



TESIS - TM185400

**PENGARUH PENGGUNAAN BATERAI TERHADAP
BIAYA OPERASIONAL DAN PENGURANGAN EMISI
GAS CO₂ PADA PABRIK MANUFAKTUR**

ABDILLAH HADI ALIF ILHAMI
NRP. 6007201010

Dosen Pembimbing I
Suwarno, S.T., M.Sc, Ph.D.
NIP 198005202005011003

Dosen Pembimbing II
Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc.
NIP 196303141988031002

Program Studi Magister
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TESIS - TM185400

**PENGARUH PENGGUNAAN BATERAI TERHADAP
BIAYA OPERASIONAL DAN PENGURANGAN EMISI
GAS CO₂ PADA PABRIK MANUFAKTUR**

ABDILLAH HADI ALIF ILHAMI
NRP. 6007201010

Dosen Pembimbing I
Suwarno, S.T., M.Sc, Ph.D.
NIP 198005202005011003

Dosen Pembimbing II
Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc.
NIP 196303141988031002

Program Studi Magister

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



THESIS - TM185400

**THE EFFECT OF USING BATTERY ON ENERGY
OPERATION COST AND CO2 REDUCTION IN
MANUFACTURING PLANT**

**ABDILLAH HADI ALIF ILHAMI
NRP. 6007201010**

Supervisor
Suwarno, S.T., M.Sc, Ph.D.
NIP 198005202005011003

Co-Supervisor
Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc.
NIP 196303141988031002

Master Study Program
Mechanical Engineering Department
Faculty Of Industrial And System Engineering
Sepuluh Nopember Of Institut Teknologi
Surabaya
2022

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

ABDILLAH HADI ALIF ILHAMI

NRP. 6007201010

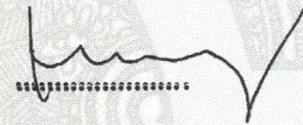
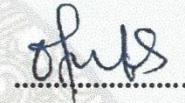
Tanggal Ujian: 15 Juli 2022

Periode Wisuda: September 2022

Disetujui oleh

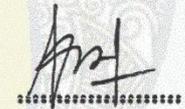
Pembimbing :

1. Suwarno, S.T., M.Sc, Ph.D.
NIP. 198005202005011003
2. Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc.
NIP. 196303141988031002



Penguji:

1. Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc, Ph.D
NIP. 198512022014042002
2. Wahyu Wijanarko, S.T., M.Sc.
NIP. 198202092012121001



Kepala Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
(INDSYS)


Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.
NIP. 196604021989031002



(Halaman sengaja dikosongkan)

**PENGARUH PENGGUNAAN BATERAI TERHADAP BIAYA
OPERASIONAL DAN PENGURANGAN EMISI GAS CO₂ PADA PABRIK
MANUFAKTUR**

Nama Mahasiswa : Abdillah Hadi Alif Ilhami
NRP : 6007201010
Pembimbing 1 : Suwarno, S.T., M.Sc, Ph.D.
Pembimbing 2 : Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc.

ABSTRAK

Salah satu industri manufaktur Indonesia yaitu PT. Barata Indonesia (persero), menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energy alternatif untuk mendukung operasional workshop. Daya yang terpasang pada workshop sebesar 1.1 MW, tetapi aktualnya penggunaan listrik untuk operasional hanya memakan 31% dari batas minimum 44.400 kWh, sehingga ada peluang untuk efisiensi dari energi listrik yang dihasilkan PLTS dan daya listrik yang terpasang. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kebutuhan daya listrik karena adanya PLTS dan pengaruh penggunaan baterai terhadap biaya operasional energi dan pengurangan emisi gas CO₂. Ada dua skema yang akan dilakukan, skema pertama adalah dengan memanfaatkan energi listrik dari PLTS dan daya listrik PLN tanpa menggunakan baterai. Skema kedua dengan menggunakan baterai Lithium-ion sebagai sistem penyimpanan energy dari PLTS. Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah simulasi menggunakan Matlab-Simulink serta analisa monitoring energi listrik pada PLTS. Model Photovoltaic (PV) untuk simulasi menggunakan module Advance Power API-P320 dengan 93 parallel string dan 17 module per string untuk dapat mencapai kapasitas 506 KWp. Hasil dari simulasi dan perhitungan aktual untuk PLTS on-grid dapat mengurangi biaya operasional listrik sebesar 82%. Kebutuhan energy baterai untuk skema PLTS off-grid sebesar 1562.773 kWh. Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS dapat mengurangi emisi gas CO₂ selama dua tahun sebanyak 1010.45 ton.

Kata Kunci : Baterai, manufaktur, PLTS, emisi gas CO₂, Matlab-Simulink

(Halaman sengaja dikosongkan)

**THE EFFECT OF USING BATTERY ON ENERGY OPERATION COST
AND CO₂ REDUCTION IN MANUFACTURING PLANT**

By : Abdillah Hadi Alif Ilhami
Student Identity Number : 6007201010
Supervisor : Suwarno, S.T., M.Sc, Ph.D.
Co-Supervisor : Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc.

ABSTRACT

One of manufacturing industries in Indonesia, PT. Barata Indonesia (Persero), uses a Solar Power Plant (PLTS) as an alternative energy source to support workshop operations. The installed power in the workshop is 1.1 MW, but the actual use of electricity for operations only consumes 31% of the minimum limit of 44,400 kWh, so there is an opportunity for efficiency from the electrical energy produced by PLTS and the installed electrical power. This study aims to evaluate the need for electrical power due to PLTS and the effect of battery use on energy operational costs and reduction of CO₂ gas emissions. There are two schemes that will be carried out, the first scheme is to utilize electrical energy from PLTS and PLN electricity without using batteries. The second scheme uses a Lithium-ion battery as an energy storage system from PLTS. The method used in this study is a simulation using Matlab-Simulink and analysis of electrical energy monitoring in PLTS. The Photovoltaic (PV) model for simulation uses the Advance Power API-P320 module with 93 parallel strings and 17 modules per string to reach a capacity of 506 KWp. The results of simulations and actual calculations for on-grid PV mini-grid can reduce electricity operating costs by 82%. The battery energy requirement for the off-grid PLTS scheme is 1562,773 kWh. Electrical energy produced by PLTS can reduce CO₂ emissions for two years by 1010.45 tons.

Keywords : Battery, manufacturing, PLTS, CO₂ emission , Matlab-Simulink

(Halaman sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, hidayah dan ridho-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan judul “**Pengaruh Penggunaan Baterai Terhadap Biaya Operasional Dan Pengurangan Emisi Gas Co₂ Pada Pabrik Manufaktur**”. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan akademis dalam menempuh pendidikan Program Studi Magister S2 Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan tesis ini tidak lepas dari peran dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan terselesaikannya tesis ini penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Ayah Effendi Zaini dan Mama Pudji Triati Yuliah serta adik tersayang Muhammad Izzat Farisi, yang selalu memberikan semangat, doa dan motivasi kepada penulis. Tanpa kasih sayang dan dukungan penuh dari mereka penulis tidak akan bisa menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Istri tercinta penulis, Lalitya Syifalia yang senantiasa memberi dukungan, memberi pengertian dan sebagai *support system* utama bagi penulis. Dan juga kepada anak tercinta penulis, Alfath Zafranu Hadisfa yang terlahir saat proses penyusunan tugas akhir ini, sehingga menjadi *mood booster* dan menambah semangat penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Suwarno, S.T., M.Sc, Ph.D selaku dosen pembimbing tesis yang telah memberikan ilmu, nasihat, dan bimbingan kepada penulis selama ini dengan penuh kesabaran dan arahan yang membangun.
4. Bapak Dr. Ir. Witantyo, M.Eng.Sc selaku dosen pembimbing kedua tesis yang selalu memberikan motivasi dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis mulai dari saat menjadi pembimbing di ITS Team Sapuaring sewaktu S1 hingga saat ini. Tanpa bantuan dan kesabaran dari beliau mungkin tugas akhir ini tidak bisa terselesaikan dengan baik.
5. Ibu Ika Dewi Wijayanti, S.T., M.Sc, Ph.D, Bapak Putu Suwarta, S.T., M.Sc, Ph.D dan Bapak Wahyu Wijanarko, S.T., M.Sc, selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan untuk penulis guna penyempurnaan tesis ini.

6. Khalikul Haqqur Rahman M56 dan Bayu Adhi Saputro M56 sebagai partner yang selalu memberikan dukungan kepada penulis saat penyelesaian tugas akhir ini.
7. Teman-teman Teknik Mesin ITS M55, angkatan 2012 yang walaupun tidak secara langsung dapat memberikan motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Seluruh rekan-rekan S2 Teknik Mesin angkatan 2020, terutama Lab Metallurgy dan Lab Otomasi yang selalu menjadi garda terdepan dalam.
9. Segenap dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS yang telah mencurahkan segala tenaga dan pikiran dalam rangka proses akademik dan non-akademik selama penulis menempuh pendidikan magister di Departemen Teknik Mesin.
10. Semua pihak yang telah membantu dalam proses dalam penyusunan Tugas Akhir yang tidak dapat disebutkan satu persatu

Dengan selesainya laporan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa penelitian tugas akhir ini belum sempurna sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk perbaikan demi kesempurnaan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini memberikan manfaat dan dapat menambah wawasan keilmuan bagi semua pihak.

Surabaya, 19 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	5
2.2 Photovoltaic array	7
2.2.1 Konfigurasi modul seri	7
2.2.2 Konfigurasi modul paralel	8
2.3 Kurva Karakteristik Photovoltaic	9
2.3.1 Maximum Power Point Tracking (MPPT)	10
2.4 Sistem Penyimpanan Energy (Energy Storage System)	10
2.4.1 Perhitungan Kapasitas Baterai	11
2.4.2 <i>State of Charge</i> Baterai	12
2.4.3 <i>Life Cycle</i> pada Baterai Lithium-ion	12
2.5 Monitoring Produksi Energy Listrik PT. Barata Indonesia	13

2.6 Penelitian Terdahulu.....	14
2.7 Analisa Kelayakan Investasi.....	16
2.7.1 Net Present Value (NPV)	16
2.7.2 Internal Rate of Return (IRR).....	17
2.7.3 Payback Periode	17
BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1 Diagram Alir	19
3.2 Mesin Produksi dan Utilitas Workshop.....	20
3.2.1 Menghitung Total Daya yang Dibutuhkan untuk Produksi	20
3.3 Hasil Energi Listrik PLTS	22
3.3.1 Data Hasil Energi Listrik Aktual PLTS	22
3.3.2 Data Iradiansi Matahari untuk input Model Simulasi	23
3.4 Model Simulasi PLTS On-Grid	24
3.4.1 Menentukan Spesifikasi PV Array	24
3.4.2 Modeling PLTS On-Grid Tanpa Baterai dan Menggunakan Baterai	25
3.5 Menghitung Produksi Listrik PLTS dan Pengurangan Emisi Gas CO ₂	25
3.6 Menghitung Kapasitas dan <i>Life Cycle</i> Baterai.....	26
3.6.1 Menghitung Kapasitas dan Energi Baterai	26
3.6.2 Menghitung <i>Life Cycle</i> Baterai.....	28
3.7 Analisa kelayakan investasi Baterai	28
3.7.1 Net Present Value (NPV)	29
3.7.2 Internal Rate of Return (IRR).....	29
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Pemetaan Beban Listrik Workshop	31
4.2 Hasil Energi Listrik PLTS	32
4.2.1 Hasil Energi Listrik PLTS Aktual Monitoring	32

4.2.2 Hasil Simulasi Energi Listrik PLTS	34
4.3 Operasional Workshop dengan PLTS On-grid Sistem.....	36
4.3.1 Export Energi Listrik PLTS.....	37
4.3.2 Menghitung kebutuhan Daya Listrik yang terpasang.....	38
4.4 Operasional Workshop dengan PLTS Off-grid Sistem	40
4.4.1 Menghitung kapasitas dan energi baterai	40
4.4.2 Hasil Simulasi Beban vs Energi Listrik PLTS dan SOC% Baterai....	40
4.5 Analisa Perhitungan <i>Life cycle</i> Baterai Lithium.....	43
4.6 Pengurangan Emisi Gas CO ₂	43
4.7 Analisa kelayakan investasi PLTS Off-grid sistem dengan menggunakan baterai	44
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	47
5.1 Kesimpulan.....	47
5.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA	51
BIODATA PENULIS.....	55

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Total Daya yang dibutuhkan mesin produksi	22
Tabel 3.2 Iradiansi matahari dalam 24 jam.....	24
Tabel 4.1 Data Iradiansi Matahari selama 24 Jam.....	34
Tabel 4.2 Hasil Energi Listrik Listrik Hasil Simulasi vs Aktual	35
Tabel 4.2 Hasil Energi Listrik Listrik Hasil Simulasi vs Aktual	36
Tabel 4.4 Load List Mesin Workshop.....	37
Tabel 4.5 Kebutuhan Daya dan Export Listrik PLN.....	39
Tabel 4.6 Umur Baterai dan waktu replacement baterai untuk case Tipe 1 2 3 ...	43
Tabel 4.7 Perhitungan pengurangan emisi gas CO ₂	44

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 PLTS Atap Workshop PT. Barata Indonesia	5
Gambar 2.2 Mode Operasi On-Grid.....	6
Gambar 2.2 Mode Operasi On-Grid.....	6
Gambar 2.4 Spesifikasi PLTS Atap Workshop PT. Barata Indonesia.....	7
Gambar 2.5 Konfigurasi PV Seri	8
Gambar 2.6 Konfigurasi PV Paralel.....	9
Gambar 2.7 Kurva I-V dan P-V (kurva karakteristik) saat keadaan normal.....	9
Gambar 2.8 Grafik DOD terhadap Life Cycle Baterai Lithium-ion	13
Gambar 2.9 Dashboard Monitoring PLTS PT. Barata Indoensia	13
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian untuk Skema On-grid dan Off grid	19
Gambar 3. 2 Mesin produksi dan utilitas workshop	20
Gambar 3.3 Monitoring harian mesin CNC Laser Cutting	21

Gambar 3.4 Run Rate harian mesin CNC Laset Cutting	21
Gambar 3.5 Data Aktual Hasil Pembangkitan Listrik PLTS	23
Gambar 3.6 Lokasi pengambilan data iradiansi berdasarkan database NASA	23
Gambar 3.7 Grafik Iradiansi matahari dalam 24 jam.....	24
Gambar 3.8 Spesifikasi Model PV Array	24
Gambar 3. 9 PLTS system on-grid tanpa menggunakan engery storage	25
Gambar 3. 10 PLTS system off-grid menggunakan engery storage	25
Gambar 3.11 Dashboad monitoring produksi listrik PLTS	25
Gambar 3.12 Nilai CO2 Factor	26
Gambar 3.13 Input Block Parameter untuk simulasi Baterai Lithium-ion	27
Gambar 3.14 Karakteristik Discharge Baterai Lithium ion yang gunakan untuk simulasi	27
Gambar 3.15 Biaya Operasional dan Perbaikan (O&M)	28
Gambar 4.1 (a) Pemetaan beban mesin dengan peak load di pagi dan siang hari (b) Pemetaan beban mesin dengan peak load di siang hari (c) Pemetaan beban mesin rata rata dari tipe 1 dan 2.....	32
Gambar 4.2 Hasil Energi Listrik perbulan dari tahun 2020 sampai 2022.....	32
Gambar 4.3 (a) Hasil monitoring bulan Maret 2020 (b) Hasil monitoring bulan Januari 2021 (c) Hasil monitoring bulan Februari 2021	33
Gambar 4.4 Data Monitoring Energi Listrik PLTS Sepember 2020 dan Nopember 2021	34
Gambar 4.5 Energi Listrik PLTS hasil Simulasi selama 24 Jam	35
Gambar 4.6 Total Energi Listrik Hasil Simulasi vs Aktual	35
Gambar 4.7 Total tagihan PLN Bulan Januari 2022	36
Gambar 4.8 Grafik pemakaian daya aktual perbulan terhadap daya minimum penagihan listrik PLN	36

Gambar 4.9 Catatan Meter Export PLTS ke PLN.....	38
Gambar 4.10 Pemakaian Listrik Aktual vs Energi Listrik PLTS.....	38
Gambar 4.11 Hasil Simulasi PLTS Off-Grid dengan Beban Mesin Tipe 3 Menggunakan Baterai	41
Gambar 4.12 Hasil Simulasi PLTS Off-Grid dengan Beban Mesin Tipe 3 Menggunakan Baterai	42
Gambar 4.13 Hasil Simulasi PLTS Off-Grid dengan Beban Mesin Tipe 3 Menggunakan Baterai	42
Gambar 4.14 Pengurangan Emisi Gas CO2 dari penggunaan PLTS	43
Gambar 4.15 Analisa kelayakan investasi baterai – Tipe 1	45
Gambar 4.16 Analisa kelayakan investasi baterai – Tipe 2	45
Gambar 4.17 Analisa kelayakan investasi baterai – Tipe 3	46

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada 22 April 2016, Indonesia dan 170 negara anggota PBB lainnya menanda tangani Perjanjian Paris tentang Perubahan Iklim dalam acara Upacara Tingkat Tinggi Penandatanganan Perjanjian Paris (high-level Signature Ceremony for the Paris Agreement) yang berlangsung di Markas Besar PBB, New York, Amerika Serikat. Perjanjian Paris merupakan kesepakatan global yang monumental untuk menghadapi perubahan iklim. Komitmen negara-negara dinyatakan melalui Nationally Determined Contribution (NDC) untuk periode 2020-2030. Sebagai bentuk dukungan untuk mencapai target pemerintah Indonesia tersebut, PT. Barata Indonesia (persero) melakukan inovasi dengan konsep Green Factory Workshop. Konsep Green Factory ini merupakan cara yang efektif sebagai perusahaan manufaktur untuk dapat mengurangi emisi gas CO₂. Implementasi konsep Green Factory tersebut diterapkan pada workshop baru PT. Barata Indonesia (persero) diatas tanah seluas 36,800 m² dengan luas bangunan sebesar 8,800 m². Menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi alternative. Pemasangan solar panel memanfaatkan atap bangunan workshop, kantor dan gudang dengan total luasan sebesar 1300 m². PLTS yang terpasang mempunyai kapasitas 506 kWp, Si-mono Module, tilt degree 20° dengan system on-grid, yang masih membutuhkan supply listrik dari PLN untuk operasional workshop. Hasil listrik PLTS yang tersisa dari konsumsi operasional workshop akan di export menjadi pengurang untuk tagihan listrik yang dibayarkan ke PLN.

Workshop ini diperuntukan sebagai Heavy Machining Center, yang outputnya adalah produk-produk yang membutuhkan mesin-mesin besar pada proses manufakturnya. Kapasitas maksimal workshop sesuai design adalah 6000 ton/tahun dengan daya PLN yang terpasang sebesar 1.110.000 VA. Tetapi kondisi aktual saat ini, kapasitas produksi workshop adalah 3600 ton/tahun, karena masih dalam proses pengembangan. Jika dilihat dari data konsumsi listrik perbulan yang digunakan untuk produksi, belum dapat memenuhi batas

minimal pemakaian listrik yang sudah ditetapkan oleh PLN. Sehingga biaya listrik perbulan yang dibayarkan adalah biaya minimal dari kapasitas yang terpasang sesuai hasil dari perhitungan PLN, sehingga hasil export listrik dari PLTS tidak mengurangi jumlah tagihan perbulan tersebut. Kondisi ini merupakan peluang untuk dilakukan analisa lebih lanjut terkait kapasitas daya dan konsumsi energi listrik yang dibutuhkan oleh workshop, dimana ada supply listrik tambahan yang dihasilkan oleh PLTS.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan baterai sebagai *energy storage* yang sesuai dengan karakteristik PLTS terhadap konsumsi energi listrik yang dibutuhkan oleh workshop untuk proses produksi dan seberapa besar pengurangan emisi gas CO₂ yang dapat dihasilkan dari PLTS yang terpasang. Ada dua skema yang akan dilakukan, skema pertama adalah menentukan besarnya daya listrik workshop yang digunakan untuk proses produksi dengan bantuan supply listrik dari PLTS yang terpasang tanpa menggunakan baterai dan masih terkoneksi dengan listrik PLN. Skema kedua adalah menentukan besarnya daya listrik workshop yang digunakan untuk proses produksi dengan bantuan supply listrik dari PLTS yang terpasang dengan menggunakan baterai. Dan juga menghitung energi listrik yang dihasilkan dari PLTS sebagai upaya pengurangan emisi gas CO₂. Diharapkan dengan mengetahui konsumsi energi, kapasitas daya workshop, hasil energi listrik dari PLTS dan kapasitas baterai yang sesuai dengan karakteristik PLTS, dapat menurunkan biaya operasional perusahaan dan memberikan kontribusi untuk mengurangi emisi gas CO₂. Hasil dari penelitian juga dapat dijadikan referensi untuk pengembangan green factory workshop untuk industry manufaktur di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana menentukan pemodelan PLTS on-grid tanpa baterai dan PLTS off-grid menggunakan baterai yang terdapat pada workshop?
2. Bagaimana menentukan kebutuhan daya dan kapasitas baterai sesuai dengan karakteristik PLTS yang digunakan untuk operasional workshop?

3. Bagaimana menentukan biaya operasional energi dan pengurangan emisi gas CO₂ dari PLTS pada workshop?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut

1. Mendesain model PLTS on-grid tanpa baterai dan PLTS off-grid menggunakan baterai.
2. Mendapatkan daya yang dibutuhkan dan kapasitas baterai sesuai dengan karakteristik PLTS untuk operasional workshop.
3. Menghitung biaya operasional energi dan pengurangan emisi gas CO₂ dari PLTS yang terpasang di workshop.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Simulasi menggunakan software MATLAB – Simulink 2022a.
2. Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya menggunakan sistem on-grid dan off-grid.
3. Simulasi dilakukan dengan data yang diambil selama 24 jam.
4. Data PLTS diambil dari monitoring website PT. Barata Indonesia (persero).

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini sebagai berikut

1. Sebagai sarana untuk penerapan keilmuan yang telah didapatkan selama berkuliah di Teknik Mesin FTIRS ITS.
2. Sebagai referensi dan menjadi acuan untuk pengembangan industri manufaktur di Indonesia.
3. Sebagai referensi analisa untuk efisiensi operasional workshop pada industry manufaktur di Indonesia.
4. Sebagai referensi untuk design *green factory* jika ada kebutuhan penambahan kapasitas workshop di kemudian hari.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

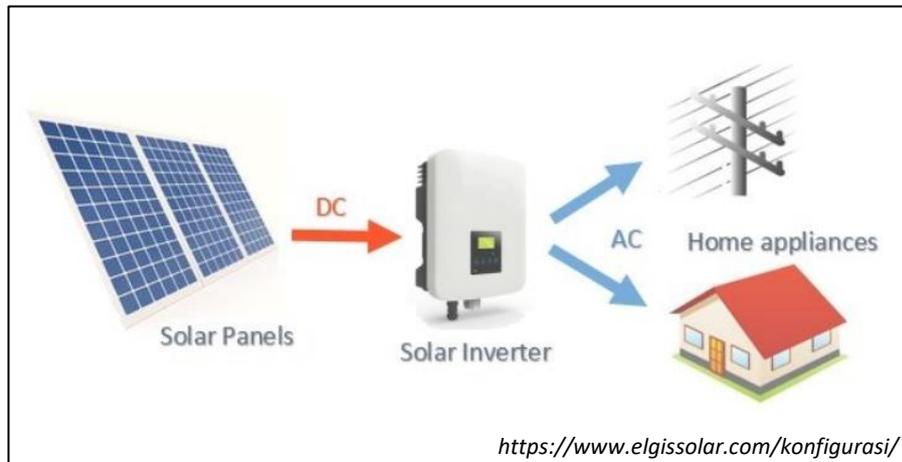
Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan energi dari cahaya matahari untuk menghasilkan energi listrik. Komponen utama dari PLTS adalah panel surya fotovoltaik yang dapat mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik sehingga dapat digunakan untuk kebutuhan listrik sehari-hari. Arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya fotovoltaik adalah arus listrik searah (DC) sehingga dibutuhkan komponen lainnya seperti inverter untuk mengkonversi arus listrik searah (DC) ini menjadi arus listrik bolak-balik (AC). PLTS yang dipasang di workshop PT. Barata Indonesia adalah PLTS tipe atap dengan derajat kemiringan 20° . Kapasitas PLTS tersebut adalah 506 kWp menggunakan Si-mono Module.



Gambar 12.1 PLTS Atap Workshop PT. Barata Indonesia

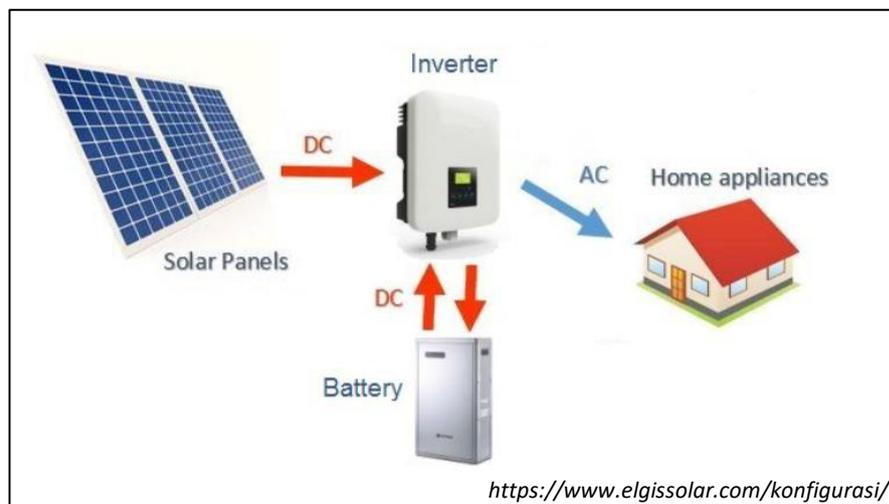
Berdasarkan mode operasi yang ada pada sistem kelistrikan, sistem tenaga listrik terbagi menjadi dua jenis yaitu *Grid-connected (On-grid)* dan *Non Grid-Connected (Off-grid)*. Mode operasi *on-grid* merupakan mode operasi dimana sistem PLTS yang menghasilkan listrik lebih kecil terhubung dengan jaring listrik utama, di Indonesia adalah PLN. Pembangkit yang terpasang pada sistem yang lebih kecil tersebut, bekerja

sama dengan pembangkit pada sistem PLN dalam pemenuhan kebutuhan energi listrik bersama. Sesuai dengan mode operasi tersebut, sistem PLTS *on-grid* ini akan mampu mendapatkan suply energi listrik dari PLN, maupun mampu menjual kelebihan energi yang dibangkitkan kepada PLN.



Gambar 22.2 Mode Operasi On-Grid

Mode operasi yang kedua adalah mode off-grid merupakan mode operasi dimana sistem tidak terhubung pada jaring utama (PLN) sehingga harus mampu beroperasi mandiri dalam memenuhi kebutuhan energinya. Membutuhkan sistem penyimpanan energy berupa baterai sebagai sumber listrik untuk memenuhi kebutuhan konsumsi listrik di malam hari ketika solar panel tidak menghasilkan listrik. Mode ini bisa terdiri atas satu pembangkit saja yang kita sebut stand-alone ataupun lebih dari satu pembangkit yang bisa disebut mikrogrid ataupun minigrid.



Gambar 32.2 Mode Operasi On-Grid

Adapun spesifikasi dari system PLTS yang terpasang pada workshop adalah sebagai berikut :

Geographical Site	Barata	Country	Indonesia	
Situation	Latitude	7.2°S	Longitude	112.7°E
Time defined as	Legal Time	Time zone UT+7	Altitude	20 m
	Albedo	0.20		
Meteo data:	Barata Indonesia Gresik	Meteonorm 7.1 (1961-1990), Sat=100% - Synthetic		
Simulation variant :	New simulation variant			
	Simulation date	25/07/19 16h12		
Simulation parameters				
Collector Plane Orientation	Tilt	20°	Azimuth	0°
Models used	Transposition	Perez	Diffuse	Perez, Meteonorm
Horizon	Free Horizon			
Near Shadings	No Shadings			
PV Array Characteristics				
PV module	Si-mono	Model	Len320Wp	
Custom parameters definition	Manufacturer	Len Industri		
Number of PV modules	In series	17 modules	In parallel	93 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	1581	Unit Nom. Power	320 Wp
Array global power	Nominal (STC)	506 kWp	At operating cond.	503 kWp (27°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	629 V	I mpp	799 A
Total area	Module area	3068 m²		

Gambar 42.4 Spesifikasi PLTS Atap Workshop PT. Barata Indonesia

2.2 Photovoltaic array

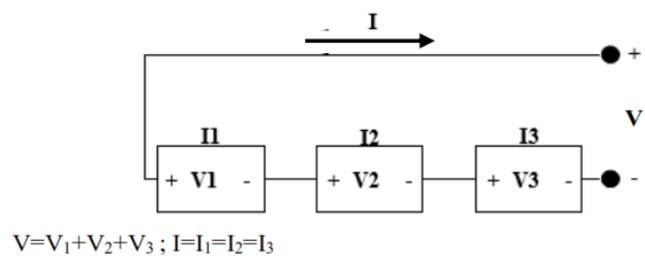
Photovoltaic array adalah interkoneksi modul Photovoltaic yang berfungsi untuk membangkitkan energi listrik yang terdiri dari beberapa unit modul dan panel. Dengan jumlah module Photovoltaic yang disusun dalam jumlah yang besar ,maka pv array memiliki Daya output yang lebih besar sehigga dapat men supply energi listrik dalam suatu wilayah tertentu. Berdasarkan pola konfigurasi Photovoltaic array dapat dibedakan menjadi beberapa macam yang disesuaikan dengan kapasitas beban yang disupply. Masing-masing konfigurasi array memiliki kelebihan dan kekurangan diantaranya adalah:

2.2.1 Konfigurasi modul seri

Modul Photovoltaic dipasang secara seri maka aliran arus melewati setiap unsur panel dalam array. Jika konfigurasi modul diasumsikan sebagai pompa air untuk memutarakan turbin. Turbin merupakan beban yang harus diputar dengan air, jika memakai sebuah pompa mampu memompa air dua galon/menit setinggi 4-7 meter. Namun jika hendak memompa air dua galon/menit setinggi 15 meter

tentunya akan menyambung pompa air secara seri satu sama lain , agar masukan setiap pompa keluar dari pompa lain. Aliran harus sama masing-masing pompa , dan setiap pompa memompa air ke atas . Oleh karena itu, total ketinggian air akan semakin bertambah dan berbanding lurus dengan tingkat tekanan air yang mengalir untuk memutar turbin.

Dalam hal ini listrik juga demikian, modul Photovoltaic yang dipasang secara seri arus yang melewati modul – modul tetap sama, tetapi elektron akan bertambah tegangan setiap melewati modul.

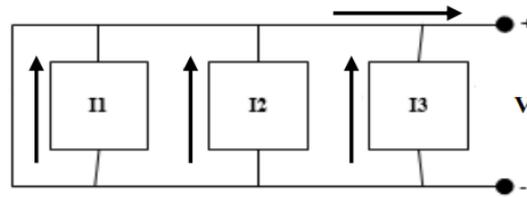


Gambar 52.5 Konfigurasi PV Seri

2.2.2 Konfigurasi modul parallel

Pada konfigurasi modul Photovoltaic yang dipasang secara parallel, memiliki sejumlah electron-elektron yang disambung oleh modul pertama dan modul yang terakhir berada pada tegangan yang sama. Namun arus akan semakin bertambah sesuai dengan jumlah modul yang dipasang. Jika modul dibandingkan sebagai pompa air dan beban dibandingkan sebagai turbin yang berada pada ketinggian yang sama , maka masing –masing pompa akan mampu mengalirkan air dengan arus yang semakin bertambah sehingga turbin dapat berputar dengan daya yang lebih besar pula. Namun karena ketinggian pompa tetap sehingga menyumbang tekanan yang sama pada turbin.

Begitu pula pada modul Fotovoltaik jika dipasang secara parallel memiliki arus yang semakin bertambah ($I = I_1+ I_2+ I_3$). Namun tegangan yang dihasilkan tetap ($V=V_1=V_2=V_3$)

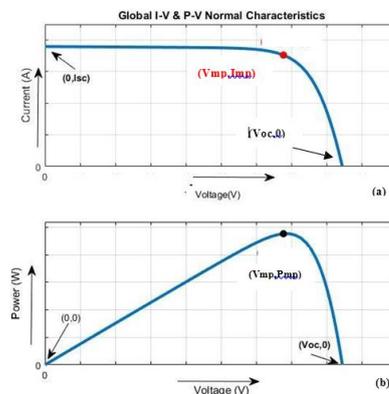


$$V=V_1=V_2=V_3 ; I = I_1+ I_2+ I_3$$

Gambar 62.6 Konfigurasi PV Paralel

2.3 Kurva Karakteristik Photovoltaic

Kurva kekarakteristik Photovoltaic merupakan kurva yang menggambarkan keluaran output dari photovolaitaic. Berdasarkan parameternya kurva karakteristik photovolaitaic ada dua macam yaitu kurva yaitu yang menghubungkan Arus dan Tegangan (V-I) keluaran photovolaitaic. Dan kurva yang merepresentasikan hubungan daya dan tengangan (P-V) keluaran Photovoltaic. Photovoltaic dalam keadaan normal merupakan kadaan Photovoltaic module saat menerima penyinaran di seluruh bagian modul dengan irradiant 1000 Watt/m². Kurva arus (I) terhadap tegangan (V) dan kurva daya (P) terhadap tegangan (V) pada radiasi dan suhu tertentu ditunjukkan pada Gambar 2.13. Pada gambar tersebut terdapat nilai *Maximum Power Point* (MPP). MPP merupakan daya maksimum hasil perkalian nilai arus maksimum (Im) dan nilai tegangan maksimum (Vm).



Gambar 72.7 Kurva I-V dan P-V (kurva karakteristik) saat keadaan normal

Pada Gambar 2.14 masing-masing kurva P-V dan I-V memiliki titik MPP pada Gambar 2.4 terdapat titik short chircuit (Isc) Photovoltaic hal ini terjadi saat nilai tegangan nol sehingga arus maksimum terdapat pada pv.

Sedangkan Tegangan open shircuit (V_{oc}) terjadi saat arus bernilai nol. Tidak selalu nilai kerja pada Fotovoltaik akan selalu pada titik V_m dan I_m . Untuk menjamin Fotovoltaik bekerja pada titik V_m dan I_m sehingga output daya yang dikeluarkan adalah daya maksimum P_{max} diperlukan metode pengendali. Metode pengendali tersebut dinamakan Maximum Power Point Tracking (MPPT).

2.3.1 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum power point tracking (MPPT) merupakan suatu metode pada PV system untuk menghasilkan nilai tegangan dan nilai arus pada daerah operasi maksimum sehingga dihasilkan daya output maksimum. MPPT berupa metode penelusuran (tracking) secara elektronik dengan algoritma tertentu untuk mencari nilai tegangan dan nilai arus pada daerah operasi maksimum. Nilai daya yang MPPT dihasilkan oleh modul Photovoltaic menghasilkan Open Circuit Voltage (V_{oc}). Jika terminal output disambungkan, maka Photovoltaic menghasilkan Short Circuit Current (I_{sc}).

2.4 Sistem Penyimpanan Energy (Energy Storage System)

Sistem penyimpanan energy dapat dikategorikan sebagai perangkat mekanik, elektrokimia, kimia, listrik ataupun termal tergantung pada teknologi penyimpanan yang digunakan. Contoh teknologi mekanis sebagai system penyimpanan energy yang tertua adalah pembangkit listrik tenaga air yang dipompa. keterbatasan teknologi ini adalah kebutuhan akan sumber daya air yang melimpah dan elevasi geografis yang berbeda, serta pembangunan saluran transmisi listrik ke rumah tangga yang mengkonsumsi listrik. Baru-baru ini, biaya konstruksi saluran transmisi telah melampaui biaya pemasangan fasilitas pembangkit listrik tenaga air yang dipompa. Salah satu solusi untuk masalah tersebut adalah dengan menggunakan sistem penyimpanan energy elektrik berupa baterai.

Peningkatan produksi massal baterai dan biaya produksi yang lebih rendah telah mendorong permintaan perangkat penyimpanan energi yang menggunakan baterai semakin bertambah. Salah satu contoh dari baterai

yang sering digunakan tersebut adalah baterai lithium. Baterai lithium memiliki efisiensi pengisian dan pengosongan tertinggi, yaitu pada 95%, sedangkan baterai penyimpanan timbal sekitar 60% -70%, dan baterai aliran redoks, sekitar 70% -75%. Baterai sekunder lithium menyimpan 150–250 watt-jam per kilogram (kg) dan dapat menyimpan energi 1,5–2 kali lebih banyak daripada baterai Na–S, dua hingga tiga kali lebih banyak daripada baterai aliran redoks, dan sekitar lima kali lebih banyak daripada baterai penyimpanan timbal.

Suatu ketentuan yang membatasi tingkat kedalaman pengosongan maksimum, diberlakukan pada baterai. Tingkat kedalaman atau *Depth of Discharge* (DOD) baterai biasanya dinyatakan dalam persentase. Misalnya, suatu baterai memiliki DOD 80%, ini berarti bahwa hanya 80% dari energi yang tersedia dapat dipergunakan dan 20% tetap berada dalam cadangan. Pengaturan DOD berperan dalam menjaga usia pakai (life time) dari baterai tersebut. Semakin dalam DOD yang diberlakukan pada suatu baterai maka semakin pendek pula siklus hidup dari baterai tersebut. Saat melakukan analisis keuangan dan ekonomi, DOD maksimum harus dibatasi hingga 80% untuk memperpanjang masa pakai baterai (*life cycle*), dan pembelian sel pengganti harus dipertimbangkan saat baterai mencapai 80% dari masa pakainya (dalam siklus) untuk menghindari penurunan kinerja baterai [12].

2.4.1 Perhitungan Kapasitas Baterai

Kapasitas daya pada baterai tergantung dari berapa banyak energi yang dapat disimpan. Energi yang tersimpan dalam sebuah baterai memiliki satuan Ah (Ampere hour) atau daya perjam, sehingga dapat mengetahui total kapasitas arus dengan tegangan kerja baterai. Kapasitas baterai di hitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Kapasitas baterai (Ah)} = \frac{W}{V \text{ baterai}}$$

Dengan :

W = Kebutuhan Energi listrik (Watt hour)

V baterai = Beda Potensial Baterai (Volt)

Dan untuk menghitung banyaknya energi yang tersimpan pada baterai sebagai sumber energi listrik ketika tidak adanya supply energi listrik dari PLTS adalah sebagai berikut [5] :

$$\text{Energi Baterai} = \frac{DEC (kWh) - \text{Energi langsung PLTS (kWh)}}{\eta_{Bat} \times DOD_{MAX}}$$

Dimana :

DEC = Daily Energy Consumption (kWh)

η_{Bat} = Efisiensi baterai (%)

DOD_{MAX} = Depth of Discharge (%)

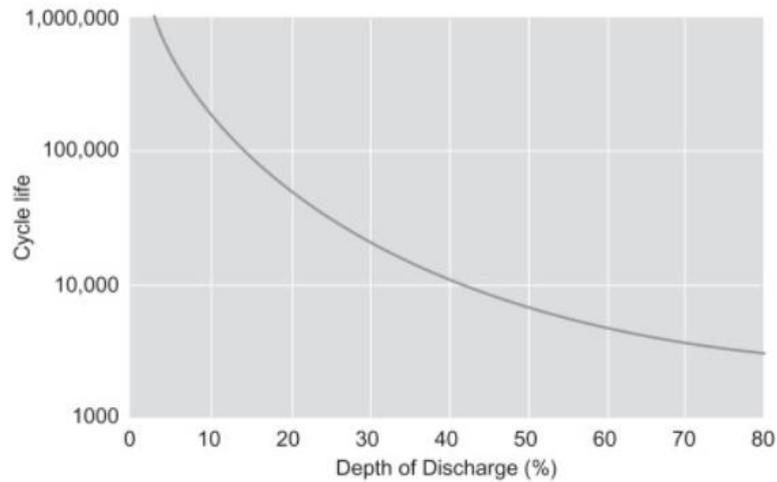
2.4.2 State of Charge Baterai

State of charge baterai adalah perbandingan energi yang tersisa dengan kapasitas energi maksimum pada baterai. Nilai SOC memiliki rentan nilai 0-1, dengan 0 menyatakan baterai dalam keadaan kosong, sedangkan 1 merupakan kondisi baterai dengan keadaan penuh. Nilai State of charge juga bisa dinyatakan dalam bentuk persentase, 0%-100%. Estimasi State of charge adalah salah satu hal yang penting dalam penerapan baterai. Estimasi nilai state of charge yang akurat sangat diperlukan untuk menghindari dari kerusakan sistem, mencegah baterai dari keadaan over charge dan over discharge yang dapat menyebabkan kerusakan permanen pada baterai.

2.4.3 Life Cycle pada Baterai Lithium-ion

Siklus Hidup (*Life Cycle*) baterai adalah jumlah siklus pengisian dan pengosongan yang dapat diselesaikan baterai sebelum kehilangan performa. Siklus hidup baterai Li-ion dipengaruhi secara signifikan oleh Depth of Discharge . Misalnya, baterai yang dikosongkan hanya sebesar 20% dari kapasitas energi penuhnya memiliki siklus hidup yang jauh lebih besar daripada baterai yang dikosongkan lebih dalam

sebesar 80% dari kapasitasnya sehingga hanya 20% dari muatan energi penuhnya yang tersisa.



Gambar 82.8 Grafik DOD terhadap Life Cycle Baterai Lithium-ion

2.5 Monitoring Produksi Energy Listrik PT. Barata Indonesia

PLTS yang terpasang pada workshop PT. Barata Indonesia sudah terintegrasi dengan server, sehingga monitoring produksi listrik dapat dilakukan melalui website sistem PLTS yang sudah terpasang. Berikut tampilan dari monitoring sistem PLTS :



Gambar 92.9 Dashboard Monitoring PLTS PT. Barata Indoensia

Dari monitoring ini dapat dilakukan pengambilan data produksi listrik PLTS, data yang ditampilkan pada monitoring tersebut merupakan data real

setiap lima menit produksi listrik dari PLTS. Riwayat data dapat diambil mulai dari data per hari samapi data pertahun. Sehingga dengan adanya monitoring ini dapat dilakukan analisa produksi energi listrik dan perhitungan pengurangan emisi gas CO₂.

2.6 Penelitian Terdahulu

A 100% Renewable Energy Scenario for the Java-Bali Grid [4], pada jurnal penelitian ini, Matthias Gunter dkk mengungkapkan bahwa banyak negara saat ini berusaha untuk memenuhi kebutuhan energi mereka dengan meningkatkan penggunaan sumber daya terbarukan. Alasan lingkungan, kekhawatiran tentang keamanan energi, dan pertimbangan ekonomi adalah pendorong umum, dengan penekanan yang bervariasi di berbagai negara. Bagaimana pasokan energi yang hanya didasarkan pada sumber daya energi terbarukan mungkin terlihat adalah masalah yang sekarang lebih spekulatif, tetapi menarik dalam hal membuka perspektif jangka panjang. Ini adalah pertanyaan yang harus dijawab untuk setiap sistem pasokan energi individu. Tujuan dari artikel ini adalah untuk mengusulkan dan menilai skenario untuk memasok listrik ke jaringan Jawa-Bali hanya dari sumber energi terbarukan. Setelah membuat rangkaian waktu muat untuk jaringan Jawa-Bali pada tahun 2050, skenario dibuat untuk menutupi beban seluruhnya dengan sumber energi terbarukan. Asumsi dibuat tentang sumber energi yang layak serta kapasitas pembangkit listrik yang dapat diakses atau potensi energi. Fakta bahwa energi matahari harus menjadi sumber utama dari sistem berbasis energi terbarukan tersebut merupakan masalah yang unik, karena memerlukan kapasitas penyimpanan yang besar untuk menyesuaikan catu daya dengan beban pada waktu tertentu. Beberapa opsi untuk mengurangi kapasitas penyimpanan disediakan, termasuk meningkatkan kapasitas PV terpasang, menggunakan bioenergi untuk penyeimbangan musiman, dan melengkapi penyimpanan jangka pendek yang diusulkan dengan penyimpanan jangka panjang ekstra.

Pada jurnal *Simulation and Analysis of Stand-alone Photovoltaic System with Boost Converter using MATLAB/Simulink* [6], Mr. S. Sheik Mohammed dan Dr. D. Devaraj menjelaskan bahwa penggunaan energi terbarukan dan

khususnya energi matahari telah membawa perhatian yang signifikan selama beberapa dekade terakhir. Proyek pembangkit listrik fotovoltaik (PV) diimplementasikan dalam jumlah yang sangat besar di banyak negara. Banyak penelitian dilakukan untuk menganalisis dan memvalidasi kinerja modul PV. Implementasi pengaturan eksperimental untuk sistem tenaga berbasis PV dengan konverter DC-DC untuk memvalidasi kinerja sistem tidak selalu memungkinkan karena kendala praktis. Model simulasi berbasis perangkat lunak membantu menganalisis kinerja PV dan model berbasis rangkaian umum yang dapat digunakan untuk memvalidasi modul PV komersial akan lebih membantu. Simulasi model matematis modul Photovoltaic (PV) dan boost converter DC-DC disajikan dalam makalah ini. Karakteristik I-V dan karakteristik P-V modul PV pada suhu dan tingkat iradiasi yang berbeda dapat diperoleh dengan menggunakan model pada penelitian ini. Desain konverter boost DC-DC juga dibahas secara rinci. Simulasi konverter DC-DC dilakukan dan hasilnya diperoleh dari konverter diumpankan suplai DC konstan dan konverter PV.

G. Cornelisvan Kooten dkk, dalam jurnalnya *How big a battery?* [7], membahas Untuk memenuhi permintaan listrik sekaligus mengurangi emisi CO₂, negara-negara berinvestasi dalam sumber energi terbarukan seperti angin dan matahari. Karena sumber energi ini terputus-putus, aset pembangkit cadangan atau penyimpanan yang cukup diperlukan untuk memenuhi permintaan puncak. penulis memeriksa seberapa besar sistem kelistrikan dapat mengandalkan energi terbarukan yang terputus-putus (angin dan matahari) jika baterai digunakan untuk penyimpanan dalam penelitian ini. Penulis melihat skenario yang mencakup 100 persen energi angin dan matahari, serta skenario yang konsisten dengan kebijakan bebas batu bara. Di bawah batas beban dan baterai, model optimasi dibatasi digunakan untuk mengoptimalkan kapasitas pembangkit termal dan ukuran baterai. Penelitian tersebut dilakukan di jaringan listrik Alberta, yang bergantung pada bahan bakar fosil. Temuan penulis menyiratkan bahwa memasok jaringan dengan energi terbarukan 100 persen mungkin menantang dan mahal. Sangat mungkin untuk mengganti batubara dengan energi terbarukan dan menggunakan gas alam dan baterai

sebagai cadangan, tetapi ini akan membutuhkan baterai yang sangat besar dan mengakibatkan harga yang selangit. Untuk mengakomodasi generasi yang lebih tinggi dari sumber terbarukan, opsi penyimpanan lebih lanjut harus dipelajari.

2.7 Analisa Kelayakan Investasi

Analisis kelayakan investasi dilakukan untuk menghitung apakah suatu proyek atau investasi layak dilakukan dilihat dari beberapa parameter. Pada penelitian ini digunakan 3 metode kelayakan investasi yaitu Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period.

2.7.1 Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) menyatakan bahwa seluruh aliran kas bersih dinilaisekarangkan atas dasar faktor diskonto (discount factor). Teknik ini menghitung selisih antara seluruh kas bersih nilai sekarang dengan investasi awal yang ditkeluarkan. Untuk menghitung *Net Present Value (NPV)* dipergunakan rumus sebagai berikut :

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NFC_t}{(1+i)^t} - II$$

Dimana :

NFC_t : Net Cash Flow periode tahun ke - 1 sampai ke - n

II : Investasi awal (*initial investment*)

i : Tingkat diskon

n : Periode dalam tahun (umur investasi)

Kriteria pengambilan keputusan apakah usulan investasi layak diterima atau layak ditolak adalah sebagai berikut :

- a. Investasi dinilai layak, jika Net Present Value (NPV) bernilai positif (> 0).
- b. Investasi dinilai tidak layak, jika Net Present Value (NPV) bernilai negatif (< 0).

2.7.2 Internal Rate of Return (IRR)

IRR adalah tingkat suku bunga yang menghasilkan nilai NPV sama dengan nol (karena nilai sekarang dari arus kas masuk sama dengan investasi awal). Perhitungan IRR dapat dilakukan dengan rumus sebagai berikut :

$$0 = \sum_{t=0}^T \frac{X_t}{(1 + IRR)^t}$$

Dimana :

X_t : *Cashflow* di tahun ke-t

IRR : *Rate of Return*

Suatu proyek atau investasi dianggap layak apabila nilai IRR investasi tersebut lebih dari nilai MARR (*minimum acceptable rate of return*). Nilai MARR ditentukan berdasarkan tingkat bunga bank atau tingkat bunga bank ditambah risk premium yang mencerminkan tingkat resiko dari proyek tersebut serta ditambah tingkat keuntungan yang diharapkan investor. Dalam proyek teknik, biasanya nilai MARR berkisar antara 10%-13%. Sebaliknya, nilai IRR yang berada dibawah nilai MARR menunjukkan bahwa investasi tidak layak (tidak menguntungkan). Adapun nilai IRR = nilai MARR menunjukkan bahwa pengembalian investasi berada pada titik minimum kelayakan atau titik impas.

2.7.3 Payback Periode

Payback periode adalah periode lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan nilai investasi melalui penerimaan-penerimaan yang dihasilkan oleh proyek atau investasi tersebut. *Payback periode* dapat dicari dengan menghitung berapa tahun kas bersih nilai sekarang kumulatif yang ditaksir akan sama dengan investasi awal.

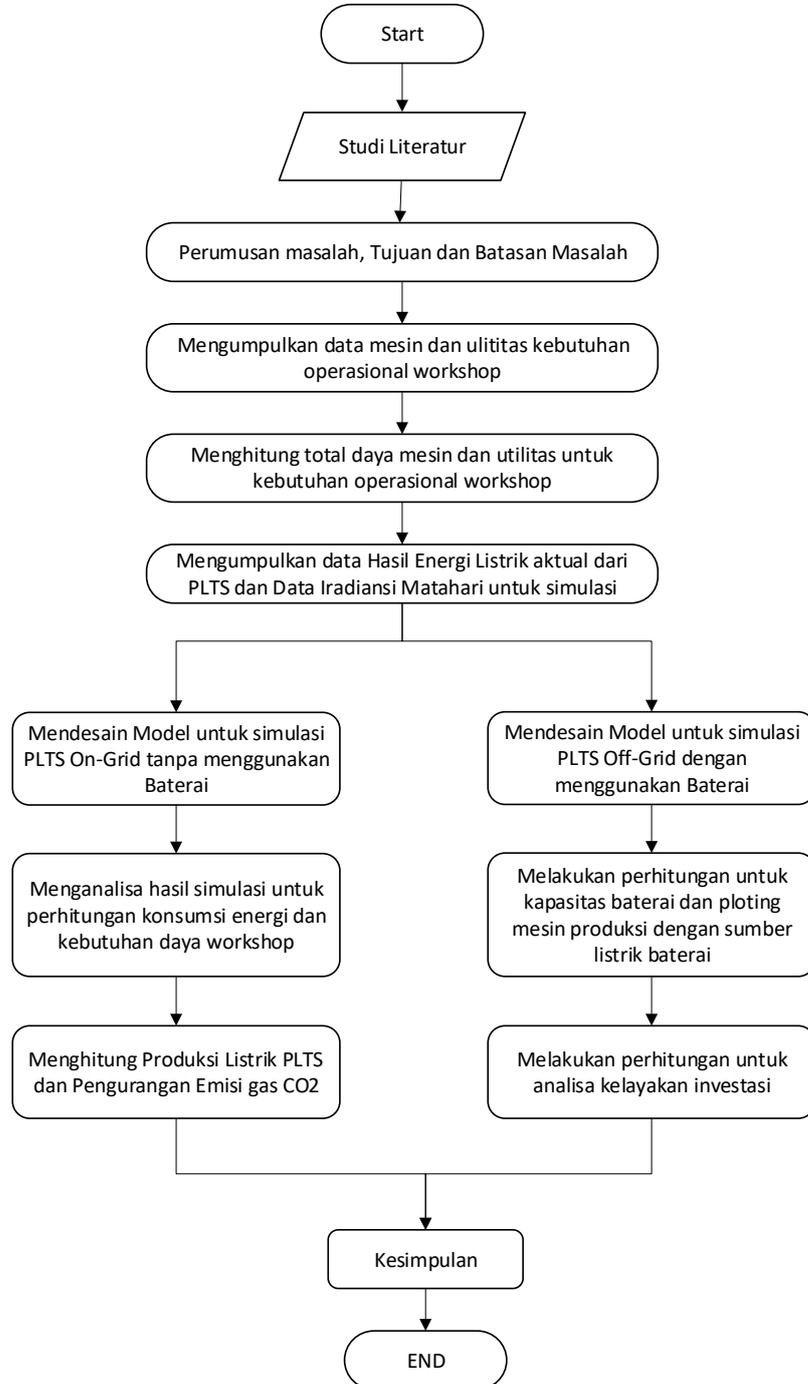
Kriteria pengambilan keputusan apakah suatu investasi layak diterima atau ditolak adalah sebagai berikut :

- a. Investasi dinilai layak apabila, memiliki waktu *payback periode* lebih pendek dari umur proyek tersebut (*cut of periode*).
- b. Investasi dinilai tidak layak apabila, memiliki waktu *payback periode* lebih panjang dari umur proyek tersebut (*cut of periode*).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 103. 1 Diagram Alir Penelitian untuk Skema On-grid dan Off grid

3.2 Mesin Produksi dan Utilitas Workshop

Workshop Precision & Heavy Machining Center ini dibagi menjadi 3 Bay. Bay 1 merupakan Bay untuk mesin-mesin CNC yang mempunyai tingkat presisi yang tinggi. Bay 2 terdapat mesin-mesin dengan kapasitas besar yang diperuntukkan untuk pekerjaan dengan dimensi yang besar. Dan Bay 3 adalah untuk saat ini digunakan sebagai line assembly. Berikut adalah list mesin-mesin dan utilitas yang digunakan untuk produksi:



Gambar 113. 2 Mesin produksi dan utilitas workshop

3.2.1 Menghitung Total Daya yang Dibutuhkan untuk Produksi

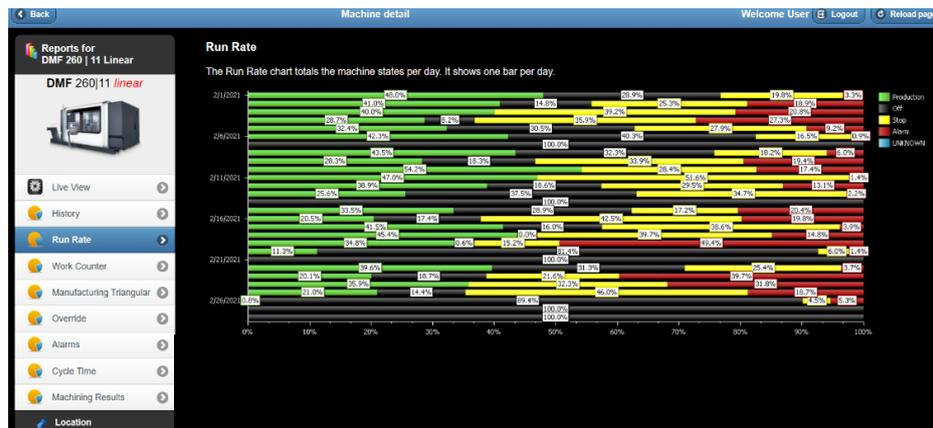
Kebutuhan daya dihitung dalam waktu satu hari, tetapi mesin-mesin produksi tidak beroperasi 24 jam penuh. Operasional workshop dilakukan 2 shift perharinya, 1 shift adalah 8 jam, sehingga lama waktu

operasional mesin perharinya adalah 16 jam. Tentunya mesin-mesin tersebut juga tidak selalu aktif selama 16 jam karena ada waktu standby, loading-unloading dan leadtime menunggu kedatangan material. Berikut merupakan tabel perhitungan untuk total daya yang di butuhkan oleh mesin-mesin dan utilitas produksi untuk satu hari berdasarkan waktu rata-rata penggunaan mesin.

Data mesin diambil dari sampling monitoring mesin yang sudah terkoneksi dengan system monitoring. Berikut salah satu contoh hasil monitoring harian mesin CNC Laser Cutting:



Gambar 123.3 Monitoring harian mesin CNC Laser Cutting



Gambar 133.4 Run Rate harian mesin CNC Laset Cutting

Dari hasil perhitungan tabel 3.1 tersebut, total daya yang dibutuhkan untuk produksi selama satu hari dengan dua shift full load adalah 6030.98 kWh. Pada penelitian ini di ambil satu case dengan sampling mesin-mesin yang masih produktif yang terpasang pada bay 1 dan bay 2 selama 1 shift. Dan pada case ini dibagi menjadi 3 tipe pemetaan beban mesin

untuk mendapatkan karakteristik penggunaan listrik workshop, yaitu pemetaan beban mesin dengan peak load di pagi dan siang hari, beban mesin dengan peak load di siang hari dan beban mesin rata rata dari tipe 1 dan 2.

Tabel 3.1 Total Daya yang dibutuhkan mesin produksi

No	Nama Mesin	Daya Mesin (Watt)	Unit	Waktu Pemakaian (Jam)	Total kWh
1	CNC Laser Cutting 4000 W	4000	1	16	64.00
2	Dryer	822	1	12	9.86
3	CNC Bending Machine	30	1	12	0.36
4	Horizontal Boring Milling CNC	346	1	16	5.53
5	CNC Milling 3 -Axis	40	1	16	0.64
6	Lathe CNC Machine	304	1	16	4.87
7	Mesin Roll Davi	298280	1	12	3579.36
8	Screw Air Compressor	132	1	16	2.11
9	Air Dryer + Air Separator Filter	16	1	16	0.26
10	Semi Gentry Crane 10 Ton	11000	1	6	66.00
11	Overhead Crane 25 Ton	23300	6	6	838.80
12	Drum Rotator with drive motor	3000	3	4	36.00
13	Mesin Las GTAW	4704	1	12	56.45
14	Mesin Las FCAW	13600	1	12	163.20
15	Plasma Cutting	17100	1	16	273.60
16	Mesin Las SMAW TIME ZX7-630	26220	1	12	314.64
17	Mesin Las SAW + Traktor minitrack	38000	1	12	456.00
18	Mesin Las SMAW CADWELD ARC 400	9956	1	16	159.30
		Total			6030.98

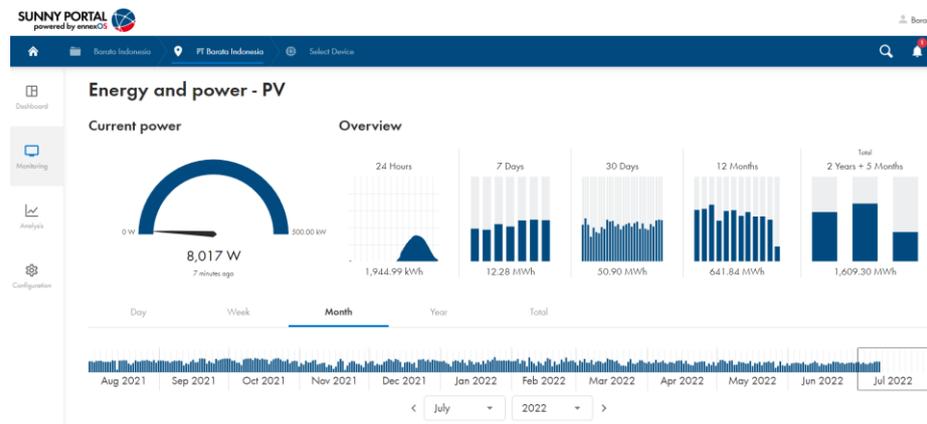
3.3 Hasil Energi Listrik PLTS

Hasil energi listrik aktual dari PLTS yang terpasang di workshop, dapat diambil dari website monitoring seperti pada gambar 2.6. Sedangkan, untuk simulasi dibutuhkan data irradiansi matahari sebagai input model photovoltaic.

3.3.1 Data Hasil Energi Listrik Aktual PLTS

Data aktual hasil energi yang dibangkitkan oleh PLTS dapat diambil dari sistem monitoring. Data yang akan diambil dari monitoring tersebut akan digunakan untuk perhitungan kebutuhan daya listrik dan sebagai dasar dilakukannya simulasi karena dari data tersebut dapat terlihat pada

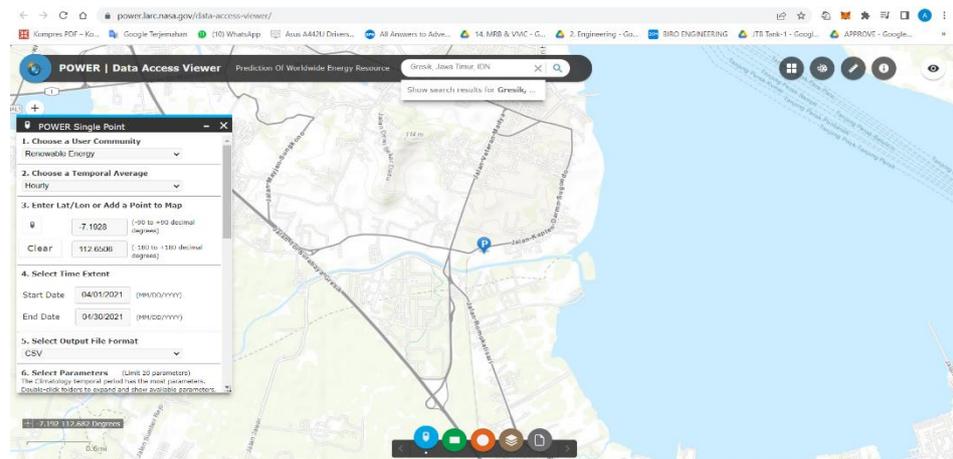
hari dan bulan apakah tinggi rendahnya hasil pembangkitan PLTS. Selain itu digunakan untuk validasi hasil simulasi sehingga dapat diketahui efisiensi dari PLTS aktual untuk perhitungan kebutuhan baterai.



Gambar 143.5 Data Aktual Hasil Pembangkitan Listrik PLTS

3.3.2 Data Iradiansi Matahari untuk input Model Simulasi

Data iradiansi matahari dibutuhkan untuk input iradiansi PV yang akan di simulasikan. Contoh data iradiansi yang diambil adalah data untuk 24 jam pada tanggal 14 April 2022, pengambilan data berdasarkan titik lokasi workshop di Gresik seperti pada gambar berikut:

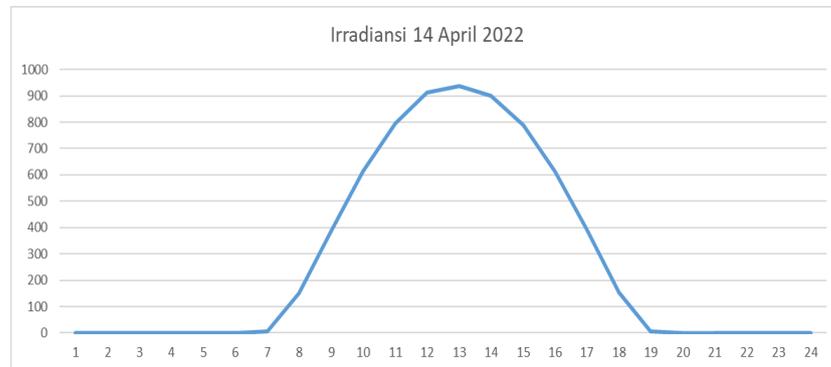


Gambar 153.6 Lokasi pengambilan data iradiansi berdasarkan database NASA

Dari penarikan data iradiansi tersebut, dapat dipetakan selama 24 jam seperti tabel dan grafik berikut :

Tabel 3.2 Iradiansi matahari dalam 24 jam

Waktu (jam)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Irradiance	0	0	0	0	0	0	7.12	150	389	613	796	912	937	899	790	614	394	156	7.52	0	0	0	0	0

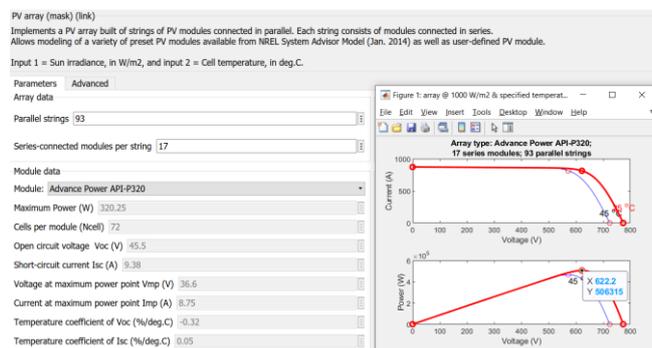


Gambar 163.7 Grafik Iradiansi matahari dalam 24 jam

3.4 Model Simulasi PLTS On-Grid

3.4.1 Menentukan Spesifikasi PV Array

PV Array yang digunakan untuk modeling pada simulasi menggunakan module yang sudah ada pada Simulink. Spesifikasi module pada model di sesuaikan dengan spesifikasi module PLTS yang sudah terpasang di wokshop. Berikut Spesifikasi PV Array yang digunakan untuk simulasi [8] :

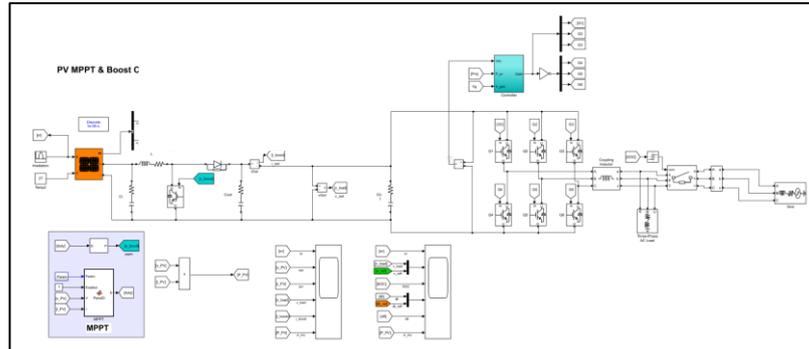


Gambar 173.8 Spesifikasi Model PV Array

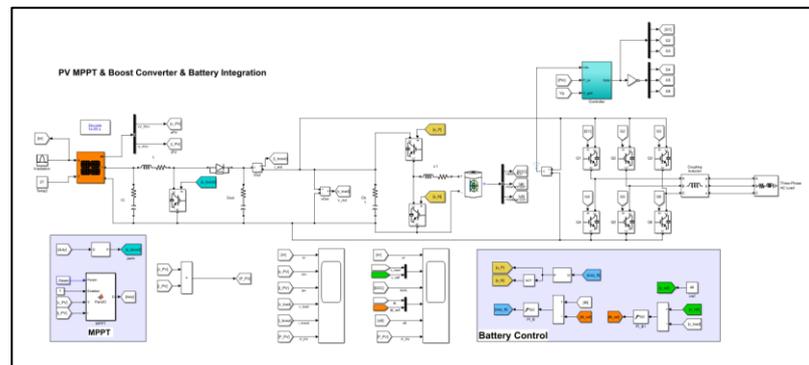
Pada penelitian ini, Module PV menggunakan Advance Power API-P320 dengan 93 parallel string dan 17 module per string untuk dapat mencapai kapasitas 506 KWp. Dengan maksimum daya yang dihasilkan 320 Watt.

3.4.2 Modeling PLTS On-Grid Tanpa Baterai dan Menggunakan Baterai

Adapun model simulasi untuk PLTS on-grid yang adalah sebagai berikut



Gambar 183. 9 PLTS system on-grid tanpa menggunakan energy storage



Gambar 193. 10 PLTS system off-grid menggunakan energy storage

3.5 Menghitung Produksi Listrik PLTS dan Pengurangan Emisi Gas CO₂

Produksi listrik yang dihasilkan oleh PLTS juga dapat diambil dari dashboard monitoring PLTS, berikut tampilan dari dashboard monitoring untuk pengambilan data produksi listrik PLTS :



Gambar 203.11 Dashbord monitoring produksi listrik PLTS

Dari data produksi listrik oleh PLTS tersebut, dapat dikonversikan untuk menghitung pengurangan emisi gas CO₂ dengan nilai CO₂ factor sebesar 649 gram / kWh. Nilai CO₂ factor tersebut adalah hasil perhitungan dari ennexOS selaku teknologi provider dan developer portal monitoring tersebut.

System data	
System name	PT Barata Indonesia
Commissioning	03/10/2020
Description	
Currency	Indonesian rupiah (IDR)
Feed in tariff	
CO ₂ factor	649 g / kWh

Gambar 213.12 Nilai CO₂ Factor

3.6 Menghitung Kapasitas dan *Life Cycle* Baterai

3.6.1 Menghitung Kapasitas dan Energi Baterai

Pada penelitian ini menggunakan Baterai Lithium-ion LiFePO₄. Untuk menghitung kapasitas dan energi baterai diperlukan pemetaan terhadap beban mesin mesin yang digunakan untuk operasional. Untuk menghitung kapasitas baterai dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Kapasitas baterai (Ah)} = \frac{W}{V \text{ baterai}}$$

Dengan :

W = Kebutuhan Energi listrik (Watt hour)

V baterai = Beda Potensial Baterai (Volt)

Untuk menghitung energy baterai dapat menggunakan persamaan berikut :

$$\text{Energi Baterai} = \frac{DEC (kWh) - \text{Energi langsung PLTS (kWh)}}{\eta_{Bat} \times DOD_{MAX}}$$

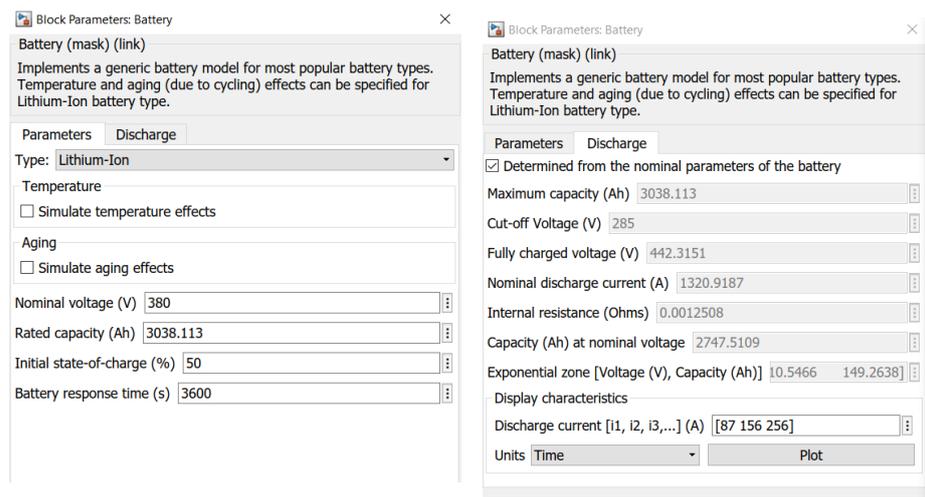
Dimana :

DEC = Daily Energy Consumption (kWh)

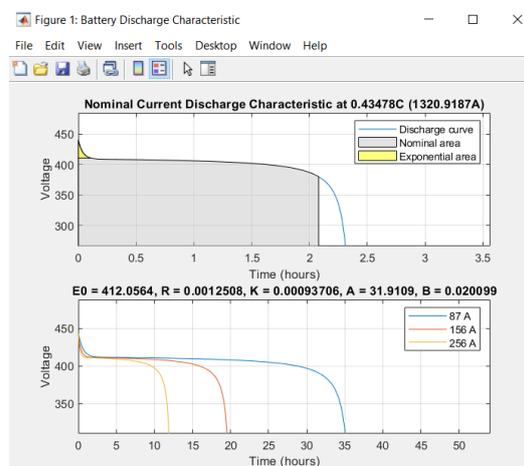
η_{Bat} = Efisiensi baterai (%)

DOD_{MAX} = Depth of Discharge (%)

Dari data yang sudah di dapatkan, menjadi input untuk model baterai lithium pada simulasi, dengan initial state of charge sebesar 50% dan baterai respon time 3600 detik atau satu jam, sebagai berikut :



Gambar 223.13 Input Block Parameter untuk simulasi Baterai Lithium-ion



Gambar 233.14 Karakteristik Discharge Baterai Lithium ion yang digunakan untuk simulasi

3.6.2 Menghitung *Life Cycle* Baterai

Dari gambar 2.6 dapat diketahui *Life Cycle* Baterai Lithium-ion LiFePO₄ dengan DOD 80% adalah sebesar 4000 cycle. Untuk menghitung *Life Cycle* dari DOD baterai tersebut, terlebih dahulu dilakukan simulasi untuk mengetahui SOC baterai saat digunakan. Sehingga kita dapat menghitung berapa energy baterai saat pengisian dan pengosongan sampai DOD yang ditentukan. Baterai akan mencapai 1 siklus jika total energi yang dilepaskan sudah mencapai nilai DOD nya. Sehingga umur baterai dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\text{Umur Baterai (hari)} = \frac{DOD_{cycle}}{E_{out}} \times LCoB$$

Dimana :

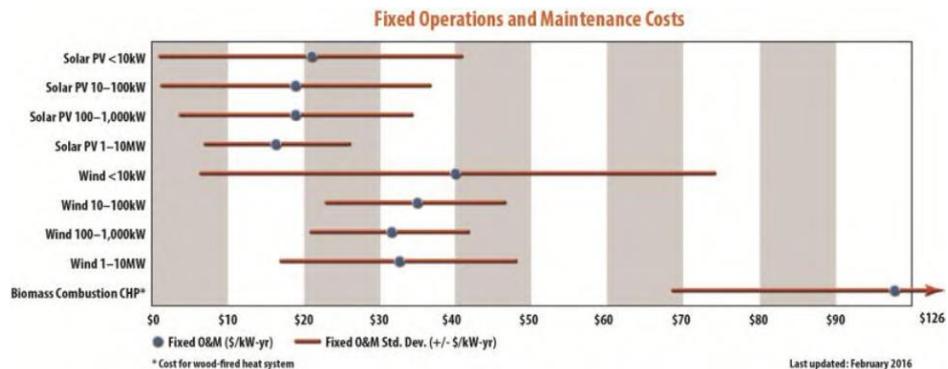
DODcycle : Depth of Discharge cycle baterai (%)

Eout : Energi pengosongan yang terjadi pada baterai (%)

LCoB : Life Cycle Baterai sesuai besarnya DOD (siklus)

3.7 Analisa kelayakan investasi Baterai

Pada penelitian ini, baterai yang digunakan adalah baterai Lithium-ion LiFePO₄. Dari harga penawaran baterai lithium ini didapatkan harga per kWh sebesar 162.5 USD atau sebesar 2.437.500 rupiah (1 USD = 15.000 IDR). Biaya operasional dan perbaikan (O&M) rata-rata untuk PLTS kapasitas 100 - 1000 kWp yaitu USD 20/kW-tahun. Jadi untuk PLTS dengan kapasitas 506 kWp adalah USD 10.000/kW-tahun sudah termasuk perawatan untun baterai. Hal ini didasarkan pada data yang dihimpun oleh National Renewable Energi Laboratory (NREL).



Gambar 243.15 Biaya Operasional dan Perbaikan (O&M)

Perhitungan untuk analisa kelayakan adalah sebagai berikut :

3.7.1 Net Present Value (NPV)

Untuk menghitung *Net Present Value (NPV)* dipergunakan rumus sebagai berikut :

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NFC_t}{(1+i)^t} - II$$

Dimana :

NFC_t : Net Cash Flow periode tahun ke - 1 sampai ke - n

II : Investasi awal (*initial investment*)

i : Tingkat diskon

n : Periode dalam tahun (umur investasi)

Kriteria pengambilan keputusan apakah usulan investasi layak diterima atau layak ditolak adalah sebagai berikut :

- Investasi dinilai layak, jika Net Present Value (NPV) bernilai positif (> 0).
- Investasi dinilai tidak layak, jika Net Present Value (NPV) bernilai negatif (< 0).

3.7.2 Internal Rate of Return (IRR)

Perhitungan IRR dapat dilakukan dengan rumus sebagai berikut :

$$0 = \sum_{t=0}^T \frac{X_t}{(1+IRR)^t}$$

Dimana :

X_t : *Cashflow* di tahun ke-t

IRR : *Rate of Return*

(Halaman sengaja dikosongkan)

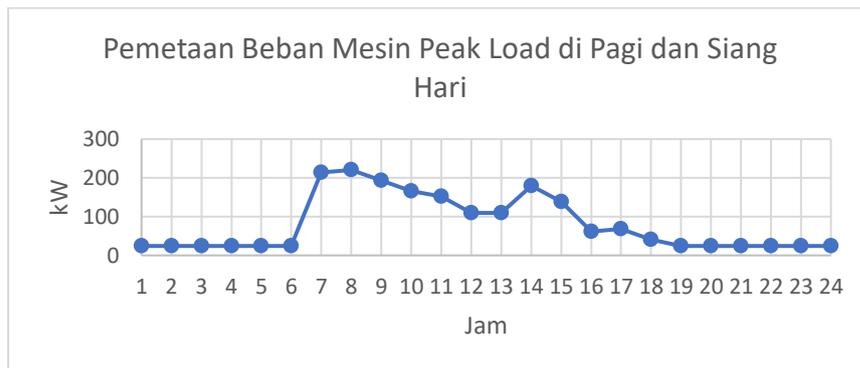
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemetaan Beban Listrik Workshop

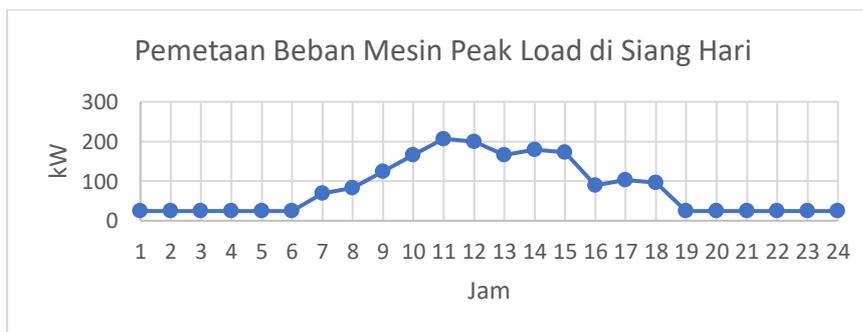
Pada tabel 3.1 diatas telah dijelaskan total daya yang dibutuhkan untuk produksi dengan kapasitas penuh selama satu hari yang berjalan dua shift adalah 6030.98 kWh. Untuk menghitung kebutuhan daya listrik workshop yang akan disupply juga oleh PLTS, dibutuhkan pemetaan beban mesin produksi selama satu hari, sehingga dapat diketahui kapan waktu terjadinya beban puncak produksi. Pada penelitian ini di ambil satu *case* dengan sampling mesin-mesin yang masih produktif yang terpasang pada bay 1 dan bay 2 selama 1 shift. Dan pada case ini dibagi menjadi 3 tipe pemetaan beban mesin untuk mendapatkan karakteristik penggunaan listrik workshop, yaitu :

- a. Pemetaan beban mesin dengan peak load di pagi dan siang hari
- b. Pemetaan beban mesin dengan peak load di siang hari
- c. Pemetaan beban mesin rata rata dari tipe 1 dan 2

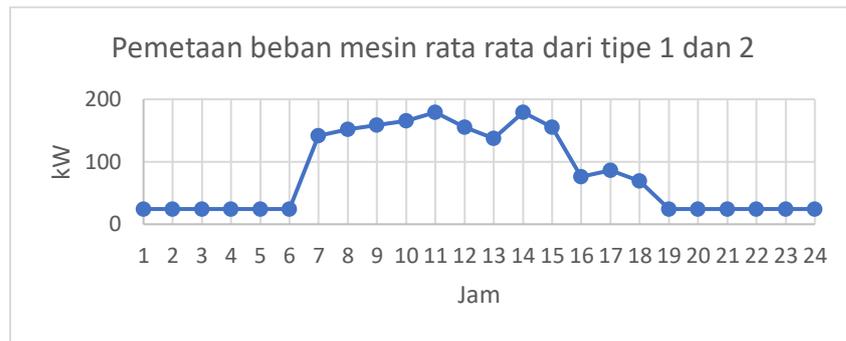
Berikut adalah grafik tiap tipe pemetaan beban listrik workshop:



(a)



(b)



(c)

Gambar 254.1

(a) Pemetaan beban mesin dengan peak load di pagi dan siang hari

(b) Pemetaan beban mesin dengan peak load di siang hari

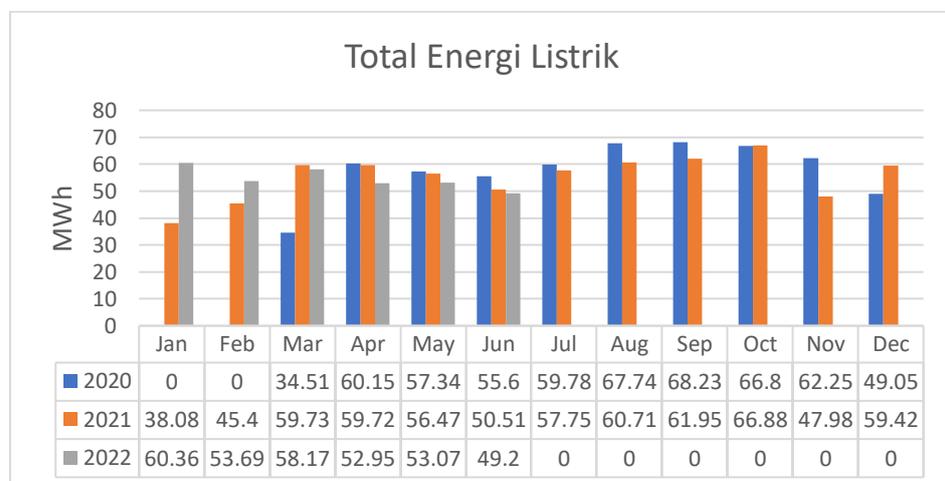
(c) Pemetaan beban mesin rata rata dari tipe 1 dan 2

Dari gambar diatas dapat diketahui tren kebutuhan total beban listrik dalam case mesin-mesin yang masih produktif yang terpasang pada bay 1 dan bay 2 selama 1 shift ditambah dengan penerangan dan lain-lain selama 24 jam sebesar 1945.409 kWh, dengan pemetaan berbeda untuk tiap tipenya.

4.2 Hasil Energi Listrik PLTS

4.2.1 Hasil Energi Listrik PLTS Aktual Monitoring

Data hasil energi listrik PLTS aktual perbulan dari bulan Maret 2020 hingga bulan juni 2021 adalah sebagai berikut :

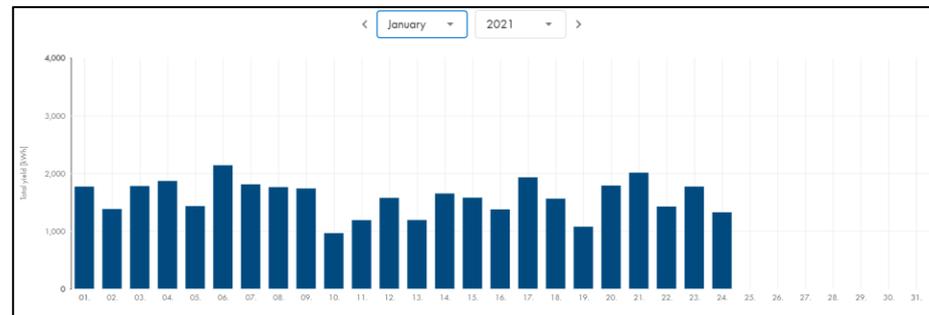


Gambar 4.2 Hasil Energi Listrik perbulan dari tahun 2020 sampai 2022

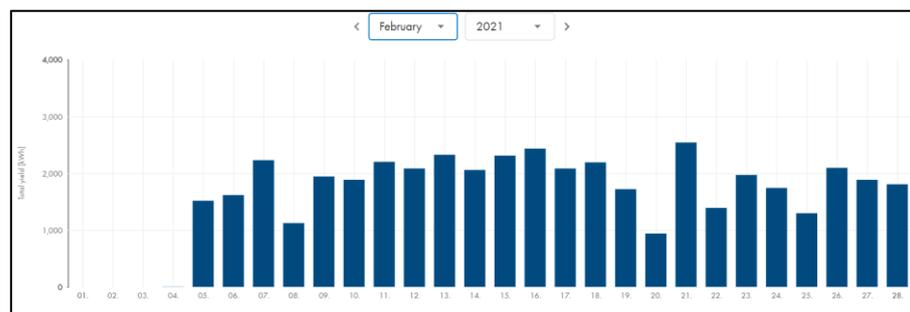
Total energi listrik yang dihasilkan pada bulan Maret 2020 tidak sebesar di tahun 2021 dan 2022 karena data energy listrik tidak tercatat penuh selama satu bulan. Begitu pula yang terjadi pada bulan Januari dan Februari 2021, dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



(a)



(b)



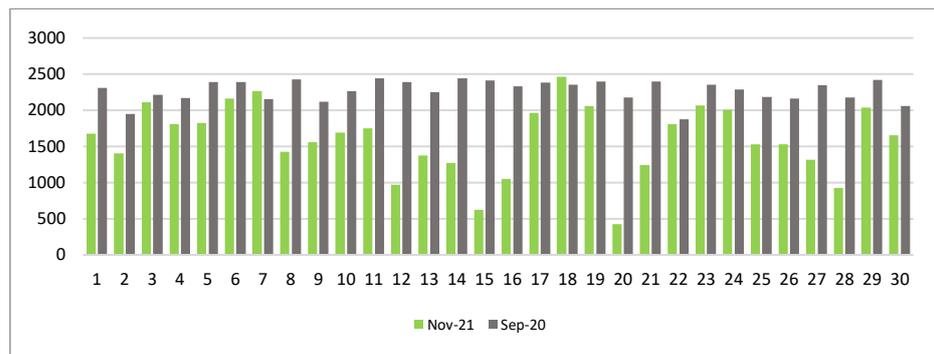
(c)

Gambar 4.3 (a) Hasil monitoring bulan Maret 2020 (b) Hasil monitoring bulan Januari 2021 (c) Hasil monitoring bulan Februari 2021

Dari gambar 4.2 dapat diketahui bahwa hasil energi listrik dari PLTS mulai tercatat pada monitoring pada bulan maret 2020. Energi Listrik

bangkitan tertinggi pada bulan September 2020 sebesar 66.802 MWh dan terendah pada bulan Nopember 2021 sebesar 47.797 MWh.

Dari monitoring juga didapatkan pada bulan September 2020, energi listrik yang dihasilkan paling tinggi adalah pada 14 September 2020 sebesar 2.441,93 kWh dan paling rendah pada 22 September 2020 sebesar 1.875,50 kWh. Pada bulan Nopember 2021, energi listrik yang dihasilkan paling tinggi adalah pada 18 Nopember 2021 sebesar 2.466,30 kWh dan paling rendah pada 20 Nopember 2021 425,24 kWh.



Gambar 426.4 Data Monitoring Energi Listrik PLTS September 2020 dan Nopember 2021

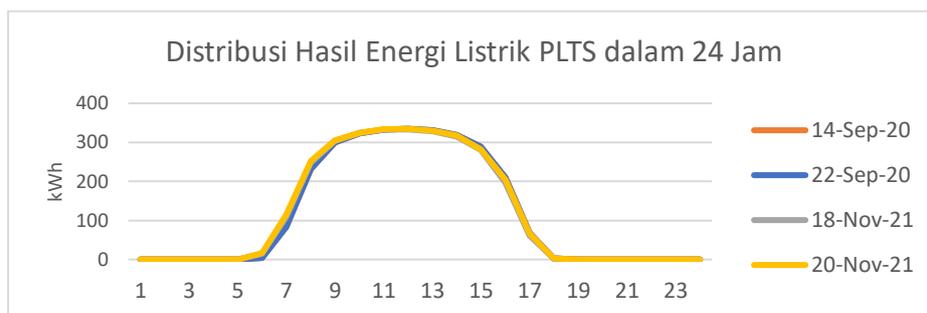
4.2.2 Hasil Simulasi Energi Listrik PLTS

Berdasarkan data monitoring aktual energi listrik PLTS, maka dapat diambil data iradiansi matahari pada tanggal 14, 22 September 2020 dan 18, 20 Nopember 2021, sebagai berikut :

Tabel 4.1 Data Iradiansi Matahari selama 24 Jam

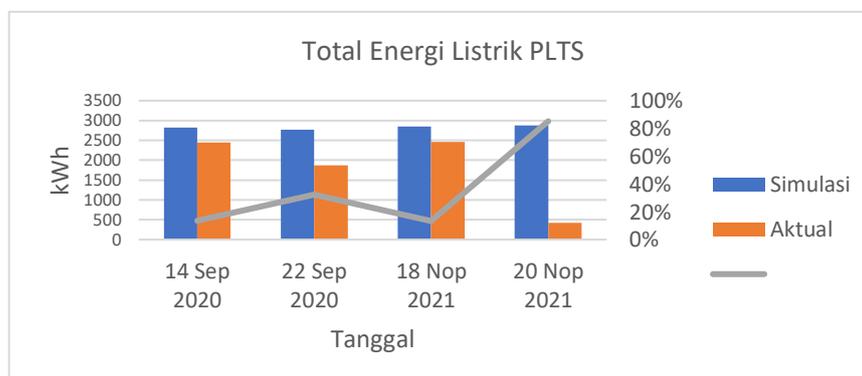
Tanggal	Jam																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
14-Sep-20	0	0	0	0	0	14.98	198.25	451.1	682.08	861.58	972.88	995.95	952.38	831.05	643.6	408.77	159.5	7.02	0	0	0	0	0	0
22-Sep-20	0	0	0	0	0	18.48	200.67	445.83	671.67	845.77	954.83	961.15	912.05	787.48	602.33	376.1	138.65	5.73	0	0	0	0	0	0
18-Nov-21	0	0	0	0	0	46.05	245.52	485.9	702.83	868.65	967.25	975.58	920.38	799.95	611.02	381.73	146.27	7.52	0	0	0	0	0	0
20-Nov-21	0	0	0	0	0	47.92	255.73	498.35	713.45	878.55	974.75	994.42	940.05	815.8	627.73	397.45	156.8	8.3	0	0	0	0	0	0

Dari data iradiansi matahari selama 24 jam pada tabel 4.1, dijadikan input pada simulasi model di Simulink untuk mendapatkan energy yang dapat dihasilkan oleh model PLTS pada Simulink, hasil simulasi adalah sebagai berikut :



Gambar 4.5 Energi Listrik PLTS hasil Simulasi selama 24 Jam

Dari simulasi PLTS menggunakan matlab, dapat diketahui total energy yang di hasilkan dalam 24 jam pada tanggal 14, 22 September 2020 dan 18, 20 Nopember 2021, sebagai berikut :



Gambar 4.6 Total Energi Listrik Hasil Simulasi vs Aktual

Tabel 4.2 Hasil Energi Listrik Listrik Hasil Simulasi vs Aktual

Tanggal	Total Energi Listrik (kWh)		Deviasi (%)
	Simulasi	Aktual	
14 Sep 2020	2828.78	2441.93	14%
22 Sep 2020	2776.45	1875.5	32%
18 Nop 2021	2847.88	2466.3	13%
20 Nop 2021	2883.51	425.24	85%
Total	11336.62	7208.97	36%

Dari tabel 4.2 dapat diketahui bahwa ada deviasi yang signifikan terjadi pada tanggal 20 Nopember 2021 hingga 85%, sehingga rata-rata deviasi antara hasil energi listrik PLTS aktual dan simulasi sebesar 36%. Dan rata-rata deviasi inilah yang akan dijadikan faktor koreksi untuk menentukan kapasitas baterai.

4.3 Operasional Workshop dengan PLTS On-grid Sistem

Daya PLN yang terpasang pada workshop sebesar 1.110.000 VA. Total pemakaian listrik actual perbulan berdasarkan dari tagihan listrik dari Januari 2021 hingga April 2022 dan contoh tagihan listrik PLN adalah sebagai berikut:

Tabel 4.2 Hasil Energi Listrik Hasil Simulasi vs Aktual

Total kWh	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Rata-Rata
2021	14,688	14,192	14,022	13,184	9,376	10,288	12,032	11,840	10,064	9,968	8,624	17,168	12,121
2022	15,952	18,336	12,304	9,120	-	-	-	-	-	-	-	-	13,928

Catatan Meter Import (PLN ke Pelanggan)	Tanggal	LWBP	WBP	TOTAL	KVARH
St Akhir	01-01-2022	224.300	83.850		261.740
St Awal	01-12-2021	218.060	80.120		256.160
Selisih Stand (st akhir - st awal) * FKM * FRT		9.984.000	5.968.000		8.928.000
Pemakaian kWh Total		9.984.000	5.968.000	15.952.000	8.928.000

I Penyerahan Listrik

1. Pendapatan Biaya Beban Rp 0

2. Pendapatan Biaya Pemakaian Rp 45,988,632

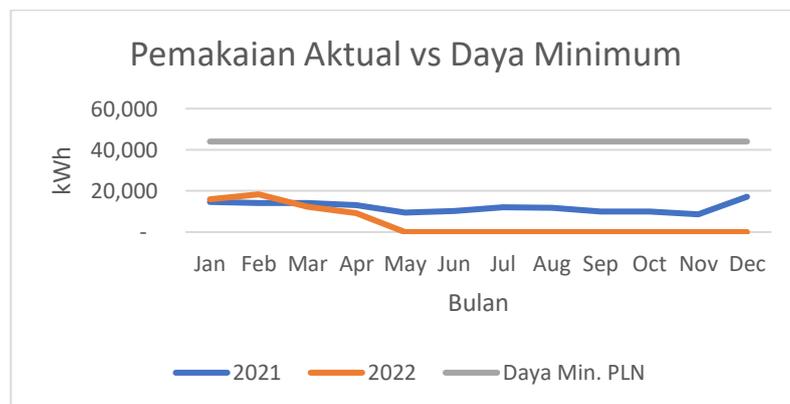
	LWBP			WBP			kVarh			TOTAL
	Pemk kWh	Biaya Pemk	Sub Total	Pemk kWh	Biaya Pemk	Sub Total	Kelbih kVarh	Biaya kVarh	Sub Total	
A	44,400	1,035,78	45,988,632	0	1,553,67	0	0	1,114,74	0	45,988,632
B										
C										
D										

Gambar 4.7 Total tagihan PLN Bulan Januari 2022

Dari gambar 4.7 dapat diketahui bahwa aktual pemakaian kWh total pada bulan berjalan sebesar 15.952 kWh, tetapi pada biaya listrik, pemakaian tercatat sebesar 44.400 kWh. Hal ini disebabkan karena pemakaian kWh total perbulan belum mencapai batas minimal standar sesuai jam nyala yang di tentukan PLN yaitu 40 jam. Perhitungan total kWh minimal adalah :

$$\text{Daya terpasang (VA)} \times \frac{40 \text{ (jam)}}{1000} = \text{daya minimal pemakaian (kWh)}$$

$$1.110.000 \text{ VA} \times \frac{40}{1000} = 44.400 \text{ kWh}$$



Gambar 4.8 Grafik pemakaian daya aktual perbulan terhadap daya minimum penagihan listrik PLN

Rata-rata pemakaian total kWh perbulan pada tabel 4.3 pada tahun 2022 sebesar 13.928 kWh, hal ini menunjukkan bahwa rata-rata pemakaian perbulan hanya memakan 31% dari batas minimum yaitu 44.400 kWh. Dan dari tabel 4.4 dibawah ini dapat diketahui kebutuhan daya PLN aktual saat ini adalah 575.30 kW atau 575.300 VA, masih memakai 52% dari total daya terpasang 1.110.000 VA.

Daya listrik PLN yang dibutuhkan sesuai dengan pemakaian saat ini terdapat pada tabel berikut :

Tabel 4.4 Load List Mesin Workshop

No	Nama Mesin	Daya Mesin (Watt)	Unit	Kebutuhan Daya PLN Full Load (kW)
1	CNC Laser Cutting 4000 W	4000	1	4.00
2	Dryer	822	1	0.82
3	CNC Bending Machine	30	1	0.03
4	Horizontal Boring Milling CNC	346	1	0.35
5	CNC Milling 3 -Axis	40	1	0.04
6	Lathe CNC Machine	304	1	0.30
7	Mesin Roll Davi	298280	1	298.28
8	Screw Air Compressor	132	1	0.13
9	Air Dryer + Air Separator Filter	16	1	0.02
10	Semi Gentry Crane 10 Ton	11000	1	11.00
11	Overhead Crane 25 Ton	23300	6	139.80
12	Drum Rotator with drive motor	3000	3	9.00
13	Mesin Las GTAW	4704	1	4.70
14	Mesin Las FCAW	13600	1	13.60
15	Plasma Cutting	17100	1	17.10
16	Mesin Las SMAW TIME ZX7-630	26220	1	26.22
17	Mesin Las SAW + Traktor minitrack	38000	1	38.00
18	Mesin Las SMAW CADWELD ARC 400	9956	1	9.96
19	Penerangan dan pompa	1950	1	1.95
Total				575.30

4.3.1 Export Energi Listrik PLTS

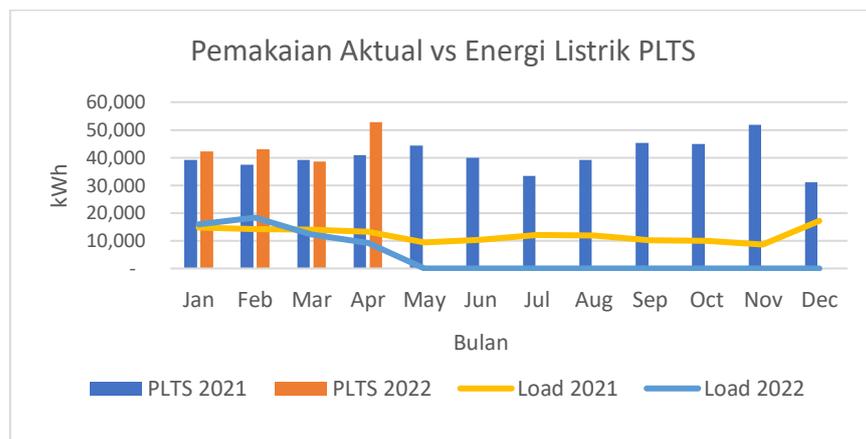
Energi listrik yang dihasilkan PLTS pada sistem on-grid, menjadi cadangan saldo listrik PLTS atap, dengan dihargai sebesar 65% dari total listrik saat luar waktu beban puncak yang dihasilkan oleh PLTS.

Rekening Bulan	: 01-2022
Tarif / Daya	: I3 / 1,110,000 VA
Tarif / Daya Lama	: / 0 VA
FKM kWh/kVarh/FRT	: 1,600 / 1,600 / 1
FKM kWh/kVarh/FRT LM	: 1,600 / 1,600 / 1
Jam Nyala / Fak K	: 40
Kapasitas Output	: 500.000 Wp
Inverter System PLTS	
Atap	

Catatan Meter Export (Pelanggan ke PLN)	Tanggal	LWBP	LWBP 65%	Offset
St Meter Akhir	01-01-2022	572,540		
St Awal	01-12-2021	546,100		
Selisih Stand (st akhir - st awal) * fkm * frt		42.304,000	27.498,000	9.984,000
Pemakaian kWh Total		42.304,000		

Gambar 4.9 Catatan Meter Export PLTS ke PLN

Dari gambar 4.5 dapat diketahui produksi listrik dari PLTS dengan kapasitas output selama satu bulan adalah sebesar 42.304 kWh, dan yang akan masuk ke saldo PLTS atap sebesar 27.498 kWh. Dan saldo ini akan mengalami penurunan dan penambahan sesuai dengan energi yang digunakan untuk produksi per bulannya.



Gambar 4.10 Pemakaian Listrik Aktual vs Energi Listrik PLTS

Dari gambar 4.10 dapat diketahui pemakaian rata-rata listrik perbulan sebesar 31% dari hasil pembangkitan listrik oleh PLTS.

4.3.2 Menghitung kebutuhan Daya Listrik yang terpasang

Dari 3 tipe pemetaan beban mesin produksi pada gambar 4.1, disimulasikan dengan pembangkitan energi listrik dari PLT untuk mendapatkan kebutuhan daya listrik optimal yang dibutuhkan untuk produksi. Energi listrik dari PLTS divariasikan saat keadaan terik, cerah

dan mendung untuk mengetahui karakteristik energy listrik PLTS dan hasil pembangkitan energi listrik PLTS. Hasil energi listrik PLTS saat matahari terik menghasilkan energi sebesar 2387.66 kW, saat cerah menghasilkan rata-rata 1430.69 kW dan saat paling mendung menghasilkan 441.28 kW. Dari hasil simulasi didapatkan data seperti tabel berikut :

Tabel 4.5 Kebutuhan Daya dan Export Listrik PLN

Tipe	Cuaca	Load (kW)	PLTS (kW)	Kebutuhan Daya PLN (kW)	Export Listrik ke PLN (kW)
1	Terik	1945.4	2387.66	140.35	987.40
	Cerah	1945.4	1430.69	199.19	254.78
	Mendung	1945.4	441.28	196.18	-773.68
2	Terik	1945.4	2387.66	82.87	794.48
	Cerah	1945.4	1430.69	96.41	61.86
	Mendung	1945.4	441.28	179.91	-966.60
3	Terik	1945.4	2387.66	68.00	890.94
	cerah	1945.4	1430.69	126.84	158.32
	mendung	1945.4	441.28	152.35	-870.14

Dari tabel 4.5 didapatkan kebutuhan daya listrik PLN terkecil saat matahari terik pada pemetaan tipe 3 sebesar 68 kW dan dapat menghasilkan export listrik ke PLN sebesar 890 kW. Kebutuhan daya listrik terbesar terpadat pada tipe pemetaan beban tipe 1 saat cerah sebesar 199.19 kW dan masih menghasilkan energi listrik untuk export ke PLN sebesar 254.78 kW. Pada kondisi mendung di tipe pemetaan bebab listrik 1 membutuhkan daya listrik sebesar 196.18 kW tetapi nilai export listrik negatif yang menandakan pada kondisi mendung tidak memungkinkan untuk PLTS mensuply listrik ke PLN, kondisi ini terjadi pada tiap tipe pemetaan beban mesin saat kondisi mendung.

Daya listrik optimal yang dibutuhkan adalah sebesar 199.19 kW yang merupakan kondisi paling banyak membutuhkan konsumsi listrik untuk operasional. Daya listrik PLN yang terpasang dapat diturunkan sampai 82% dari existing 1.1 MW menjadi 199.19 kW, sehingga biaya operasional juga akan berkurang sebesar 82% atau sesuai dengan pemakaian karena sudah tidak terkena biaya minimal dari PLN dan hasil export listrik ke PLN.

4.4 Operasional Workshop dengan PLTS Off-grid Sistem

4.4.1 Menghitung kapasitas dan energi baterai

Dalam case pada penelitian ini, yaitu menggunakan bay 1 dan bay 2 untuk produksi dalam waktu satu shift. Dari gambar 4.1 pemetaan load mesin, didapatkan total beban sebesar 1945.409 kWh. Sehingga kebutuhan energi baterai dapat dihitung untuk tipe 1, 2 dan 3, berikut merupakan perhitungan untuk ketiga tipe:

$$\text{Energi Baterai} = \frac{\text{DEC (kWh)} - \text{Energi langsung PLTS (kWh)}}{\eta_{\text{Bat}} \times \text{DOD}_{\text{MAX}}}$$

$$\text{Energi Baterai} = \frac{2772.76 \text{ kWh} - 1945.409 \text{ kWh}}{90\% \times 80\%}$$

$$\text{Energi Baterai} = 1149.0981 \text{ kWh}$$

Dengan memasukkan factor koreksi sebesar 36% dari hasil validasi simulasi dan actual, maka keperluan energy baterai adalah sebagai berikut :

$$\text{Energi Baterai (act)} = 1149.0981 \text{ kWh} + (1149.0981 \times 36\%) \text{ kWh}$$

$$\text{Energi Baterai (act)} = 1562.773 \text{ kWh}$$

Dan kapasitas baterai yang dibutuhkan dengan tegangan listrik 3 phase sebesar 380 Volt, adalah sebagai berikut :

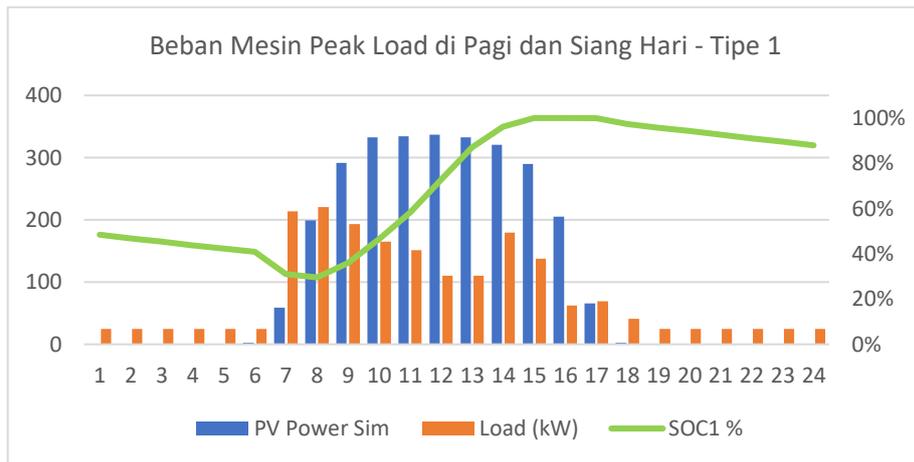
$$\text{Kapasitas baterai (Ah)} = \frac{W \text{ (watt hour)}}{V \text{ baterai}}$$

$$\text{Kapasitas baterai (Ah)} = \frac{1562773}{380}$$

$$\text{Kapasitas baterai} = 4112.561 \text{ Ah}$$

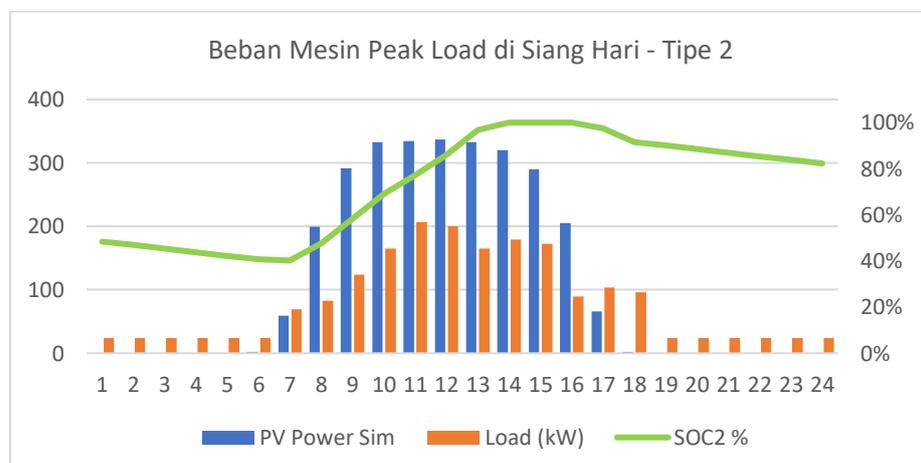
4.4.2 Hasil Simulasi Beban vs Energi Listrik PLTS dan SOC% Baterai

Dari hasil perhitungan energi baterai yang dibutuhkan sebesar 1562.773 kWh, dilakukan simulasi dengan melibatkan beban mesin untuk tiap tipe pemetaan dan supply energi listrik dari PLTS, sehingga mendapatkan tren SOC untuk baterai sebagai berikut:



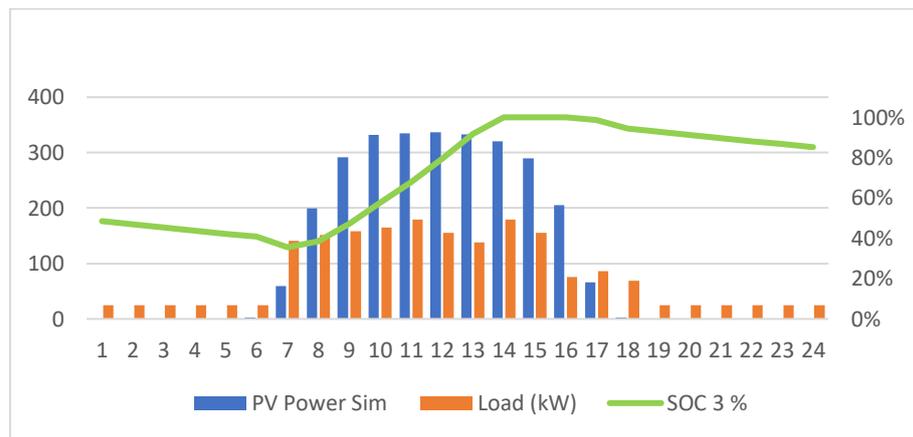
Gambar 4.11 Hasil Simulasi PLTS Off-Grid dengan Beban Mesin Tipe 3 Menggunakan Baterai

Simulasi dilakukan 1 cycle selama 24 jam, pada Load **Tipe 1** dimulai dari pukul 01.00 hingga 24.00. Dari hasil simulasi dengan *initial state of charge* 50%, mengalami penurunan karena konsumsi listrik pada malam hari dan belum ada supply listrik dari PLTS. Pada pukul 07.00 walaupun sudah mendapatkan supply listrik dari PLTS, energi baterai mengalami penurunan yang cukup signifikan hampir menyentuh 30% karena beban yang di butuhkan untuk operasional lebih besar dari pada supply energy dari PLTS. Baterai mulai mengalami pengisian setelah pukul 08.00 hingga mencapai 100% pada pukul 15.00 dan bertahan hingga pukul 17.00. Kemudian berkurang kembali setelah lewat jam 18.00 sampai pada pukul 24.00 energi baterai tersisa hampir mendekati 90%.



Gambar 4.12 Hasil Simulasi PLTS Off-Grid dengan Beban Mesin Tipe 3 Menggunakan Baterai

Load **Tipe 2** dari pukul 01.00 hingga pukul 07.00 energi baterai tidak mengalami penurunan yang signifikan. Dari 40% energi, mengalami pengisian dan terus naik hingga mencapai 100% pada pukul 14.00 hingga pukul 17.00. Pada Case Tipe 2 ini, kondisi baterai 100% lebih lama durasinya dibandingkan dengan Tipe 1. Kemudian berkurang kembali karena kebutuhan listrik untuk load lebih tinggi dari pada hasil dari PLTS, sampai pada pukul 24.00 energi baterai tersisa 80%. Sisa energy baterai pada Tipe 2 lebih kecil 10% dari Tipe 1.



Gambar 4.13 Hasil Simulasi PLTS Off-Grid dengan Beban Mesin Tipe 3 Menggunakan Baterai

Pada Load **Tipe 3** mempunyai tren menyerupai Tipe 1, tetapi tidak terjadi peak load di pagi hari dan load yang digunakan untuk produksi paling tinggi tidak mencapai 200 kW. Sehingga tidak terjadi penurunan energy pada baterai yang signifikan. Energi baterai pada pukul 07.00 masih jauh diatas 30%. Mulai mengalami pengisian pukul 08.00 hingga mencapai 100% pada pukul 14.00 hingga pukul 17.00. Kemudian berkurang kembali setelah sampai pada pukul 24.00 energi baterai tersisa 85% karena pada jam 17.00 load mesin tidak sebesar pada Tipe 2.

4.5 Analisa Perhitungan *Life cycle* Baterai Lithium

Dari hasil tren SOC % dan nilai DOD pada baterai 80% untuk ketiga tipe pemetaan beban PLTS Off-grid, akan mempengaruhi umur siklus baterai yang akan digunakan. Berikut perhitungan untuk umur baterai :

$$Umur\ Baterai\ (hari) = \frac{DOD_{cycle}}{E_{out}} \times LCoB$$

$$Umur\ Baterai\ (hari) = \frac{80\%}{32\%} \times 4000$$

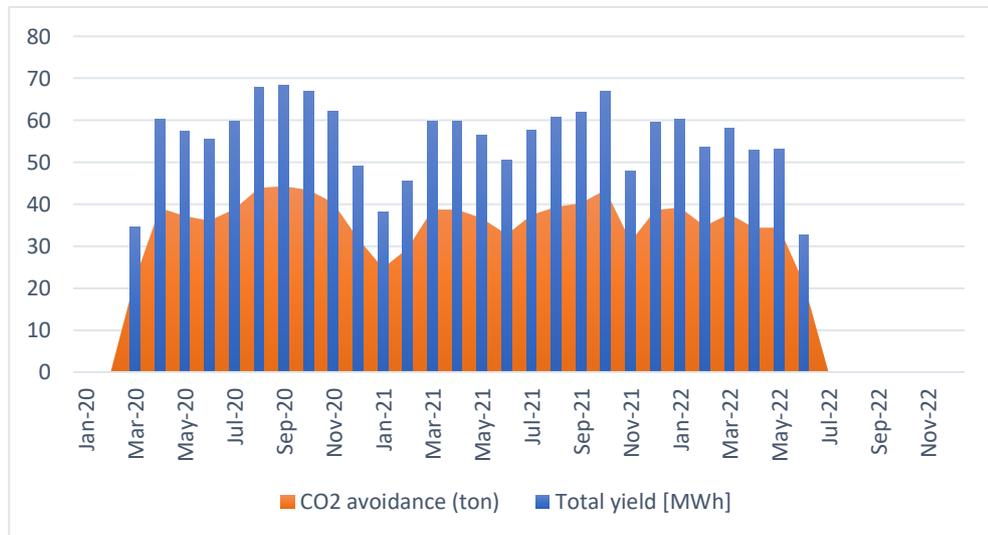
$$Umur\ Baterai = 9864.422\ hari = 27\ tahun$$

Dari perhitungan diatas, didapatkan umur baterai untuk tiap Tipe, untuk replacement baterai adalah 80% dari umur baterai tersebut, untuk menjaga permorma baterai.

Tabel 4.6 Umur Baterai dan waktu replacement baterai untuk case Tipe 1 2 3

Tipe	Eout (%)	Umur Baterai (tahun)	Baterai Replace(tahun)
1	32	27.0	21.6
2	28	31.8	25.5
3	29	29.9	23.9

4.6 Pengurangan Emisi Gas CO₂



Gambar 4.14 Pengurangan Emisi Gas CO₂ dari penggunaan PLTS

Dari bulan Maret 2020 hingga bulan Juni 2022, PLTS atap yang terpasang pada workshop sudah menghasilkan total energi listrik sebesar 1556.946 MWh. Energi listrik ini dapat di konversikan sebagai pengurangan emisi gas CO₂ dengan nilai CO₂ faktor sebesar 649 gr/kWh, sesuai dengan tabel berikut :

Tabel 4.7 Perhitungan pengurangan emisi gas CO₂

Bulan	2020		2021		2022	
	Total yield [MWh]	CO2 avoidance (ton)	Total yield [MWh]	CO2 avoidance (ton)	Total yield [MWh]	CO2 avoidance (ton)
Jan	0	0	38.079	24.713271	60.358	39.172342
Feb	0	0	45.401	29.465249	53.694	34.847406
Mar	34.512	22.398288	59.733	38.766717	58.169	37.751681
Apr	60.153	39.039297	59.718	38.756982	52.947	34.362603
May	57.341	37.214309	56.469	36.648381	53.065	34.439185
Jun	55.602	36.085698	50.514	32.783586	32.655	21.193095
Jul	59.775	38.793975	57.749	37.479101	0	0
Aug	67.744	43.965856	60.705	39.397545	0	0
Sep	68.23	44.28127	61.951	40.206199	0	0
Oct	66.802	43.354498	66.879	43.404471	0	0
Nov	62.253	40.402197	47.979	31.138371	0	0
Dec	49.047	31.831503	59.422	38.564878	0	0
Total	581.459	377.366891	664.599	431.324751	310.888	201.766312
Grand Total MWh						1556.946
Grand Total Ton CO2						1010.458

Dari tabel diatas dapat diketahui bahwa PLTS atap yang terpasang di workshop dengan kapasitas 506 kWp dapat menghasilkan pengurangan emisi gas CO₂ sebanyak 1010.458 ton carbon dalam 2 tahun.

4.7 Analisa kelayakan investasi PLTS Off-grid sistem dengan menggunakan baterai

Analisis kelayakan investasi untuk 3 tipe pemetaan beban mesin, dilakukan selama masa investasi dalam 30 tahun, karena berdasarkan umur baterai yang lebih dari 25 tahun. Dengan nilai investasi awal sebesar 3.804.689.126 rupiah untuk Baterai Lithium (LiFePO₄) dengan kapasitas 1562.7 kWh, beserta *battery management systemnya* (BMS). Dan untuk biaya operasional dan maintenance sebesar 148.900.000 rupiah pertahun. Tiap tahunnya PLTS dapat menghasilkan listrik rata-rata 695.171 MWh, dengan tarif per kWh LWBP saat ini adalah 1035.78 rupiah. Sehingga pertahunnya PLTS dapat menghasilkan profit dari pembangkitan listrik sebesar 720.044.218 rupiah. Hasil dari Analisa kelayakan investasi baterai untuk ketiga tipe berdasarkan pemetaan beban adalah sebagai berikut :

URAIAN	0	1	2	5	6	21	30	
CASH INFLOW											
Profit		720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	
Total Cash In		720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	
CASH OUTFLOW											
Investasi		3,804,689,126							3,804,689,126		
O&M Cost		148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	
Total Cash Out		3,953,589,126	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	3,953,589,126	148,900,000	148,900,000	
NET CASH FLOW		- 3,233,544,908	571,144,218	571,144,218	571,144,218	571,144,218	571,144,218	- 3,233,544,908	571,144,218	571,144,218	
CUMMULATIVE		- 3,233,544,908	- 2,662,400,690	- 2,091,256,471	- 1,520,112,253	- 377,823,816	193,320,402	8,189,339,460	4,955,794,552	5,720,259,172	6,291,403,391
NPV	1,223,854,633.179										
IRR	16.35%										
Payback Period	6	Tahun									
Feasibility	OK										

Gambar 4.15 Analisa kelayakan investasi baterai – Tipe 1

Dari gambar 4.14 diatas, menunjukkan bahwa investasi ini feasible untuk dilakukan. Nilai NPV > 0 artinya selama proyek investasi berlangsung, mengalami keuntungan. Selanjutnya nilai IRR 16.35% > 10%, kondisi ini menunjukkan investasi ini layak untuk dijalankan, nilai 10% (MARR) merupakan nilai tingkat diskon yang disepakati saat ini. Dan payback periode untuk investasi baterai ini adalah dalam jangka waktu 6 tahun.

URAIAN	0	1	2	...	5	...	25	...	30	
CASH INFLOW										
Profit		720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	
Total Cash In		720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	
CASH OUTFLOW										
Investasi		3,804,689,126						3,804,689,126		
O&M Cost		148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	
Total Cash Out		3,953,589,126	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	3,953,589,126	148,900,000	148,900,000	
NET CASH FLOW		- 3,233,544,908	571,144,218	571,144,218	571,144,218	571,144,218	- 3,233,544,908	571,144,218	571,144,218	
CUMMULATIVE		- 3,233,544,908	- 2,662,400,690	- 2,091,256,471	- 1,520,112,253	- 377,823,816	10,473,916,333	7,240,371,425	7,811,515,643	10,096,092,517
NPV	1,635,841,096.618									
IRR	17.12%									
Payback Period	6	Tahun								
Feasibility	OK									

Gambar 4.16 Analisa kelayakan investasi baterai – Tipe 2

Dari gambar 4.15 diatas, menunjukkan bahwa investasi ini feasible untuk dilakukan. Nilai NPV > 0 artinya selama proyek investasi berlangsung, mengalami keuntungan. Nilai NPV Tipe – 2 lebih besar dari pada Tipe – 1. Selanjutnya nilai IRR 17.12% > 10%, IRR pada Tipe -2 lebih tinggi dari pada IRR Tipe - 1. Karena umur baterai dan waktu penggantian baterai pada Tipe – 2 lebih lama daripada Tipe - 1. Dan payback periode untuk investasi baterai ini adalah dalam jangka waktu 6 tahun. sama dengan Tipe – 1.

URAIAN	0	1	2	...	5	...	23	...	30
CASH INFLOW									
Profit		720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38	720,044,218.38
Total Cash In		720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218	720,044,218
CASH OUTFLOW									
Investasi	3,809,260,239						3,809,260,239		
O&M Cost	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000
Total Cash Out	3,958,160,239	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	148,900,000	3,958,160,239	148,900,000	148,900,000
NET CASH FLOW	- 3,238,116,020	571,144,218	571,144,218	571,144,218	571,144,218	571,144,218	- 3,238,116,020	571,144,218	571,144,218
CUMMULATIVE	- 3,238,116,020	- 2,666,971,802	- 2,095,827,584	- 1,524,683,365	- 382,394,928	9,327,056,784	6,088,940,764	9,515,806,074	10,086,950,292
NPV	1,564,182,280.593								
IRR	16.93%								
Payback Period	6	Tahun							
Feasibility	OK								

Gambar 4.17 Analisa kelayakan investasi baterai – Tipe 3

Dari gambar 4.16 diatas, menunjukkan bahwa investasi ini *feasible* untuk dilakukan. Nilai NPV > 0 artinya selama proyek investasi berlangsung, mengalami keuntungan. Nilai NPV Tipe 3 lebih rendah dari pada nilai NPV Tipe - 2 tetapi lebih tinggi dari Tipe - 1 .Selanjutnya nilai IRR 16.93% > 10%, kondisi ini menunjukkan investasi ini layak untuk dijalankan, nilai IRR Tipe – 3 masih dibawah nilai IRR Tipe – 2 tetapi masih lebih besar dari Tipe 1 nilai 10% (MARR) merupakan nilai tingkat diskon yang disepakati saat ini. Dan payback periode untuk investasi baterai ini adalah dalam jangka waktu 6 tahun.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Kebutuhan terpasang pada Workshop aktual untuk operasional saat ini adalah sebesar 575.300 VA, masih memakai 52% dari total daya terpasang 1.110.000 VA. Sehingga jika daya PLN terpasang pada workshop diturunkan sebesar 82% dari daya pasang awal, maka biaya operasional listrik perbulan pun akan dapat berkurang sebesar 82% atau dapat menyesuaikan dengan pemakaian listrik dan hasil export listrik ke PLN
2. PLTS atap yang terpasang dengan kapasitas 506 kWp dapat memproduksi listrik dengan rata-rata satu bulan sebesar 42.304 kWh. Dan hanya 65% dari produksi listrik tersebut yang tercatat akan masuk untuk ekspor saldo listrik ke PLN. Pemakaian Listrik perbulan untuk operasional jika dibandingkan dengan energi pembangkitan listrik oleh PLTS rata-rata hanya memakai 31%.
3. Hasil dari monitoring produksi listrik PLTS aktual dan hasil simulasi data iradiansi matahari dengan modeling di Matlab untuk mendapatkan power hasil simulasi, bermanfaat untuk dapat dijadikan validasi sehingga mendapatkan faktor koreksi sebesar 36% untuk perhitungan kapasitas baterai yang dibutuhkan untuk off-grid system.
4. Pada penelitian ini ambil satu case dengan sampling mesin-mesin yang masih produktif yang terpasang pada bay 1 dan bay 2 selama 1 shift yaitu. Total daya yang dibutuhkan pada case ini adalah sebesar sebesar 1945.409 kWh, Dan pada case ini dibagi menjadi 3 tipe pemetaan beban mesin untuk mendapatkan karakteristik penggunaan listrik workshop, yaitu Pemetaan beban mesin dengan peak load di pagi dan siang hari, Pemetaan beban mesin dengan peak load di siang hari dan Pemetaan beban mesin rata rata dari tipe 1 dan 2. Dari ketiga tipe tersebut setelah dilakukan simulasi, didapatkan tren SOC yang berbeda untuk tiap tipenya, tren SOC ini dapat berpengaruh pada umur baterai yang akan digunakan.

5. Dari hasil simulasi dan perhitungan untuk case pada penelitian ini, dapat diketahui untuk PLTS Off-Grid system membutuhkan Energi baterai sebesar 1562.773 kWh, dengan nilai efisiensi baterai 90% dan DOD 80%. Sehingga spesifikasi baterai yang dibutuhkan adalah 380 V 4120 Ah.
6. Dari hasil monitoring juga dapat diketahui bahwa dari bulan Maret 2020 hingga Juni 2022, PLTS atap yang terpasang dapat menghasilkan pengurangan emisi gas CO₂ sebanyak 1010.458 Ton CO₂.
7. Dan hasil kajian investasi baterai untuk Off-Grid sistem selama 30 tahun dapat dikatakan layak karena mempunyai nilai NPV > 0, nilai IRR > 10% dan payback periode untuk investasi tersebut selama hanya 6 tahun dibandingkan dengan umur baterai yang dapat mencapai lebih dari 25 tahun. Dari ketiga tipe pembebanan yang dipetakan perhari, dapat disimpulkan bahwa Tipe – 2 dapat menghasilkan umur baterai yang lebih lama dari pada Tipe 1 dan 3, nilai NPV sebesar 1,6 Milyar dengan IRR 17.12%. Hal ini dipengaruhi oleh karakteristik SOC yang dihasilkan dari pemetaan beban yang tidak terdapat lonjakan beban yang signifikan dan besarnya DOD yang di tentukan untuk perhitungan baterai. Sehingga sangat memungkinkan untuk dilakukan operasional workshop dengan konsep 100% EBT.

5.2 Saran

1. Dapat dilakukan penelitian lebih lanjut untuk umur baterai jika konsep 100% pembangkitan dari EBT akan direalisasikan pada pabrik-pabrik manufaktur.
2. Skema pada penelitian ini dapat dijadikan acuan jika akan dilakukan ekspansi kapasitas workshop
3. Karakteristik dari ketiga tipe pemetaan beban mesin pada penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk scheduling jam orang dan jam mesin pada proses produksi sehingga dapat menghindari terjadinya lonjakan load yang ekstrim.

4. Penelitian lebih lanjut juga dapat dilakukan untuk mengamati karakteristik SOC baterai dalam waktu yang lebih besar dari 24 jam, karena pada penelitian ini simulasi hanya terbatas dalam waktu 24 jam.
5. Untuk analisa investasi akan semakin real seiring banyaknya data yang dapat diolah diperhitungan tersebut.

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, (2021), “*Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN (Persero) 2021-2030*”, Jakarta, Indonesia.
- [2] Asian Development Bank, (2018), “*Handbook Battery Energy Storage System*”, Mandaluyong City, 1550 Metro Manila, Philippines, ISBN 978-92-9261-470-6 (print), 978-92-9261-471-3 (electronic), DOI: <http://dx.doi.org/10.22617/TCS189791-2>
- [3] Enrico Dallago, Alessandro Liberale, Davide Miotti, and Giuseppe Venchi, "Direct MPPT algorithm for PV sources with only voltage measurements," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 12, pp 6742-6750, December 2015.
- [4] Matthias Günther, Irina Ganalb, Stefan Bofingerb, (2018), “*A 100% Renewable Electricity Scenario for the Java-Bali Grid*”, *Int. Journal of Renewable Energy Development*, 7(1), 13-22. <https://doi.org/10.14710/ijred.7.1.13-22>
- [5] An, L.N., dan Tuan, T.Q., Dynamic Programming for Optimal Energy Management of Hybrid Wind–PV–Diesel–Battery. *Energies* 2018, 11, 3039; doi:10.3390/en11113039
- [6] Mr. S. Sheik Mohammed, Dr. D. Devaraj, (2014), “*Simulation and Analysis of Stand-alone Photovoltaic System with Boost Converter using MATLAB/Simulink*”, International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies [ICCPCT]
- [7] Koonten, G.C., Withey, P. dan Duan, J., (2020), “How big a battery?”, *Renewable Energy*, Vol. 146, hal. 196-204
- [8] Håvard Breisnes Vika, Ole-Morten Midtgård, Iromi Ranaweera, (2014), “*Modelling of Photovoltaic Modules with Battery Energy Storage in*

Simulink/Matlab”, Norwegian University of Science and Technology, Department of Electric Power Engineering

- [9] Sari, D., M. Rizki, B. Nathania, M. Ahmad, P.G. Gan, N. Noor. 2021. “Indonesia Zero Emissions Application (EMISI): Methodology for Calculating Individual Emissions from Food, Clothing, Electricity Consumption, and Solid Waste” Technical Note. Jakarta, Indonesia:World Resources Institute. <https://doi.org/10.46830/writn.20.00095>.
- [10] Du, C.-Q., Shao, J.-B., Wu, D.-M.; Ren, Z., Wu, Z.-Y., Ren, W.-Q. “Research on Co-Estimation Algorithm of SOC and SOH for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles”. *Electronics* 2022, 11, 181. <https://doi.org/10.3390/electronics11020181>
- [11] Direktorat Jendral Ketenagalistrikan Kementrian ESDM Republik Indonesia, (2018), “Pedoman Penghitungan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca (Bidang Energi – Sub Bidang Ketenagalistrikan)”, Jakarta, Indonesia
- [12] Mohamad Izdin Hlal, Vigna K. Ramachandaramurthy, Ameen Sarhan, Aref Pouryekta, Umashankar Subramaniam. “Optimum battery depth of discharge for off-grid solar PV/battery system”, *Journal of Energy Storage*, <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100999>
- [13] Brinsmead, T.S., Graham, P., Hayward, J., Ratnam, E.L., and Reedman, L. (2015). “Future Energy Storage Trends: An Assessment of the Economic Viability, Potential Uptake and Impacts of Electrical Energy Storage on the NEM 2015–2035”. CSIRO, Australia. Report No. EP155039.
- [14] Ali Ghasemi Siani, Mehdi Mousavi Badjani, Hadi Rismani & Mojtaba Saeedimoghadam. “State of Health Estimation of Lithium-Ion Batteries based on the CC-CV Charging Curve and Neural Network”, *IETE Journal of Research*, <https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1908853>

- [15] Meysam Qadrdan, Nick Jenkins & Jianzhong Wu, “Smart Grid and Energy Storage”, Cardiff University, Cardiff, United Kingdom, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809921-6.00025-2>
- [16] Wenzl, H. (2009). “BATTERIES AND FUEL CELLS | Lifetime.”, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources 552–558. doi:10.1016/b978-044452745-5.00048-4

(Halaman sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap **Abdillah Hadi Alif Ilhami** dilahirkan di Surabaya, 5 Desember 1993. Penulis merupakan anak pertama dari Drs. Effendi Zaini dan Dra. Pudji Triati Yuliah, memiliki adik bernama Muhammad Izzat Farisi. Istri penulis bernama Lalitya Syifalia dan alhamdulillah pada saat proses studi program master ini berlangsung, penulis dikarunahi seorang anak laki-laki bernama Alfath Zafranu Hadisfa. Pendidikan formal penulis dimulai di TK Trisula Sidoarjo (tahun 1999 – 2000). Pendidikan dasar di SD Muhammadiyah 1 Sidoarjo (tahun 2000 – 2006). Lalu pendidikan menengah di SMPN 1 Sidoarjo (tahun 2006 – 2009). Kemudian melanjutkan pendidikan di SMAN 1 Sidoarjo (tahun 2009 sampai 2012). Setelah itu penulis melanjutkan pendidikan Sarjana, jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2012 sampai 2016 dan tergabung di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) dan ITS Team Sapuangin. Pengalaman kerja penulis dimulai awal tahun 2016 di PT. Scandinavian Tobacco Group. Setelah wisuda sarjana, penulis mendapatkan kesempatan bekerja di PT. Astra Internasional Tbk. – Honda hingga tahun 2018, lalu beralih ke PT. Barata Indonesia (persero) sembari melanjutkan pendidikan Magister jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di tahun 2020 sampai 2022.

Dengan diterbitkannya buku tesis ini, penulis berharap akan dapat memberikan sumbangsih ilmu pengetahuan melalui media penelitian yang telah dilakukan. Info lebih lanjut terkait penelitian ini dapat menghubungi penulis melalui email alifilhami.me@gmail.com.