumlah bahan bakar Nm}^3 \times \text{LHV}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{44900 \text{ Kwh}}{10210,42 \text{ Nm}^3 \times 10,5} \times 100\%$$

$$\eta = 41,88\%$$

Heat Rate engine gas adalah:

$$\text{HR} = \frac{\text{Jumlah bahan bakar Nm}^3 \times \text{LHV}}{\text{Daya keluaran (Kwh)}}$$

$$\text{HR} = \frac{10210,42 \times 10,5}{44900}$$

$$\text{HR} = 2,38 \text{ Btu/kWh}$$

Ratio bahan bakar engine gas adalah:

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kwh}}$$

$$\text{Ratio} = \frac{10310,46}{46200}$$

$$\text{Ratio} = 0,22$$

24 September 2020

$$\begin{aligned} \text{Beban generator } (P_{out}) &= 48,2 \text{ Mwh} \\ &= 48200 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah bahan bakar} &= 451,23 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 24 \text{ Jam} \\ &= 10829,69 \text{ Nm}^3 \end{aligned}$$

Efisiensi (η) generator engine gas adalah:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{\text{Daya keluaran (Kwh)}}{\text{Jumlah bahan bakar Nm}^3 \times \text{LHV}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{48200 \text{ Kwh}}{10829,69 \text{ Nm}^3 \times 10,5} \times 100\%$$

$$\eta = 42,38 \%$$

Heat Rate engine gas adalah:

$$HR = \frac{\text{Jumlah bahan bakar } Nm^3 \times LHV}{\text{Daya keluaran (Kwh)}}$$

$$HR = \frac{10829,69 \times 10,5}{48200}$$

$$HR = 2,35 \text{ Btu/kWh}$$

Ratio bahan bakar engine gas adalah:

$$\text{Ratio} = \frac{Nm^3}{Kwh}$$

$$\text{Ratio} = \frac{10829,69}{48200}$$

$$\text{Ratio} = 0,22$$

25 September 2020

$$\begin{aligned} \text{Beban generator } (P_{out}) &= 46,4 \text{ Mwh} \\ &= 46400 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah bahan bakar} &= 434,93 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 24 \text{ Jam} \\ &= 10438,35 \text{ Nm}^3 \end{aligned}$$

Efisiensi (η) generator engine gas adalah:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{\text{Daya keluaran (Kwh)}}{\text{Jumlah bahan bakar Nm}^3 \times \text{LHV}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{46400 \text{ Kwh}}{10438,35 \text{ Nm}^3 \times 10,5} \times 100\%$$

$$\eta = 42,33\%$$

Heat Rate engine gas adalah:

$$\text{HR} = \frac{\text{Jumlah bahan bakar Nm}^3 \times \text{LHV}}{\text{Daya keluaran (Kwh)}}$$

$$\text{HR} = \frac{10438,35 \times 10,5}{46400}$$

$$\text{HR} = 2,36 \text{ Btu/kWh}$$

Ratio bahan bakar engine gas adalah:

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kwh}}$$

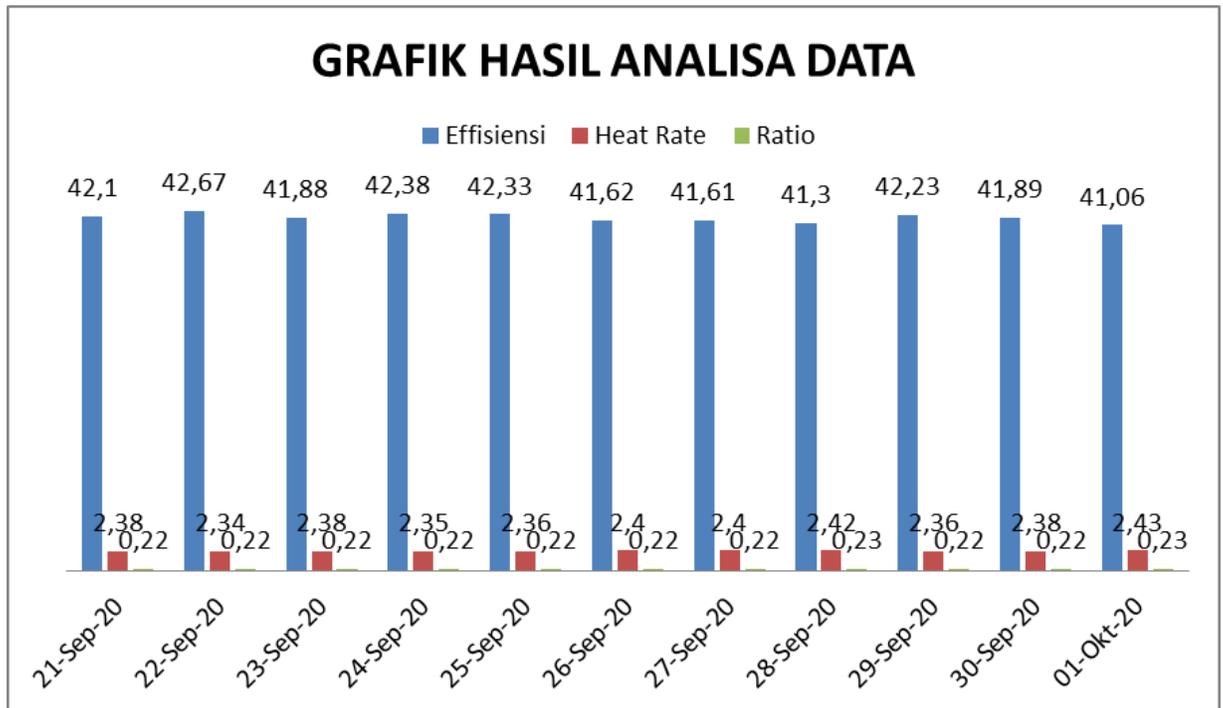
$$\text{Ratio} = \frac{10438,35}{46400}$$

$$\text{Ratio} = 0,22$$

Dengan perhitungan yang sama maka akan diperoleh nilai efisiensi dan ratio pada tanggal yang lain seperti terlihat di tabel 4.3 Hasil Analisa Data, dari hasil analisa menunjukkan kemampuan efisiensi gas engine dipengaruhi oleh beban yang dipikul oleh gas engine tersebut. Semakin besar beban yang dipikul oleh gas engine maka akan semakin tinggi nilai effisiensinya seperti pada tanggal 22 September dan 24 September, menggunakan teknologi *Leannox* membuat engine gas jembacher menjadi tangguh beroperasi pada beban tinggi.

Tabel 4.3 Hasil Analisa Data

Tanggal	Efisiensi (η) %	Heat Rate (Btu/kWh)	Ratio
21 September 2020	42,10	2,38	0,22
22 September 2020	42,67	2,34	0,22
23 September 2020	41,88	2,38	0,22
24 September 2020	42,38	2,35	0,22
25 September 2020	42,33	2,36	0,22
26 September 2020	41,62	2,40	0,22
27 September 2020	41,61	2,40	0,22
28 September 2020	41,30	2,42	0,23
29 September 2020	42,23	2,36	0,22
30 September 2020	41,89	2,38	0,22
1 Oktober 2020	41,06	2,43	0,23



Gambar 4.1 Grafik Hasil Analisa Data

Untuk mendapatkan biaya operasional engine gas dari tanggal 21 September hingga 1 Oktober perlu dikonversi satuan menjadi *BTU/Kwh*, konversi Kwh ke BTU sama dengan 3412,14 maka perhitungannya sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{\text{Daya keluaran (Kwh)}}{\text{Jumlah bahan bakar Nm}^3 \times \text{LHV}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{485600 \text{ Kwh}}{110307,5 \text{ Nm}^3 \times 11,3} \times 100\%$$

$$\eta = 38,95\% \rightarrow = \frac{3412,14 \text{ BTU}}{38,95\%} \rightarrow = 8760 \text{ BTU/Kwh}$$

Lalu setelah didapat nilai *BTU/Kwh* perhitungan untuk Rupiah/Kwh dapat dilakukan dengan membagi dari satuan gas yang dikeluarkan PGN (*mmBTU*), perhitungannya adalah:

$$1 \text{ mmBTU} = 1.000.000 \text{ BTU} \rightarrow = \frac{1000000 \text{ BTU}}{8760 \text{ BTU/Kwh}} = 114,15 \text{ Kwh}$$

Harga jual gas dari PGN sesuai dari invoice yang dikeluarkan senilai 6,82 USD/mmBTU lalu dikonversi kan dari nilai USD terhadap Rp saat ini (14.147), adalah:

$$\text{USD } 6,82 \times \text{Rp } 14.147 = \text{Rp } 96.482,54$$

Maka didapatkan Rupiah/Kwh;

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Rp } 96.482,54}{114,15 \text{ Kwh}} \\ &= \text{Rp } 845,225/\text{Kwh} \end{aligned}$$

Untuk biaya engine gas selama 11 hari beroperasi dari tanggal 21 September 2020 s/d 1 Oktober 2020 adalah:

$$\begin{aligned} &= \text{Rp } 845,225/\text{Kwh} \times 485600 \text{ Kwh} \\ &= \text{Rp } 410.438.832 \end{aligned}$$

4.7 Perbandingan Tagihan/Biaya Listrik Dari PLN

Jika dibandingkan dengan pemakaian PLN dalam periode waktu yang sama, maka akan didapatkan perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4.4 Data Pemakaian PLN

Tanggal	BP	LBP	kVarh
5 Oktober 2020	596,82	2834,95	1498,22
6 Oktober 2020	597,39	2837,56	1499,45
7 Oktober 2020	597,91	2840,02	1500,60
8 Oktober 2020	598,41	2842,35	1501,80
9 Oktober 2020	599,00	2844,98	1503,27
10 Oktober 2020	600,35	2850,77	1506,44
11 Oktober 2020	601,85	2857,93	1510,38
12 Oktober 2020	603,25	2864,68	1514,06
13 Oktober 2020	604,63	2871,54	1517,82
14 Oktober 2020	604,68	2872,80	1518,35
15 Oktober 2020	604,86	2873,58	1518,64

Sumber: Invoice PLN PT Musim Mas Martubung

Pemakaian beban listrik per tanggal 5 Oktober 2020 s/d 15 Oktober dengan periode hari yang sama dengan engine gas, untuk *BP* (*Beban Puncak*) dan *LBP*

(*Lewat Bebam Puncak*) dikali faktor kali ($FKM \times FRT$) sebesar 6000 x 1 terhitung sebesar:

$$BP = \text{Stand Akhir} - \text{Stand Awal}$$

$$BP = 604,86 - 596,82$$

$$BP = 8,04 \times FKM \times FRT$$

$$BP = 8,04 \times 6000 \times 1$$

$$BP = 48240 \text{ kWh}$$

$$LBP = \text{Stand Akhir} - \text{Stand Awal}$$

$$LBP = 2873,58 - 2834,05$$

$$LBP = 39,53 \times FKM \times FRT$$

$$LBP = 39,53 \times 6000 \times 1$$

$$LBP = 237180 \text{ kWh}$$

Untuk Tarif I3 dengan daya 5190 VA pemakaian energi listrik pada beban puncak (BP) nilainya sebesar Rp. 1553,67 dan pemakaian energi listrik pada lewat beban puncak (LBP) nilainya sebesar Rp. 1035,78. Maka jika dikalikan pemakaian energi listrik per tanggal 5 Oktober 2020 s/d 15 Oktober 2020 adalah:

Biaya Tarif Pada Beban Puncak (18:00 WIB – 06:00 WIB)

$$Rp = BP \times 1553,67$$

$$Rp = 48240 \times 1553,67$$

$$Rp = 74.949.040,8$$

Biaya Tarif Pada Lewat Beban Puncak (06:00 WIB – 18:00 WIB)

$$Rp = LBP \times 1035,78$$

$$Rp = 237180 \times 1035,78$$

$$Rp = 245.666.300,4$$

Maka didapatkan hasil biaya tarif dasar listrik per tanggal 5 Oktober 2020 s/d 15 Oktober 2020 sebesar:

$$BP = 74.949.040,8$$

$$LBP = 245.666,300,4$$

$$PTL = 3\% \text{ dari total } BP + LBP$$

$$\text{Jumlah Tagihan} = Rp. 330.233.801,436$$

4.8 Tegangan Drop

Dalam pendistribusian energi listrik ada banyak peralatan yang dibutuhkan agar energi listrik dapat dialirkan dan digunakan untuk peralatan listrik lainnya. PT Musim Mas Martubung menggunakan tegangan jaringan di 6,6 kV untuk jalur energi listrik dari pembangkit sendiri, sementara untuk aliran PLN tetap menggunakan tegangan jaringan 20kV. Masing-masing aliran nantinya akan diturunkan tegangannya oleh trafo menjadi 400V dan 220 V, tentu ada perbedaan drop tegangan pada kedua jaringan tersebut. Untuk mengetahui perbedaan tegangan drop tersebut maka dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Voltage Drop} = \sqrt{3} \times I \times l (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

Di dapatkan data berupa:

Tabel 4.5 Data Teknis Distribusi

	Arus (A)	Resistansi (Ω m)	Reaktansi (Ω m)	Cos φ	Sin φ	Panjang Kabel (l)
Engine Gas	188	0,102	0,091	0,89	0,49	4,62
PLN	75	0,206	0,104	0,91	0,53	7,75

Voltage Drop Engine Gas

$$\text{Voltage Drop} = \sqrt{3} \times I \times l (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

$$\text{Voltage Drop} = 1,73 \times 188 \times 4,62 ((0,102 \times 0,89) + (0,091 \times 0,49))$$

$$\text{Voltage Drop} = 1502,60 \times 0,13537$$

$$\text{Voltage Drop} = 203,40 \text{ v}$$

$$\text{Voltage Drop} = 0,2034 \text{ kV}$$

Voltage Drop PLN

$$\text{Voltage Drop} = \sqrt{3} \times I \times l (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

$$\text{Voltage Drop} = 1,73 \times 75 \times 7,75 ((0,206 \times 0,91) + (0,104 \times 0,53))$$

$$\text{Voltage Drop} = 1005,56 \times 0,24258$$

$$\text{Voltage Drop} = 243,92 \text{ v}$$

$$\text{Voltage Drop} = 0,24392 \text{ kV}$$

4.9 Kerugian Jika PLN TRIP

Secara ekonomi menggunakan PLN sangat unggul jika dibandingkan dengan menggunakan engine gas. Tapi jika kondisi daya listrik dari PLN tidak stabil (ada gangguan) maka akan menimbulkan kerugian pada pabrik jika dalam masa produksi sebuah produk yang tidak boleh terganggu selama operasional berlangsung. Karena produk yang diolah akan outspec dari standar yang sudah ditetapkan, dan produk (minyak) yang sudah outspec (ngeblok) tidak dapat digunakan kembali.

Dari perhitungan dibawah dapat dilihat berapa kerugian yang diterima jika ada gangguan daya listrik dari PLN;

$$\text{Plant Produksi dalam sehari} = 120 \text{ ton minyak (stearin)}$$

$$\text{Produksi dalam 1 kali proses} = 40 \text{ ton minyak (stearin)}$$

$$\text{Harga per liter} = \text{Rp. } 10.243,10 \text{ (harga tergantung pasar)}$$

$$\text{Gangguan Pemadaman Listrik} = 1 \text{ hingga } 2 \text{ jam}$$

$$40.000 \text{ Liter} \times \text{Rp. } 10.243,10$$

$$\text{Rp. } 409.724.000$$

Maka ditambahkan dengan tarif dasar listrik per tanggal 5 Oktober 2020 s/d 15 Oktober 2020 sebesar:

Rp. 330.233.801,436 + Rp. 409.724.000

Rp. 739.957.801,436

Rp. 739.957.801,436 perkiraan total biaya yang di hitung jika terjadinya gangguan listrik dari PLN. Itulah kenapa energi listrik engine gas lebih handal dibanding daya listrik dari PLN karena minimnya gangguan serta kehandalan akan produksi produk yang tidak dapat diganggu demi kelancaran bisnis perusahaan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah menyelesaikan analisis perhitungan efisiensi dan biaya operasional engine gas Jenbacher di PT Musim Mas Martubung, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai efisiensi berpengaruh terhadap jumlah daya energi listrik yang dihasilkan dengan bahan bakar yang dibutuhkan. *Effisiensi* tertinggi didapatkan pada tanggal 22 September sebesar **42,67%** dengan *Heat Rate* **2,34 Btu/kWh** dan *Ratio* **0,22 Nm³/kWh**
2. Untuk 1 kWh energi listrik yang dihasilkan engine gas jenbacher bernilai **Rp. 845,225**
3. Engine gas membutuhkan biaya sebesar **Rp. 410.438.832** untuk bisa beroperasi selama 11 hari
4. Untuk 1 kWh energi listrik PLN yang dipakai pada jam beban puncak bernilai **Rp. 1.553,67** dan pada jam lewat beban puncak bernilai **Rp. 1.035,78**
5. PLN mentarifkan energi listrik yang dipakai selama 11 hari sebesar **Rp. 330.233.801,436**

5.2 Saran

Dari analisis yang telah dilakukan pada engine gas Jenbacher di PT Musim Mas Martubung, maka ada beberapa saran yang akan penulis sampaikan yaitu:

1. Untuk mendapatkan nilai efisiensi yang lebih tinggi maka sebaiknya engine gas beroperasi pada beban minimum 70% dari kapasitas engine gas milik. Karena sistem *Leannox* bekerja pada beban tinggi akan membuat engine gas menjadi lebih efisien
2. Nilai efisiensi kerja engine gas Jenbacher di PT Musim Mas Martubung masih tergolong bagus, untuk mendapatkan nilai efisiensi yang lebih tinggi perlu dilakukan pengecekan kualitas gas dan nilai LHV nya
3. Jika beban yang tersedia di PT Musim Mas Martubung dibawah 70% dari kapasitas engine gas, maka lebih baik menggunakan energi listrik dari PLN saja. Karena jauh lebih murah walaupun seringnya mengalami gangguan jaringan seperti drop voltage, trip breaker, flicker dan gangguan-gangguan minor dari jalur distribusi PLN
4. Penggunaan energi listrik dari PLN ataupun Engine Gas tergantung dari kebutuhan produksi pabrik

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, M., Irawati, N., Sinaga, H. D. E., Retnosari, D., Maulani, J., & Raja, H. D. L. (2021, June). Decision support system analysis for selecting a baby cream product with Preference Selection Index (PSI) Baby Sensitive Skin Under 3 Year. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1933, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- Brauers, W. K. M. (2013). Multi-objective seaport planning by MOORA decision making. *Annals of Operations Research*, 206(1), 39–58.
- Hatta, H. R., Rizaldi, M., & Khairina, D. M. (2016). Penerapan Metode Weighted Product Untuk Pemilihan Lokasi Lahan Baru Pemakaman Muslim Dengan Visualisasi Google Maps. *Jurnal Nasional Teknologi Dan Sistem Informasi*, 2(3), 85–94. <https://doi.org/10.25077/TEKNOSI.v2i3.2016.85-94>
- Hung, N. V., van Hung, P., & Anh, B. T. (2018). Database Design For E-Governance Applications: A Framework For The Management Information Systems Of The Vietnam Committee For Ethnic Minority Affairs (CEMA). *International Journal of Civil Service Reform and Practice*, 3(1).
- Jogiyanto, H. M. (2016). *Analisis Dan Desain Sistem Informasi, Pendekatan Terstruktur Teori Dan Praktek Aplikasi Bisnis*. Andi Offset.
- Keen, P. G. W., & Scott-Morton, M. S. (1978). *Decision Support Systems: An Organizational Perspective*. Addison-Wesley.
- Kurniawan, T. A. (2018). Pemodelan Use Case (UML): Evaluasi Terhadap beberapa Kesalahan dalam Praktik. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 5(1), 77. <https://doi.org/10.25126/jtiik.201851610>
- Ladjamudin, A.-B. bin. (2017). *Analisis dan Desain Sistem Informasi*. Graha Ilmu.
- Nakatsu, R. T. (2019). *Reasoning with Diagrams : Decision-Making and Problem-Solving with Diagrams*. John Wiley & Sons.
- Nofriansyah, D. (2014). *Konsep Data Mining vs Sistem Pendukung Keputusan*. Deepublish.
- Praniata, A. R., Kridasuwarno, B., & Puspitorini, W. (2019a). Effectiveness of The Futsal Passing Exercise Model Based on Small-Sided Games for The Middle School Levels. *Journal of Physical Education, Sport, Health and Recreation*, 8(1), 18–21. <https://doi.org/10.15294/active.v8i1.27920>
- Praniata, A. R., Kridasuwarno, B., & Puspitorini, W. (2019b). Model Latihan Passing Futsal Berbasis Small Sided Games Untuk Siswa Sekolah Menengah Atas. *Journal Sport Area*, 4(1), 191. [https://doi.org/10.25299/sportarea.2019.vol4\(1\).2364](https://doi.org/10.25299/sportarea.2019.vol4(1).2364)
- Rizka, A., Efendi, S., & Sirait, P. (2018, September). Gain ratio in weighting attributes on simple additive weighting. In *IOP Conference Series*:

Materials Science and Engineering (Vol. 420, No. 1, p. 012099). IOP Publishing.

Sukmawati, R., & Priyadi, Y. (2019). Perancangan Proses Bisnis Menggunakan

Wayahdi, M. R., Zarlis, M., & Putra, P. H. (2019, June). Initialization of the Nguyen-widrow and Kohonen Algorithm on the Backpropagation Method in the Classifying Process of Temperature Data in Medan. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1235, No. 1, p. 012031). IOP Publishing.

UML Berdasarkan Fit/Gap Analysis Pada Modul Inventory Odoo. *INTENSIF: Jurnal Ilmiah Penelitian Dan Penerapan Teknologi Sistem Informasi*, 3(2), 104. <https://doi.org/10.29407/intensif.v3i2.12697>

Technopedia. (2019). *Unified Modeling Language (UML)*. Technopedia. <https://www.techopedia.com/definition/3243/unified-modeling-language-uml>

Turban, E., Aronson, J. E., & Liang, T. (2005). *Decision Support Systems and Intelligent Systems*. Andi.

Uml-diagrams.org. (2019). *Use case diagrams are UML diagrams describing units of useful functionality (use cases) performed by a system in collaboration with external users (actors)*. <https://www.uml-diagrams.org/use-case-diagrams.html>

UTM. (2019). *Concept: Use-Case Model*. Univesidad Technologica de La Mixteca. http://www.utm.mx/~caff/doc/OpenUPWeb/openup/guidances/concepts/use_case_model_CD178AF9.html

Wasserkrug, S., Dalvi, N., Munson, E. V., Gogolla, M., Sirangelo, C., Fischer-Hübner, S., Ives, Z., Velegrakis, Y., Bevan, N., Jensen, C. S., & Snodgrass, R. T. (2019). Unified Modeling Language. In *Encyclopedia of Database Systems* (pp. 3232–3239). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_440

Wikipedia. (2005). *Sistem*. Wikipedia. <https://id.wikipedia.org/wiki/Sistem>

Windarto, A. P., Siregar, M. N. H., Suharso, W., Fachri, B., Supriyatna, A., Carolina, I., ... & Toresa, D. (2019, August). Analysis of the K-Means Algorithm on Clean Water Customers Based on the Province. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1255, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.