



TUGAS AKHIR - TF 181801

DESAIN SISTEM *MICROGRID* BERBASIS TEKNO-EKONOMI UNTUK PEMENUHAN KEBUTUHAN BEBAN LISTRIK DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA

NUR KHASANA
NRP. 02311745000030

Dosen Pembimbing :
Dr. Suyanto, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - TF 181801

***DESIGN OF MICROGRID SYSTEM BASED ON
TECHNO-ECONOMY FOR FULFILLING
ELECTRICAL LOADS OF PHYSICS
ENGINEERING DEPARTEMENT***

NUR KHASANA
NRP. 02311745000030

Supervisor :
Dr. Suyanto, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Nur Khasana
NRP : 02311745000030
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Desain Sistem *Microgrid* Berbasis Tekno-Ekonomi untuk Pemenuhan Kebutuhan Beban Listrik Departemen Teknik Fisika” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 02 Juni 2019

Yang membuat pernyataan,



Nur Khasana

NRP. 02311745000030

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**DESAIN SISTEM *MICROGRID*
BERBASIS TEKNO-EKONOMI
UNTUK PEMENUHAN KEBUTUHAN LISTRIK
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA**

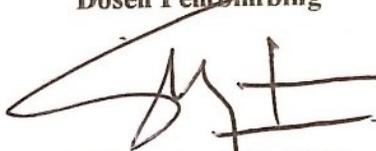
Oleh:

Nur Khasana

NRP. 02311745000030

Surabaya, 12 Juli 2019

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing**



Dr. Suyanto, S.T., M.T

NIP. 19711113 199512 1 002



**Menyetujui,
Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS**

Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.

NIP. 19780902 200312 1 002

**DESAIN SISTEM MICROGRID BERBASIS TEKNO-
EKONOMI UNTUK PEMENUHAN KEBUTUHAN
BEBAN LISTRIK DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh:

NUR KHASANA
NRP. 02311745000030

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Suyanto, S.T., M.T.



..... (Pembimbing)

2. Ir. Sarwono, M.M.



..... (Ketua Penguji)

3. Erna Septyaningrum, S.T., M.T.



..... (Penguji)

**SURABAYA
JULI 2019**

DESAIN SISTEM MICROGRID BERBASIS TEKNO EKONOMI UNTUK PEMENUHAN KEBUTUHAN BEBAN LISTRIK DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA

Nama : Nur Khasana
NRP : 02311745000030
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Suyanto, S.T., M.T

Abstrak

Pemenuhan energi khususnya pemenuhan kebutuhan listrik saat ini masih tergantung terhadap energi fosil yang semakin menipis. Sumber energi terbarukan dapat menjadi solusi akan masalah tersebut salah satunya adalah Energi matahari. Energi matahari tersebut dapat dimanfaatkan sebagai PLTS untuk dapat memenuhi kebutuhan Departemen Teknik Fisika yang dapat bekerja dalam *microgrid*. Diperlukan analisis terhadap pengadaan PLTS di Departemen Teknik Fisika dari segi ekonomi untuk mengetahui ke-efektifan dan ke-ekonomisan PLTS tersebut, maka pada Tugas Akhir ini dilakukan desain variasi sistem microgrid dalam kondisi 100% PLN, 100% PV (PV-baterai), dan Hybrid PV-PLN dengan beberapa persentase. Diperoleh microgrid yang dapat diaplikasikan di Departemen Teknik Fisika adalah Hybrid 60% PV- 40% PLN yang terdiri dari PV dengan kapasitas 150 kWp, grid, dan inverter sistem dapat menghemat Rp.610.762.900 dibandingkan dengan kondisi sekarang yang menggunakan PLN saja. Sistem dapat dibangun dengan menggunakan 750 *photovoltaic* yang dapat dibagi menjadi 50 string dan setiap string terdiri dari 15 *photovoltaic* yang dihubungkan dengan inverter (4kW). Biaya investasi awal untuk membangun sistem tersebut sebesar Rp.3.096.975.863, *payback period* yang dibutuhkan sistem adalah 18 tahun. Nilai IRR (8,4%) > *discount rate* (8%), maka sistem layak untuk dilaksanakan. Namun apabila *discount rate* 11% maka sistem tidak layak diadakan karena $IRR < discount\ rate$.

Kata Kunci: HOMER, Microgrid, PLTS, Economic Feasibility

**DESIGN OF MICROGRID SYSTEM BASED ON
TECHNO-ECONOMY FOR FULFILLING ELECTRICAL
LOADS OF PHYSICS ENGINEERING DEPARTEMENT**

Name : Nur khasana
NRP : 02311745000030
Department : *Engineering Physics FTI-ITS*
Supervisor : Dr. Suyanto, S.T., M.T

Abstract

Fulfillment of energy, especially the fulfillment of electricity needs, is still dependent on fossil energy which is running low. Renewable energy sources can be a solution to this problem, one of which is solar energy. The solar energy can be used as a solar power plant to meet the needs of the Engineering Physics Department that can work in a microgrid. An analysis of the procurement of solar power plants in the Department of Physics Engineering is needed in terms of economics to determine the effectiveness and economics of the PLTS, so in this Final Project a variation of the microgrid system is carried out in 100% PLN, 100% PV (PV-battery), and Hybrid PV-PLN with several percentages. The microgrid obtained which can be applied in the Physics Engineering Department is Hybrid 60% PV-40% PLN which consists of PV with a capacity of 150 kWp, grid, and inverter systems that can save Rp.610,762,900 compared to the current conditions using PLN alone. The system can be built using 750 photovoltaics which can be divided into 50 strings and each string consists of 15 photovoltaics connected to an inverter (4 kW). The initial investment cost for building the system is Rp.3.096.975.863, the payback period required by the system is 18 years. IRR value (8.4%) > discount rate (8%), then the system is feasible to be implemented. But if the discount rate is 11% then the system is not feasible because of the IRR < discount rate.

Keywords: HOMER, Microgrid, PLTS, Economic Feasibility

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“Desain Sistem *Microgrid* Berbasis Tekno Ekonomi untuk Pemenuhan Kebutuhan Beban Listrik Departemen Teknik Fisika”**. Tugas akhir ini membahas mengenai desain sistem *microgrid* yang terdiri dari energi terbarukan dan non energi yang ditinjau dari segi tekno-ekonomi untuk mengurangi ketergantungan pada energi non terbarukan.

Selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir ini, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah meridhoi dan memberi kelancaran dalam pelaksanaan dan penyusunan
2. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si, Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Fisika FTI ITS.
3. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan banyak ilmu selama penulis menyelesaikan tugas akhir.
4. Bapak Gunawan Nugroho S.T., M.T., Ph.D. selaku kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan.
5. Ibu Dyah Sawitri S.T., M.T., selaku dosen wali yang telah memberikan pengalaman hidup dan bimbingan selama penulis berkuliah di Teknik Fisika ITS.
6. Kedua orang tua, Bapak Marsup dan Ibu Supini serta kakak kandung yang memberikan dukungan dan doa kepada penulis selama menjalani perkuliahan.
7. Seluruh dosen dan karyawan Teknik Fisika ITS yang telah turut membantu penulis menyelesaikan kuliah.
8. Teman-teman Lintas Jalur Teknik Fisika angkatan 2017 yang telah bersama-sama melalui 2 tahun masa perkuliahan baik dalam suka maupun duka
9. Tasya, Esti, Mbak Ayu dan Mia yang telah menemani penulis selama hidup 2 tahun di kos Keputih.

10. Mbak Zakiyatul Jibillah / kiki yang telah menemani dan mendengarkan keluh kesah dalam pengerjaan tugas akhir.
11. Kepada semua pihak yang telah terlibat dalam kehidupan penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis menyadari bahwa penulisan laporan tugas akhir ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak. Penulis berharap semoga laporan ini dapat bermanfaat dan menambah wawasan bagi pembaca.

Surabaya, 2 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
<i>TITLE PAGE</i>	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN 1	vii
LEMBAR PENGESAHAN 2.....	ix
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
DAFTAR ISTILAH	xxv
DAFTAR SIMBOL.....	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Laporan	5
BAB II DASAR TEORI.....	7
2.1 Sistem <i>Microgrid</i>	7
2.1.1 <i>Grid-Connected (on grid)</i>	8
2.1.2 <i>Islanded (off grid)</i>	8
2.2 Sumber Energi.....	8
2.2.1 Sumber energi tak terbarukan.....	8
2.2.2 Sumber energi terbarukan.....	9
2.3 Komponen Pembangkit Listrik.....	11
2.3.1 Photovoltaic.....	11
2.4 Komponen Sistem Penyimpan	15
2.5 Inverter	18
2.5.1 Inverter Tersentral (<i>Centralized Inverter</i>)	18
2.5.2 String Inverter.....	19
2.5.3 <i>Multi-String Inverter</i>	19
2.6 HOMER	20

2.6.1	Simulasi	22
2.6.2	Optimisasi.....	22
2.6.3	<i>Sensitivity Analysis</i>	22
2.7	Analisis Tekno-Ekonomi.....	24
2.7.1	NPC (Net Present Cost).....	24
2.7.2	<i>Initial Capital</i>	25
2.7.3	<i>COE (Cost of Energy)</i>	25
2.7.4	<i>Renewable Fraction</i>	25
2.7.5	<i>Salvage</i>	25
2.7.6	<i>Payback Period</i>	26
2.7.7	<i>Return on Investment</i>	26
2.7.8	<i>Internal Rate of Return</i>	26
2.7.9	<i>Discount Rate</i>	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		29
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2	Studi Literatur.....	30
3.3	Pengambilan Data.....	30
3.3.1	Beban Listrik Departemen Teknik Fisika.....	30
3.3.2	Ketersediaan Sumber Energi Terbarukan.....	32
3.4	Sistem Sumber Daya Terbarukan yang Digunakan.....	34
3.5	<i>Sizing</i> Komponen Sistem Microgrid.....	34
3.6	Variasi Skenario Sistem Microgrid	39
3.7	Simulasi	39
3.8	Pengambilan Keputusan	40
3.9	Kesimpulan dan Penyusunan Laporan.....	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		43
4.1	Letak Geografis Departemen Teknik Fisika.....	44
4.2	Beban Listrik Departemen Teknik Fisika.....	45
4.3	Hasil <i>On grid</i> (100% PLN).....	46
4.3.1	Analisis Sensitifitas Biaya Listrik	47
4.4	Hasil <i>Off grid</i> (100% PV).....	47
	Analisis Tekno-Ekonomi.....	49
4.5	Hasil <i>On grid</i> (Hybrid PLN + PV)	50
4.5.1	Analisis Teknis 60% PV + 40% PLN.....	52
4.5.1	Analisis Tekno-Ekonomi 60% PV + 40% PLN ..	53
4.6	Hasil <i>On grid</i> (Hybrid PV + Genset).....	58

4.7 Diskusi.....	59
BAB V PENUTUP.....	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA.....	63
LAMPIRAN.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sumber Energi Matahari [14]	10
Gambar 2. 2 karakteristik kurva V-I terhadap perubahan <i>irradiance</i>	13
Gambar 2. 3 Karakteristik Kurva I-V Terhadap Perubahan Temperatur Ambient	13
Gambar 2. 4 Kinetic battery model [21]	16
Gambar 2. 5 Inverter tersentral [24]	18
Gambar 2. 6 String Inverter [24]	19
Gambar 2. 7 Multi-string Inverter [24].....	20
Gambar 2. 8 Arsitektur HOMER [27]	21
Gambar 2. 9 Hubungan antara simulasi, optimisasi, dan analisis sensitifitas [28]	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3.2 Denah Lantai 1	30
Gambar 3.3 Denah Lantai 2	31
Gambar 3. 4 Grafik <i>Clearness index</i>	33
Gambar 3. 5 Kecepatan Angin Setiap Bulan	34
Gambar 3. 6 Proses Simulasi	40
Gambar 4. 1 Discount Factor dan Inflasi	43
Gambar 4. 2 Profil Beban Harian Departemen Teknik Fisika...	46
Gambar 4. 3 Cash Flow 100% PLN	46
Gambar 4. 4 Grafik Dampak Perubahan Harga Listrik terhadap NPC	47
Gambar 4. 5 Grafik cash flow 100% PV minus 100% grid.....	50
Gambar 4. 6 Kapasitas Hybrid PV dan PLN	51
Gambar 4. 7 Grafik Selisih NPC PLN dan setiap variasi sistem	51
Gambar 4. 8 Rata-rata Produksi Listrik pada Setiap Bulan	52
Gambar 4. 9 Grafik Cash Flow Annual sistem PV-grid dan sistem grid	55
Gambar 4. 10 Grafik <i>Nominal Cash Flow Cumulative</i> Sistem PV- Grid minus Grid.....	56
Gambar 4. 11 Grafik Discount Cash Flow cumulative sistem PV PV-Grid minus Grid	57

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan jenis PV [20]	15
Tabel 2. 2 Days of Storage	17
Tabel 2. 3 kelebihan dan kekurangan HOMER [3]	24
Table 3. 1 Total Konsumsi Energi Harian (weekday)	32
Table 3. 2 Spesifikasi Modul PV LEN 200 WP Monocrystalline	35
Table 3. 3 Derating factor	37
Tabel 4. 1 Estimasi Kebutuhan Energi Listrik DTF	48
Tabel 4. 2 Derating factor	48
Tabel 4. 3 Total energi yang dibangkitkan tiap PV	48
Tabel 4. 4 Total PV	49
Tabel 4. 5 NPC setiap discount rate	50
Tabel 4. 6 Cost Summary 60% PV + 40 % PLN selama 25 tahun	54
Tabel 4. 7 Parameter hasil perbandingan sistem 100% PLN dengan 60% PV + 40%PLN	57
Tabel 4. 8 Parameter Ekonomi PV-PLN (discount 11%)	60

DAFTAR ISTILAH

CC	: <i>Cycle Charging</i>
COE	: <i>Cost of Energy</i>
DOD	: <i>Deep of Discharge</i>
ESDM	: Energi dan Sumber Daya Mineral
GHI	: <i>Global Horizontal Irradiation</i>
HOMER	: <i>Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables</i>
IC	: <i>Initial Capital</i>
LF	: <i>Load Following</i>
NASA	: <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOCT	: <i>Normal Operating Condition Test</i>
NPC	: <i>Net Present Cost</i>
NRAO	: <i>Nominal Rated Array Output</i>
MPPT	: <i>Maximum Power Point Tracker</i>
PLN	: Perusahaan Listrik Nasional
PLTA	: Pembangkit Listrik Tenaga Angin
PLTS	: Pembangkit Listrik Tenaga Surya
PV	: <i>Photovoltaic</i>
SOC	: <i>State of Charge</i>
STC	: <i>Standart Test Condition</i>
ROI	: <i>Return On Investment</i>
OC	: <i>Operational Cost</i>

DAFTAR SIMBOL

$E_{grid,saless}$: energi terjual ke grid (kWh/tahun)
$E_{non\ ren}$: Produksi energi non terbarukan (kWh/tahun)
E_{served}	: total beban yang terpenuhi (kWh/tahun)
$G_{T,NOCT}$: Radiasi matahari yang menumbuk permukaan PV kondisi NOCT [kW/m^2]
$\overline{G_T}$: Radiasi matahari pada PV (kW/m^2)
$G_{T,STC}$: radiasi matahari pada <i>standart test condition</i> [$1 kW/m^2$]
H_{ave}	: Rata-rata radiasi matahari pada permukaan bumi ($kWh/m^2/day$)
$H_{non\ ren}$: produksi thermal non energi terbarukan ($kWh/tahun$)
$H_{o,ave}$: Radiasi matahari di atas atmosfer ($kWh/m^2/day$)
H_{served}	: total beban thermal yang terpenuhi ($kWh/tahun$)
K_T	: <i>Clearness index</i>
P_{PV}	: Daya keluaran PV
$T_{a,NOCT}$: Temperatur <i>ambient</i> pada kondisi NOCT ($^{\circ}C$)
T_{amb}	: Temperatur <i>ambient</i> ($^{\circ}C$)
$T_{c,NOCT}$: Temperatur pada kondisi NOCT ($^{\circ}C$)
$T_{c,STC}$: temperatur cell PV pada <i>standart test condition</i> [$25^{\circ}C$]
T_c	: temperatur cell PV pada waktu tertentu [$^{\circ}C$]
T_{cell}	: Temperatur PV
Y_{PV}	: Kapasitas PV pada STC (kW)
f_{PV}	: <i>Derating Factor</i> (%)
α_p	: koefisien temperatur dari power [$\%/^{\circ}C$]
η_c	: Efisiensi konversi listrik panel surya
S	: Radiasi matahari yang menumbuk PV saat STC [$1 kW/m^2$]
τ_a	: Tingkat penyerapan panel surya

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Indonesia setiap tahunnya terus meningkat, berdasarkan data statistik ketenagalistrikan pada tahun 2018 dari kementerian ESDM terdapat peningkatan permintaan energi listrik di Indonesia sebesar 1,6% dari tahun sebelumnya. Jumlah pelanggan juga mengalami peningkatan dari tahun sebelumnya yaitu sebesar 5,9%. Peningkatan permintaan kebutuhan listrik di Indonesia tidak selaras dengan ketersediaan energi listrik atau produksi tenaga listrik PLN pada tahun 2017 yang menunjukkan penurunan sebesar -1,3%. [1]. Maka dari itu diperlukan jaminan ketersediaan energi berkelanjutan dengan menambah jumlah energi terbarukan yang digunakan. Kementerian ESDM memiliki target penggunaan pembangkit listrik energi terbarukan sebesar 31% pada tahun 2050. Energi terbarukan menjadi harapan baru energi masa depan untuk menjawab masalah kelangkaan sumber energi konvensional. Energi terbarukan memanfaatkan sumber daya alam yang tidak habis pakai salah satunya adalah angin matahari. Kecepatan angin di Indonesia, tepatnya di kota Surabaya memiliki nilai rata-rata kurang dari 3 m/s, yaitu sebesar 2,1 m/s [2] namun rentang kecepatan angin yang sesuai dengan kinerja *wind turbine* yang baik adalah antara 3 m/s – 5 m/s [3] sehingga sumber energi angin tidak disarankan untuk dibangun. Intensitas radiasi matahari di Indonesia sebesar 4,8 kWh/m² per hari dengan rata-rata 9% tiap bulannya [4]. Hal ini merupakan keuntungan dari posisi geografis Indonesia yang berada di daerah tropis. Namun Potensi tersebut belum dimanfaatkan secara maksimal, hal ini disebabkan karena sedikitnya studi yang dilakukan mengenai pemanfaatan energi sinar matahari sebagai sumber energi listrik. Salah satu sumber energi listrik atau pembangkit yang memanfaatkan energi sinar matahari adalah PLTS.

PLTS merupakan pembangkit energi listrik yang memanfaatkan energi foton dari radiasi sinar matahari untuk

dikonversi menjadi energi listrik yang digunakan untuk pemenuhan kebutuhan beban pada sebuah sistem. PLTS dikenal memiliki sifat intermiten, yang mana produksi energi listrik bergantung pada lama sinar matahari dan radiasi sinar matahari harian yang bergantung pada kondisi lingkungan [5]. Produksi sinar matahari di PLTS dapat dimanfaatkan dalam sistem microgrid sebagai salah satu sumber energi yang dapat diintegrasikan dengan sumber energi lainnya seperti sumber energi listrik nasional atau PLN.

Microgrid adalah sistem energi terdistribusi yang terdiri berbagai sumber energi, baik sumber energi konvensional, sumber energi fosil, maupun sumber energi terbarukan yang memiliki sistem interkoneksi beban. Microgrid dapat terhubung dengan grid (*on grid*) maupun berdiri sendiri (*off grid*). microgrid dapat dilakukan untuk mengurangi pembelian grid atau pemakaian energi fosil. Selain itu keadaan *off grid* sangat menguntungkan apabila sistem grid mati dan pemenuhan kebutuhan beban harus tetap terpenuhi. salah satu sektor pemenuhan kebutuhan energi listrik yang harus selalu terpenuhi adalah pada universitas. Beberapa studi mengenai microgrid yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban pada tingkat universitas telah dilakukan seperti pada [6] dan [3]

Abhishek Kumar dkk [6] melakukan perancangan sistem *microgrid* dengan melihat peluang pemanfaatan sumber energi terbarukan berdasarkan analisis tekno financial pada universitas yang ada di India (*IIT GHY*). Penelitian dilakukan dengan melakukan 12 variasi kombinasikan microgrid (*on grid* dan *off grid*) yang terdiri dari sumber energi terbarukan berupa solar photovoltaic, biogas yang menggunakan sampah sisa makanan atau sisa dapur beserta sistem penyimpanan (baterai) untuk kemudahan disimulasikan dengan menggunakan *software* HOMER. Evaluasi terhadap sistem kontrol manajemen energi yang digunakan untuk pemenuhan atau pengiriman sumber energi ke beban dengan menggunakan 2 kontrol sebagai strategi manajemen energi yang berbeda yaitu *following* (LF) dan *cycle charging* (CC). Pada strategi LF dilakukan pemenuhan kebutuhan beban utama

dan beban thermal pada power yang rendah tiap waktunya dengan menjaga persyaratan operasi pemenuhan kebutuhan pada beban tersebut. pemenuhan kebutuhan dengan power yang rendah dimaksudkan untuk sebagian daya lainnya di gunakan sebagai charging baterai. Pada strategi CC strategy generator akan beroperasi dengan full output power ketika beban utama perlu dipenuhi, ketika pemenuhan kebutuhan utama telah terpenuhi maka sisa produksi listrik tersebut disalurkan baterai. Diperoleh skenario optimal pada *dispatch* LF ketika *off grid* yaitu skenario 8 dengan menggunakan PV, Biogas dan DG sebagai pembangkitnya serta menggunakan baterai dan *converter*. Untuk *on grid* skenario optimal adalah skenario 9 dengan menggunakan PV dan grid sebagai sumber energi [6].

Jatifa Jiwa Gandhi dkk [3] melakukan perancangan sistem untuk optimisasi pembangkit tenaga listrik oleh PV dan PV-diesel dengan sistem microgrid untuk kebutuhan beban pencahayaan laboratorium sistem tenaga di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pemenuhan kebutuhan beban pencahayaan laboratorium dilakukan dengan *on grid* dan *off grid*, pada kondisi *on grid* PV dihubungkan dengan grid, pada kondisi *off grid* PV dihubungkan dengan PV-diesel. Dihasilkan sistem yang optimal pada kondisi *on grid* dengan menggunakan komponen microgrid berupa PV 0,4 kW, inverter 3 kW dan grid 1,15 kW. Pada kondisi *off grid* dengan menggunakan komponen microgrid berupa PV 4.95 kW, diesel 1 kW, baterai 10 buah, dan *converter* 2 kW [3].

Berdasarkan uraian di atas, maka pada tugas akhir ini dilakukan desain microgrid pada bangunan penyedia fasilitas pendidikan yaitu pada Departemen Teknik Fisika ITS yang lokasinya berada di Surabaya pada latitude -7.2836 dan longitude 112.795. Departemen Teknik Fisika dipilih karena pemakaian listrik yang cukup tinggi serta beberapa kali terjadi pemadaman listrik yang dapat mengganggu kegiatan belajar mengajar. Departemen Teknik Fisika juga memungkinkan untuk mengadakan sumber energi terbarukan salah satunya adalah PLTS. PLTS dipilih karena *clearness index* rata-rata pada kota Surabaya

cukup tinggi yaitu sebesar 0,54 dan rata-rata radiasi harian sebesar 5,17 kWh/m²/day [7].

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, permasalahan yang diambil dalam tugas akhir ini yaitu tingginya tingkat pemakaian listrik pada Departemen Teknik Fisika maka perlu dilakukan penghematan terhadap pembelian grid yaitu dengan memanfaatkan potensi sumber energi terbarukan yang dapat berdiri sendiri (*off grid*) maupun yang terhubung PLN (*on grid*) dengan menggunakan sistem microgrid. Dengan memperhatikan permasalahan-permasalahan sebagai berikut:

1. Apakah sistem microgrid layak untuk dilaksanakan di Departemen Teknik Fisika ?
2. Bagaimana Skenario konfigurasi sistem microgrid yang sesuai dengan kebutuhan beban listrik Departemen Teknik Fisika ?
3. Bagaimana perhitungan tekno-ekonomi untuk skenario sistem microgrid yang optimal pada Departemen Teknik Fisika ?

1.3 Tujuan Penelitian

Untuk menyelesaikan permasalahan diatas maka dilakukan tugas akhir dengan tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui kelayakan sistem microgrid untuk dilaksanakan di Departemen Teknik Fisika.
2. Mendapatkan skenario sistem microgrid yang optimal sesuai dengan kapasitas dan kebutuhan listrik pada Departemen Teknik Fisika.
3. Mengetahui perhitungan tekno ekonomi yang sesuai dan ekonomis berdasarkan masing-masing skenario sistem microgrid.

1.4 Batasan Masalah

Dalam pelaksanaan tugas akhir ini terdapat batasan masalah yang diberikan agar penelitian ini lebih terarah yaitu :

1. Beban listrik yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan beban listrik Departemen Teknik Fisika meliputi gedung P dan C (lantai 1 dan 2).
2. Simulasi model sistem microgrid dilakukan menggunakan HOMER *software*
3. Data beban listrik yang digunakan adalah data beban pasif, yang berarti tidak dipengaruhi oleh waktu/usia. Data daya konsumsi diambil berdasarkan spesifikasi alat / perangkat listrik
4. *Lifetime* sistem adalah 25 tahun.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan penelitian Tugas Akhir ini akan disusun dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika laporan

BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi teori – teori penunjang yang mendasari Tugas Akhir ini, baik yang bersumber dari buku, jurnal, maupun laporan tugas akhir atau penelitian terkait.

BAB III Metodologi Penelitian

Dalam bab ini dijelaskan mengenai tahapan – tahapan yang dilakukan dalam pelaksanaan Tugas Akhir, dimulai dari studi literatur hingga pengambilan data, pembahasan, dan penarikan kesimpulan.

BAB IV Analisis Data dan Pembahasan

Pada bab ini ditampilkan data yang didapat dari proses simulasi disertai analisisnya. Dari hasil analisis tersebut dilakukan pembahasan sesuai tujuan penelitian.

BAB V Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dari keseluruhan Tugas Akhir serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Sistem *Microgrid*

Berdasarkan dari beragam teori, sistem *microgrid* dapat didefinisikan sebagai jaringan listrik versi kecil, *microgrid* menggunakan sumber energi yang bersih seperti tenaga angin dan matahari. *microgrid* dapat dihubungkan ke jaringan listrik yang lebih besar, tetapi juga dapat berfungsi secara mandiri. [8]

Sistem *microgrid* berdasarkan definisi *U.S Departement of Energy* adalah jaringan listrik lokal yang dapat beroperasi secara paralel dengan grid, maupun beroperasi secara independen untuk menyediakan kebutuhan listrik dengan kehandalan tinggi dan tahan terhadap gangguan dari luar. Sistem distribusi terintegrasi ini menjawab kebutuhan di lokasi dengan masalah suplai dan distribusi energi listrik, dan berguna untuk menjaga keamanan beban berkepentingan tinggi [9].

Berdasarkan definisi *Microgrid Exchange Group*, sistem *microgrid* adalah kumpulan beban dan sumber energi yang terhubung dan terdistribusi dengan jelas dalam sebuah jaringan listrik yang terkontrol untuk menyalurkan energi listrik ke pengguna. Fungsi utama yang perlu dimiliki oleh sistem *microgrid* adalah:

1. Mampu beroperasi pada kondisi *on grid* (terhubung ke jaringan listrik) dan *off grid/island mode* (tidak terhubung ke jaringan listrik)
2. Terhubung ke jaringan listrik sebagai jaringan tunggal yang terkontrol.
3. Kombinasi dari berbagai beban dan sumber energi yang saling terhubung serta lokasinya berdekatan.
4. Dapat menyediakan suplai daya listrik yang berkualitas dan memiliki kehandalan tinggi untuk kebutuhan pengguna yang variatif.
5. Dirancang untuk dapat mengakomodasi kebutuhan daya beban sistem secara optimal.

Microgrid dapat beroperasi dalam dua kondisi yaitu tersambung ke jaringan listrik besar PLN (*on grid*) maupun beroperasi secara independen *islanded (off grid)* atau tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN.

2.1.1 Grid-Connected (*on grid*)

Sistem dengan mode operasi *grid-connected* merupakan sistem yang dalam pemenuhan kebutuhan bebannya tidak hanya dipasok oleh sumber energi thermal atau terbarukan saja namun juga terhubung pada sumber energi listrik yang besar dan kontinyu, di Indonesia sambungan listrik tersebut disebut PLN.

2.1.2 Islanded (*off grid*)

Islanded merupakan sistem microgrid dengan mode operasi yang hanya menggunakan sistem sumber energi terbarukan atau sumber energi thermal, mode operasi ini tidak terhubung dengan jaringan listrik jala-jala dalam pemenuhan kebutuhan bebannya atau mode operasi *islanded* dapat berdiri sendiri tanpa ada pasokan dari jaaringan listrik jala-jala.

2.2 Sumber Energi

Sumber energi didefinisikan dalam undang-undang Republik Indonesia No. 30 Tahun 2007 bahwa sumber energi adalah sesuatu yang dapat menghasilkan energi baik secara langsung maupun melalui proses konversi. Sumber energi dapat dibagi menjadi dua yaitu sumber energi terbaruka dan sumber energi tak terbarukan.

2.2.1 Sumber energi tak terbarukan

Sumber energi tak terbarukan adalah sumber energi yang jumlah ketersediaannya terbatas di bumi dan tidak dapat diperbarui lagi jika telah habis [10]. Energi yang digunakan dan dihasilkan oleh sumber energi tak terbarukan juga dapat menimbulkan permasalahan ketika sumber energi tersebut telah habis [11]. Salah satu contoh penggunaan sumber energi tak terbaruka adalah batu bara yang dapat digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik.

2.2.2 Sumber energi terbarukan

Sumber energi terbarukan adalah sumber energi ramah lingkungan serta tidak memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, hal ini dikarenakan energi yang diperoleh berasal dari proses alam yang berkelanjutan, seperti sinar matahari, angin, air, biofuel dan geothermal [12]. Contoh sumber energi terbarukan adalah *hydropower*, *biomass*, *geothermal*, *solar energy*, *wind power*, *tidal power*, *ocean wave power*, *ocean thermal power* [13].

a. Energi Matahari

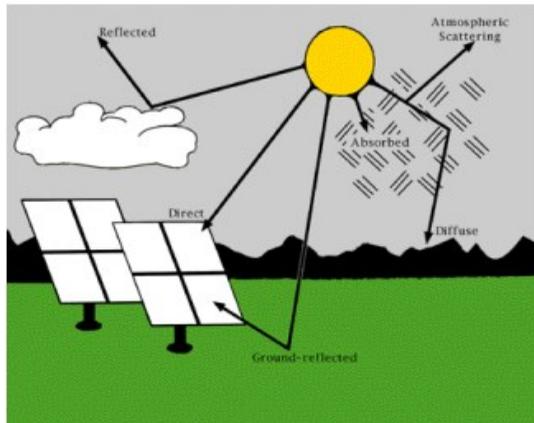
Sumber energi terbesar yang meradiasikan energi adalah matahari, matahari memancarkan radiasi gelombang elektromagnetik yang energi cahaya per satuan luas yang disebut dengan *irradiance* [13]. Tidak semua radiasi matahari dapat sampai ke permukaan bumi, beberapa terjadi pemantulan, dari atmosfer bumi dan awan, dan beberapa lainnya terserap / terabsorpsi oleh molekul-molekul udara yang dapat ditunjukkan pada **Gambar 2.1**. Cahaya matahari yang berada sampai di permukaan bumi dapat disebut dengan Global Horizontal Irradiation (GHI). GHI merupakan penjumlahan dari radiasi sinar matahari, *diffuse irradiance*, dan pemantulan sinar matahari [14].

Terdapat beberapa parameter yang memengaruhi irradiasi matahari yaitu *clearness index*. *Clearness index* merupakan rasio radiasi cahaya matahari yang diteruskan melewati atmosfer menuju permukaan bumi memiliki rentang nilai antara 0 – 1 [14]. *clearness index* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1.

$$K_T = \frac{H_{ave}}{H_{o,ave}} \quad (2.1)$$

Nilai $H_{o,ave}$ dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.2

$$H_{o,ave} = \frac{\sum_{n=1}^N H_o}{N} \quad (2.2)$$



Gambar 2.1 Sumber Energi Matahari [14]

b. Angin

Sumber asli energi terbarukan yang terkandung dalam sumber daya angin adalah matahari. Angin disebabkan oleh perbedaan tekanan di atmosfer bumi akibat ketidakrataan pemanasan bumi oleh matahari. sebagai contoh, jumlah radiasi matahari yang diserap pada permukaan bumi di ekuator lebih besar dari pada di kutub. Perpindahan panas ke atmosfer bumi menimbulkan perbedaan tekanan atmosfer yang menyebabkan udara bergerak dari tekanan tinggi ke tekanan yang lebih rendah, udara tersebut bergerak pada bidang horizontal. Ketika udara tersebut bergerak, terdapat juga suhu dan massa udara yang didistribusikan di seluruh permukaan bumi [15].

c. Biomassa

Biomassa adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan semua bahan organik yang terdapat di permukaan bumi seperti tanaman, pepohonan, limbah padat kota (MSW), limbah hewan, residu kehutanan dan pertanian [16]

2.3 Komponen Pembangkit Listrik

Komponen pembangkit listrik bertanggung jawab atas proses konversi energi. Dalam penelitian ini, penulis akan fokus pada komponen fotovoltaik sel.

2.3.1 Photovoltaic

Sel fotovoltaik mendapatkan energi dari radiasi matahari. hal ini menjelaskan mengenai penciptaan tegangan akibat adanya paparan cahaya matahari [17]. Sistem ini merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan sumber daya alam tak habis pakai yaitu, sinar matahari.

PV terbuat dari bahan semikonduktor yang dapat menghantarkan arus listrik. Ketika cahaya matahari mengenai PV, foton akan menumbuk elektron valensi dari atom semikonduktor, maka akan menghasilkan energi yang cukup besar yang mengakibatkan elektron tereksitasi. Elektron tersebut bermuatan negatif tereksitasi menuju ke pita konduksi maka akan timbul hole yang bermuatan positif. Daerah semikonduktor yang bersifat negatif dengan elektron bebas merupakan pendonor elektron, daerah ini disebut negative type (n-type) dan Daerah semikonduktor yang bersifat positif dengan elektron bebas merupakan penerima elektron (p-type). Elektron akan menjauhi sisi negatif dan hole menjauhi sisi positif pada p-n junction. maka apabila p-n junction dihubungkan dengan beban listrik maka akan tercipta arus listrik. keuntungan dari sistem ini sebagaimana yang termuat pada [18] yaitu sebagai berikut :

- a. Memiliki sifat yang berkelanjutan sebagai bahan bakar atau sumber energi.
- b. Memiliki dampak terhadap lingkungan yang kecil.
- c. Menurunkan pembelian listrik.
- d. Memilliki lifetime yang panjang lebih dari 30 tahun dengan perawatan yang minimum.
- e. *Silent operation.*

Pada dasarnya, photovoltaic memodelkan rangkaian listrik, dan daya keluaran yang dihitung menggugunkan kurva I-V. Terdapat kondisi dimana *photovoltaic* memiliki efisiensi

maksimum tegangan operasi pada waktu radiasi dan temperatur tertentu. kondisi ini dapat di ketahui dengan menggunakan alat yang disebut *Maximum Power Point Tracker*, berfungsi untuk mengatur tegangan untuk mengoperasikan photovoltaic secara efisien. Jika alat ini dipertimbangkan untuk digunakan dalam sebuah sistem, maka akan mempengaruhi tegangan, tegangan yang fluktuasi / bervariasi dapat ditiadakan [19].

Daya atau arus yang dihasilkan oleh PV tergantung pada beberapa variabel yang mempengaruhi yaitu radiasi sinar matahari, *clearnes index*, temperatur, banyaknya PV yang terpasang seri, PV yang terpasang paralel dan karakteristik PV yang digunakan [18]. Untuk dapat memenuhi kebutuhan rata-rata beban harian pada suatu bangunan maka perlu diketahui ukuran modul PV. Agar beban dapat terpenuhi dalam kondisi apapun harus mempertimbangkan bulan yang memiliki radiasi sinar matahari terendah [3].

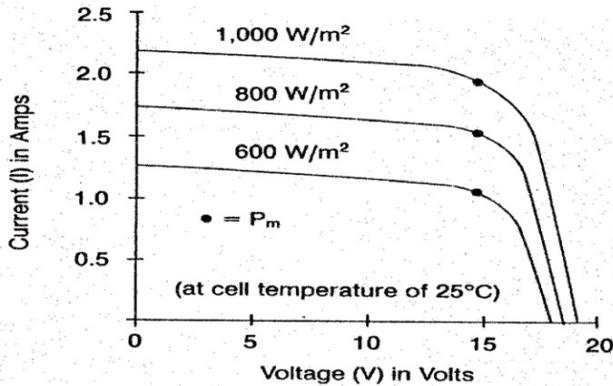
Setiap PV memiliki keluaran tertentu, untuk mengetahui keluaran daya pada suatu PV ketika suatu PV dipengaruhi oleh temperatur dan iradiasi matahari, maka Keluaran PV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3 [17].

$$P_{pv} = Y_{pv} f_{pv} \left(\frac{\overline{G}_T}{\overline{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (2.3)$$

Faktor-faktor yang mempengaruhi sel surya tersebut adalah sebagai berikut.

a. Radiasi sinar matahari

Keluaran daya PV dapat dipengaruhi oleh iradiasi matahari \overline{G}_T . pada **Gambar 2.2** kurva I-V menunjukkan karakteristik PV terhadap arus dan voltage yang dihasilkan oleh PV, keluaran daya berbanding lurus dengan iradiasi. Pada saat iradiasi tinggi yaitu pada saat jumlah foton banyak, maka arus yang dihasilkan akan semakin besar pula.

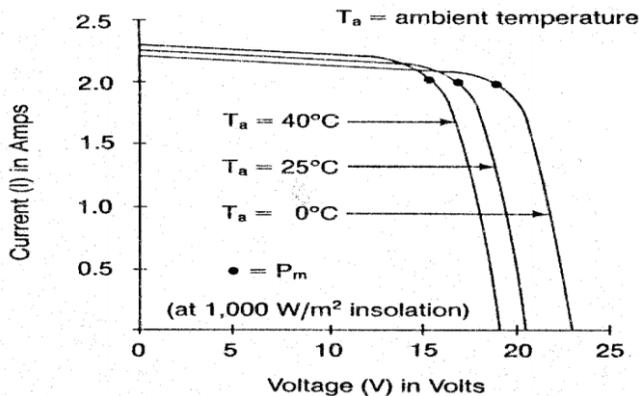


Gambar 2. 2 karakteristik kurva V-I terhadap perubahan irradiance

b. Temperatur ambient

Kondisi STC (*standart test condition*) merupakan kondisi standart yang digunakan untuk membuat suatu PV. Pada kondisi STC radiasi berada pada 1 kW/m², temperatur cell adalah 25°. PV dapat dipengaruhi oleh temperatur, temperatur cell dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4.

$$T_{cell} = T_{amb} + S \left(\frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{T,NOCT}} \right) \times \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau_a} \right) \quad (2.4)$$



Gambar 2. 3 Karakteristik Kurva I-V Terhadap Perubahan Suhu

Sebuah Sel Surya dapat beroperasi secara maximum jika temperatur sel tetap normal (pada 25 derajat Celsius). Pada **Gambar 2.3** diketahui bahwa semakin tinggi temperatur ambient dari temperatur optimal maka voltage yang dihasilkan akan semakin rendah. Daya (wattpeak) yang dibangkitkan PLTS untuk memenuhi kebutuhan energi, diperhitungkan dengan beberapa persamaan-persamaan.

a. Menghitung Area Array (PV Area)

Area array (PV Area) diperhitungkan dengan menggunakan persamaan 2.5

$$PV_{area} = \frac{E_L}{G_{av} \times derating\ factor \times \eta_{PV} \times \eta_{out}} \quad (2.5)$$

b. Menghitung Daya yang Dibangkitkan PLTS (watt peak)

Dari perhitungan area array, maka besar daya yang dibangkitkan PLTS (wattpeak) dapat diperhitungkan dengan persamaan 2.6.

$$P_{wattpeak} = PV_{area} \times PSI \times \eta_{PV} \quad (2.6)$$

Dengan PSI merupakan peak Solar Insolation sebesar 1000 W/m²

Tipe-tipe sel surya

PV *cells* terbuat dari material semikonduktor, yang memiliki beberapa tipe, diantaranya adalah *monocrystalline silicon*, *Multicrystalline silicon*, dan *Thin film Silicon*.

a. ***Monocrystalline silicon***

Tipe panel surya *monocrystalline* dibuat dengan silikon yang dibentuk menjadi batangan dan diiris. Kelebihan dari *monocrystalline cells* ini adalah tingkat efisiensi yang tinggi, namun proses pembuatannya yang rumit dan mahal [20].

b. ***Multicrystalline silicon***

Multicrystalline silicon lebih murah dibandingkan dengan *monocrystalline silicon*, juga proses fabrikasi yang lebih simple.

Namun, monocrystalline silicon memiliki efisiensi yang rendah sekitar 12% [20].

c. *Thin-Film Silicon*

Thin film terbuat dari atom silikon dalam lapisan homogen yang tipis dari pada struktur kristal. Modul *thin film* memiliki harga yang lebih murah dibandingkan kedua jenis modul lainnya, namun untuk efisiensinya *thin film* memiliki nilai efisiensi yang rendah [20].

Tabel 2.1 menunjukkan perbandingan penelitian mengenai perbedaan dari tipe-tipe PV.

Tabel 2. 1 Perbandingan jenis PV [20]

PV technology	Monocrystalline	Multicrystalline	Thin Film	Hybrid
Cell Efficiency at Standart Test Condition (STC) (%)	16-17	14-15	8-12	18-19
Module Efficiency (%)	13-15	12-14	5-7	16-17
Area needed per kW_p (for modules)(m^2)	7 (Sharp)	8 (Sharp)	16 (unisolar)	6-6.5 (sanyo)
Annual energy generated per kW_p in the UK	830	810	800	865
Annual energy generated per m^2 (kWh/m^2)	107	100	50-52	139-150

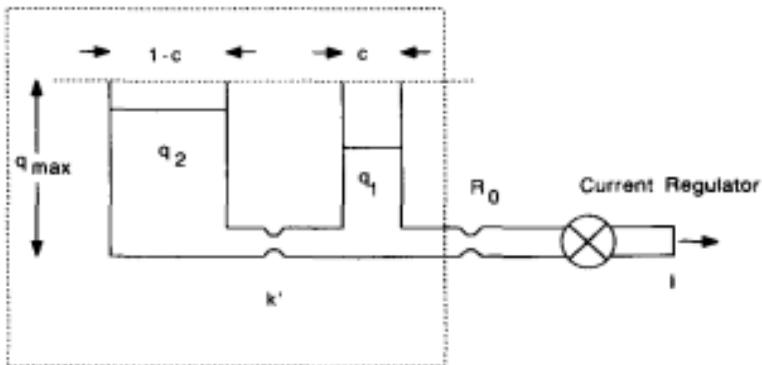
2.4 Komponen Sistem Penyimpan

Baterai pada sistem *microgrid* digunakan sebagai penyimpan energi yang menyimpan kelebihan listrik dari panel surya ketika kebutuhan beban sudah dapat terpenuhi. Baterai digunakan jika panel surya atau jaringan listrik PLN tidak dapat mencukupi kebutuhan beban secara keseluruhan.

Perangkat sistem penyimpanan yang biasa digunakan adalah baterai, perangkat ini terdiri dari satu anoda, elektrolit, dan katoda. Baterai bekerja untuk memindahkan ion charge dan discharge ke

katoda melalui elektrolit hal ini memungkinkan baterai untuk mengisi atau mengeluarkan energi yang disimpan. Jenis baterai yang sering digunakan dalam sistem microgrid adalah *lead acid battery* [19].

Pada [21] penulis mengembangkan model baterai *lead acid*, model ini menggunakan baterai dengan *2 tank system*. Penulis menggunakan prinsip *kinetic battery model* untuk menentukan banyaknya energi yang dapat diserap atau diambil dari baterai. Dinamakan *kinetic battery model* karena menganut konsep *electrochemical kinetics*, dengan model penyimpanan menggunakan dua *tank system*. *Tank* pertama berisi energi yang sudah tersedia untuk diubah ke listrik DC. *Tank* kedua berisi energi yang terbatas atau energi yang tersimpan pada tangki ini tidak dapat tersedia dengan cepat untuk diambil. [22]



Gambar 2. 4 *Kinetic battery model* [21]

Baterai memiliki dua siklus penting yaitu siklus pengisian (*charging*) dan siklus pengosongan (*discharging*). Siklus pengisian adalah proses pemasukan energi listrik ke dalam baterai dari *charger* atau sumber listrik. Proses pengosongan (*discharging*) adalah proses pengeluaran energi listrik dari baterai ke beban.

Ketika proses discharge, daya keluaran maksimum baterai kinetic battery model dapat ditentukan menggunakan persamaan 2.7 [21].

$$P_{b,out, kbm} = \frac{-kCE_{max} + -kCE_1 e^{-k\Delta t} + kCE(1 - e^{-k\Delta t})}{e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (2.7)$$

Kinerja pada baterai dapat dilihat dari nilai SOC baterai saat itu. SOC baterai adalah indikator kapasitas muatan baterai yang menyatakan sisa kapasitas muatan dalam sel baterai (Q_t) dalam persentase dari total kapasitas nominal baterai (Q_n). Besaran ini dinyatakan dalam ukuran 0% sampai 100%, di mana SOC 0% menyatakan baterai sudah kosong.

Dalam pendesainan sistem PLTS maka perlu diketahui jenis, jumlah dan ukuran baterai yang sesuai dengan daerah implementasi sistem PLTS nantinya. Untuk mengetahui banyaknya baterai yang diperlukan, maka harus diketahui data kapasitas beban, kapasitas baterai, nilai DOD, dan *days of storage*. *Days of storage* merupakan kemampuan baterai dapat menyimpan energi berdasarkan waktu Menurut [23] nilai *days of storage* ditunjukkan pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 *Days of Storage*

Garis lintang lokasi pemasangan	Waktu cadangan
0-30 (utara atau selatan)	5-6 hari
30-50 (utara atau selatan)	10-12 hari
50-60 (utara atau selatan)	15 hari

Besar kapasitas baterai yang dibutuhkan untuk memenuhi konsumsi energi harian dapat dihitung dengan Persamaan 2.8

$$\text{kapasitas baterai} = \frac{N \times E_d}{V_s \times DOD \times \eta} \quad (2.8)$$

Banyaknya baterai paralel dan seri yang akan digunakan pada sistem microgrid dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.9 dan 2.10.

$$\text{Number of batteries in paralel} = \frac{\text{Total} \frac{Ah}{day} \times \text{days of storage}}{DoD \times \text{kapasitas Ah baterai}} \quad (2.9)$$

$$\text{Number of batteries in seri} = \frac{\text{Tegangan bus baterai}}{\text{tegangan baterai}} \quad (2.10)$$

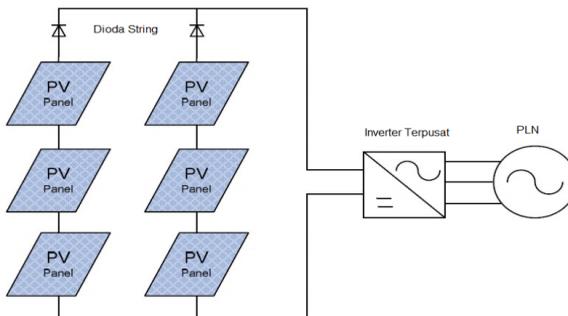
2.5 Inverter

Inverter merupakan alat yang digunakan untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Terdapat tiga jenis konfigurasi sistem koneksi inverter ke jaringan (*on grid*).

2.5.1 Inverter Tersentral (*Centralized Inverter*)

Inverter Tersentral dapat dibangun dari beberapa string yang dihubungkan secara paralel, dimana masing-masing string dikopel sebuah dioda pengaman anti paralel. Konsep Inverter Tersentral cocok digunakan untuk tegangan DC rendah ($V_{DC} < 120V$) **Gambar 2.3** menunjukkan konfigurasi inverter tersentral.

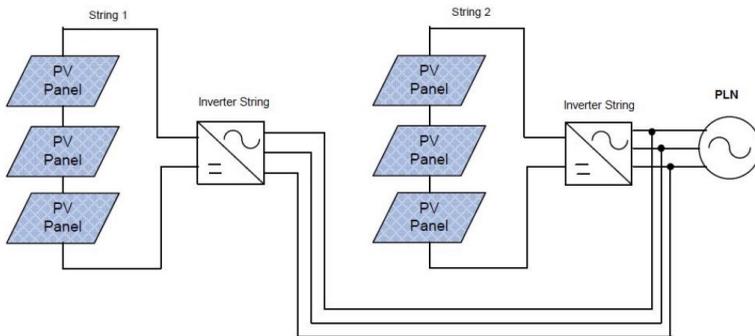
Banyaknya solar modul pada masing-masing string dibatasi hanya sekitar 3 sampai 4 buah yang terhubung secara seri, hal ini dilakukan agar setiap solar modul dapat menerima jumlah energi dari matahari yang sama rata. Keuntungan dari Inverter tersentral adalah harga yang relatif murah dan rangkain sederhana. Kelemahan dari konsep inverter tersentral adalah setiap string menghasilkan jumlah daya (P_{MPP}) yang berbeda. Hal ini menyebabkan rangkaian kontrol daya menjadi tidak optimum, karena Inverter Tersentral hanya menggunakan satu inverter dan satu kontrol daya yang terkoneksi secara tersentral terhadap beberapa *string*.



Gambar 2.5 Inverter tersentral [24]

2.5.2 String Inverter

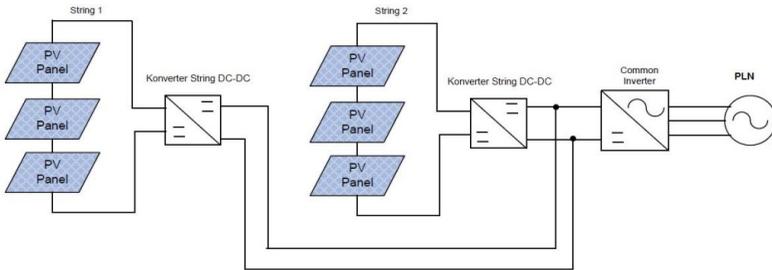
Konfigurasi konsep *String Inverter* dapat dibangun dari beberapa solar modul yang terhubung secara seri sehingga tersusun menjadi string, dimana masing-masing string terkoneksi dengan inverter secara independen. Konsep String Inverter cocok digunakan untuk tegangan DC tinggi, yaitu ($V_{DC} > 120V$). **Gambar 2.4** menunjukkan konfigurasi inverter tersentral. Kelemahan dari sistem ini adalah instalasi yang cukup rumit dan diperlukan inverter yang cukup banyak, sehingga biaya investasi awal akan lebih mahal.



Gambar 2. 6 String Inverter [24]

2.5.3 Multi-String Inverter

Konsep *Multi-String Inverter* dapat dibangun berdasarkan konsep *string inverter* yang masing-masing inverter bekerja secara independen dan dengan penambahan satu *dependent inverter* untuk melayani string inverter (*independent inverter*) secara bersamaan. Karena satu Inverter melayani beberapa (banyak) string inverter secara bersamaan, maka konsep ini dinamakan Multi-String Inverter. **Gambar 2.5** menunjukkan topologi *Multi-String Inverter*

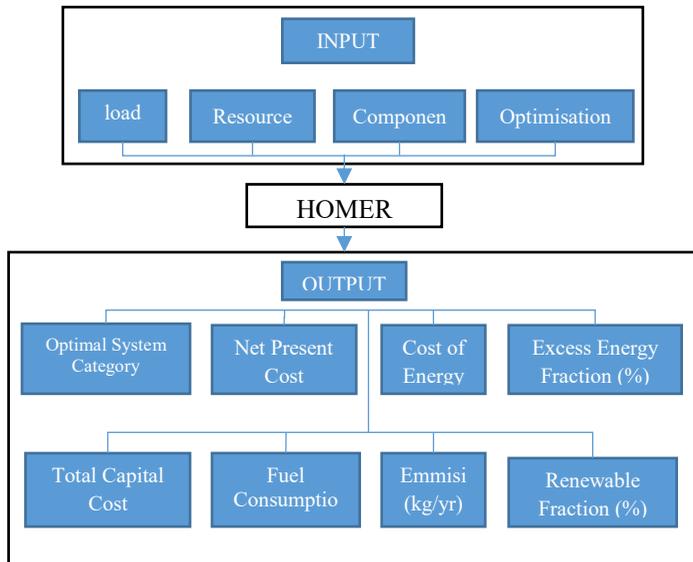


Gambar 2. 7 Multi-string Inverter [24]

2.6 HOMER

Perangkat lunak HOMER telah dikembangkan oleh Renewable Energy Laboratory, USA pada 1993 [25]. HOMER (*The Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables*), merupakan salah satu *tool* yang dapat digunakan untuk melakukan desain sebuah sistem *microgrid*, HOMER juga mempermudah evaluasi desain sistem pembangkit untuk berbagai jenis pembangkit atau sumber energi baik yang tersambung ke jaringan listrik (*on-grid*) atau pun tidak. *Tool* ini dapat melakukan permodelan sistem pembangkit secara optimal dan memperkirakan biaya instalasi dan operasi sistem selama masa operasinya (*life time costs*). HOMER dapat melakukan permodelan pada *grid-connected* dan *off grid* pada sistem pembangkit untuk memenuhi kebutuhan beban, yang dapat terdiri dari kombinasi PV modul, turbin angin, baterai, *microturbines*, biomass [26].

HOMER menyediakan model yang *diinput* oleh pengguna, Terdapat beberapa hal yang harus di *input* ke perangkat lunak HOMER, yaitu : Beban, sumber energi, dan komponen.



Gambar 2. 8 Arsitektur HOMER [27]

Dalam pemenuhan kebutuhan energi tiap beban. HOMER dapat memiliki 2 starategi untuk memenuhinya yaitu stratergi *Load Following* dan *Cycle Charging*. Strategi LF akan bekerja memenuhi beban ketika sistem pembangkit dapat memproduksi listrik berlebih atau ketika storage bank dari beban deferrable kosong. Strategi CC bekerja memenuhi kebutuhan *deferrable load* setelah kebutuhan beban utama telah terpenuhi. beban listrik pada suatu bangunan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.11.

$$Total\ Daily\ Consumption = power \times n \times total\ hour \quad (2.11)$$

Setelah dilakukan *input* data maka HOMER akan menjalankan sistem yang telah dibuat dengan 3 tahapan [27], yaitu simulasi, optimisasi, dan analisis sensitifitas.

2.6.1 Simulasi

Pada proses simulasi, HOMER melakukan permodalan pada kinerja suatu sistem pembangkit untuk tiap jam dalam setahun agar dapat menentukan kelayakan sistem dan *life-cycle cost*. HOMER membandingkan kebutuhan elektrik utama dan deferrable dengan energi yang dapat di supply pada setiap waktu. HOMER juga dapat menghitung aliran energi yang keluar dari sistem dan yang masuk ke sistem, untuk sistem yang menggunakan baterai dapat ditentukan waktu dilakukannya proses *charge* dan *discharge* baterai. HOMER menghitung aliran energi untuk setiap konfigurasi sistem dan dapat menentukan konfigurasi sistem *feasible*. Selain itu HOMER juga dapat menentukan estimasi biaya instalasi dan operasi dari sistem sampai proyek berakhir.

2.6.2 Optimisasi

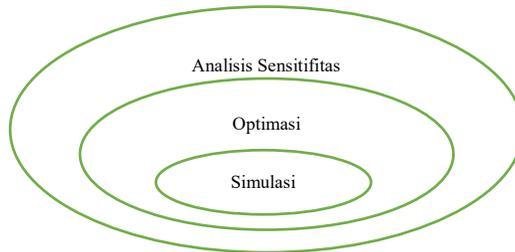
HOMER melakukan optimisasi dengan mensimulasikan sistem yang memiliki konfigurasi yang berbeda-beda. Konfigurasi sistem yang optimal akan diperoleh ketika biaya yang dibutuhkan oleh sistem tersebut mengeluarkan biaya terendah rendah. HOMER menampilkan daftar konfigurasi sistem yang diurutkan berdasarkan nilai NPC.

2.6.3 Sensitivity Analysis

Analisis sensitifitas digunakan untuk mengetahui kemungkinan-kemungkinan parameter sistem yang akan berubah. Analisis sensitifitas juga berguna untuk mengetahui dampak perubahan sistem serta *life-cost* sistem tersebut apabila terjadi perubahan ataupun penggantian komponen sistem. Analisis sensitifitas juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi faktor yang memiliki dampak terbesar pada desain dan operasi sistem.

Gambar 2.7 merupakan ilustrasi dari hubungan dari simulasi, optimisasi dan analisis sensitifitas. Simulasi dilakukan untuk menjalankan sistem yang memiliki kemungkinan dari setiap kombinasi komponen yang diinginkan oleh pengguna, setelah dilakukan simulasi, akan diketahui kinerja dari suatu sistem.

Kemudian sistem yang telah dijalankan tersebut tersebut diurutkan dan disaring berdasarkan kriteria yang telah ditentukan oleh pengguna, maka HOMER akan menampilkan sistem yang optimal. Setelah diketahui bahwa terdapat sistem yang optimal maka dilakukan analisis sensitifitas untuk mengetahui kinerja sistem pada tahun berikutnya.



Gambar 2. 9 Hubungan antara simulasi, optimisasi, dan analisis sensitifitas [28]

HOMER menentukan konfigurasi terbaik sistem dan kemudian memperkirakan biaya instalasi dan operasi sistem selama masa operasinya (*life time costs*) seperti biaya awal, biaya penggantian komponen-komponen, biaya O&M, biaya bahan bakar, dan lain-lain. Saat melakukan simulasi, HOMER menentukan semua konfigurasi sistem yang mungkin, kemudian ditampilkan berurutan menurut net presents costs - NPC (atau disebut juga *life cycle costs*). Pada **Tabel 2.3** dijelaskan kelebihan dan kekurangan perangkat lunak HOMER.

Tabel 2. 3 kelebihan dan kekurangan HOMER [3]

Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> - Dapat membantu menentukan integrasi sumber daya terbarukan yang optimal di dalam sistem <i>hybrid</i>. - Dapat menentukan kinerja sistem energi terbarukan terhadap kelayakan ekonomi - Menyajikan pilihan mengenai utilitas untuk pengembangan proyek sehingga dapat mengurangi resiko kekurangan dana pada proyek pembangkit listrik energi terbarukan 	<ul style="list-style-type: none"> - Tidak dapat memberikan solusi akhir berupa jenis dan jumlah PV, hanya memberikan nilai PV array - Pengguna harus menentukan jenis batrai terlebih dahulu dan tidak terdapat optimasi antar jenis baterai yang dipilih

2.7 Analisis Tekno-Ekonomi

Dalam melakukan analisis ekonomi terhadap simulasi yang dilakukan dengan perangkat lunak HOMER, terdapat beberapa indikator yang digunakan untuk menentukan kelayakan ekonomi pada suatu sistem.

2.7.1 NPC (Net Present Cost)

NPC atau *Net Present Cost* merupakan banyaknya biaya yang dikeluarkan oleh investor selama masa proyek. NPC dapat dihitung dari biaya yang dikeluarkan selama sistem/proyek beroperasi meliputi biaya instalasi, operasi komponen, serta perawatan sistem dikurangi nilai dari semua pendapatan yang dihasilkan.

$$NPC = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i:Rproj)} \quad (2.12)$$

Rproj merupakan *lifetime* proyek CFR merupakan faktor pemulihan biaya capital/investasi, I merupakan *annual real interest rate (discount rate)*. CFR dapat dihitung menggunakan persamaan 2.13

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (2.13)$$

2.7.2 Initial Capital

Initial capital merupakan total biaya awal pembangkitan suatu sistem termasuk pembelian komponen, instalasi awal pembangunan sistem. Pada perangkat lunak HOMER melakukan initial capital merupakan *inputan data*.

2.7.3 COE (Cost of Energy)

COE adalah nilai perbandingan antara biaya produksi total dan produksi total yang dihasilkan oleh suatu sistem pada periode yang sama. Pada perangkat lunak HOMER nilai COE dapat dihitung dengan persamaan 2.14.

$$COE = \frac{C_{tot,ann}}{E_{tot,ann,served}} \quad (2.14)$$

$C_{tot,ann}$ (*total annualized cost*) merupakan biaya yang dikeluarkan setiap tahunnya dari suatu sistem selama proyek beroperasi. $C_{tot,ann}$ meliputi biaya modal tahunan, biaya penggantian dan pemeliharaan tahunan, dan biaya bahan bakar tahunan dari suatu sistem.

2.7.4 Renewable Fraction

Renewable Fraction merupakan nilai perbandingan antara energi yang disalurkan oleh grid dan energi yang disalurkan oleh sistem sumber energi terbarukan ke beban. *Renewable Fraction* dapat ditentukan dengan persamaan 2.15.

$$f_{ren} = 1 - \frac{(E_{non\ ren} - E_{grid,saless}) + H_{non\ ren}}{E_{served} - H_{served}} \quad (2.15)$$

2.7.5 Salvage

Salvage merupakan biaya komponen yang memiliki nilai jual ketika proyek telah berakhir. Perangkat lunak HOMER melakukan kalkulasi biaya salvage dengan menggunakan persamaan 2.16.

$$S = C_{rep} \times \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad (2.16)$$

R_{rem} merupakan masa hidup dari komponen yang masih tersisa ketika proyek telah berakhir.

2.7.6 Payback Period

Payback period merupakan waktu yang dibutuhkan agar investasi awal/intial capital yang telah dikeluarkan dapat kembali kepada investor. *Payback period* diketahui bertujuan untuk mengurangi resiko keuangan terhadap proyek yang akan dilakukan. Semakin kecil nilai *Payback period* maka akan semakin baik, hal ini dikarenakan faktor resiko waktu pengembalian modal akan lebih cepat. *Payback period* dapat dihitung dengan membagi modal awal dan pendapatan yang diterima selama satu tahun.

2.7.7 Return on Investment

ROI merupakan rasio laba yang diperoleh dari sistem. ROI dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.17.

$$ROI = \frac{\sum_{i=0}^{R_{proj}} C_{i,ref} - C_i}{R_{proj}(C_{cap} - C_{cap,ref})} \quad (2.17)$$

2.7.8 Internal Rate of Return

IRR adalah sebuah ukuran anggaran modal yang digunakan oleh perusahaan dalam menentukan apakah mereka seharusnya melakukan investasi atau tidak. Dalam arti yang lain, IRR didefinisikan sebagai sebuah tarif bunga untuk suatu investasi yang berasal dari pembayaran dan pendapatan yang meliputi periode reguler. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa IRR adalah tingkat bunga pengembalian atas sebuah proyek yang diterima perusahaan. Jika $IRR > discount\ rate$ yang berlaku maka proyek layak untuk dilaksanakan, sebaliknya jika $IRR < discount\ rate$ yang berlaku maka proyek tidak layak untuk dilaksanakan [29]. IRR dapat dihitung menggunakan persamaan

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{(NPV_1 - NPV_2)} (i_2 - i_1) \quad (2.18)$$

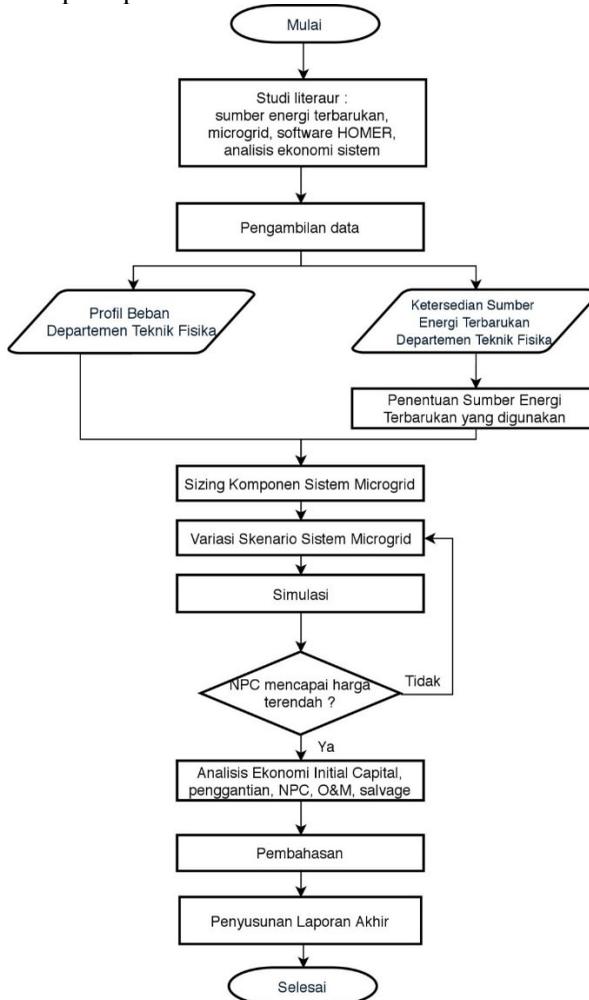
2.7.9 *Discount Rate*

Discount rate adalah persentase yang dipakai untuk mengalikan suatu jumlah nilai dimasa yang akan datang (*future value*) supaya menjadi nilai sekarang (*present value*). Pada umumnya nilai *discount rate* yang digunakan adalah 5%-10% [30].

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan urutan langkah penelitian seperti pada **Gambar 3.1**



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan Diagram Alur Tugas Akhir diatas berikut ini merupakan penjelasan dari setiap bagian penelitian.

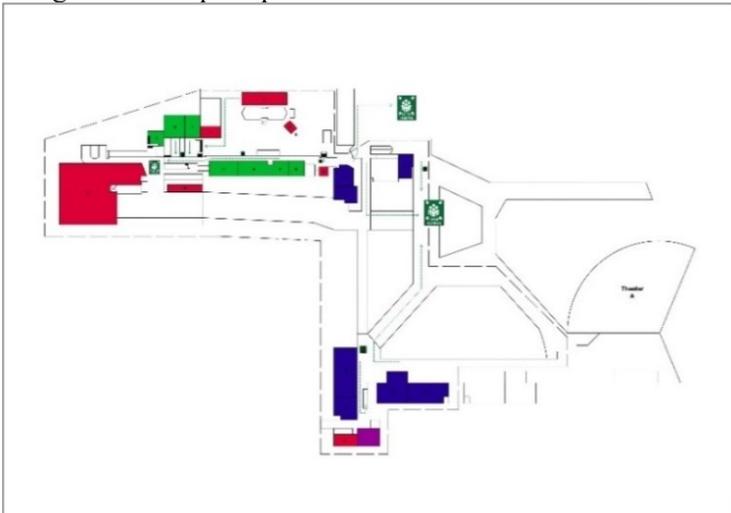
3.2 Studi Literatur

Studi Literatur dilakukan dengan mengumpulkan berbagai teori yang dapat menunjang pengerjaan Tugas Akhir seperti mencari data-data statistik mengenai pemakaian sumber energi fosil yang terus menipis, peluang-peluang sumber energi terbarukan, studi terhadap penelitian terdahulu yang berkaitan dengan desain microgrid berbasis tekno-ekonomi, komponen sistem microgrid, software HOMER beserta analisis ekonomi sistem.

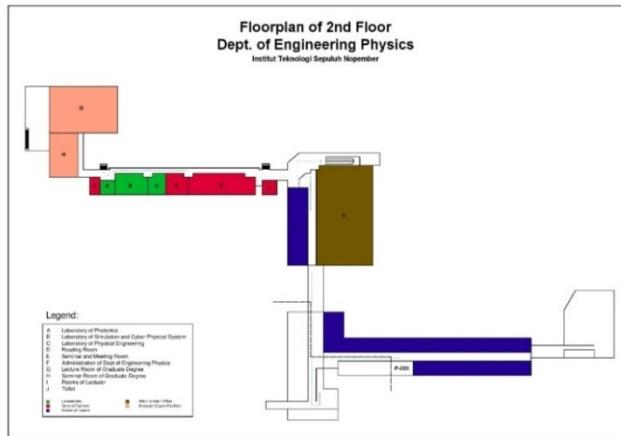
3.3 Pengambilan Data

3.3.1 Beban Listrik Departemen Teknik Fisika.

Kebutuhan listrik di Departemen Teknik Fisika bervariasi meliputi beban pencahayaan, beban pendinginan, komputer, dan komponen lain yang mendukung proses belajar mengajar. Departemen Teknik Fisika memiliki 26 ruangan dosen menempati lantai II, 9 laboratorium, dan beberapa ruang kelas pada gedung P dan C seperti pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Denah Lantai 1



Gambar 3.3 Denah Lantai 2

Pada lantai 1 ditunjukkan pada **Gambar 3.2** terdiri dari ruang kelas, laboatorium, sekretariat HMTF, mushola dan kantin. Pada lantai 2 ditunjukkan pada **Gambar 3.3** terdiri dari ruang dosen, TU, ruang kepala deartemen, ruang skertaris 1 dan 2, ruang sidanng, serta labolatorium. Ruangan atau area yang berada di lingkungan Departemen Teknik Fisika memiliki kebutuhan beban yang berbeda-beda oleh karena itu dilakukan survey profil beban untuk mengetahui energi yang dibutuhkan oleh tiap ruangnya, dengan menghitung jumlah komponen beban dan daya dari tiap komponen beban.

Metode pengambilan data dilakukan dengan survey lapangan untuk mengetahui waktu operasional perangkat pada setiap ruangan, kemudian dilakukan pengecekan konsumsi daya yang dapat dilihat pada spesifikasi perangkat listrik tersebut, serta dihitung banyaknya banyaknya perangkat tersebut. Metode pengambilan data tersebut mengacu pada beberapa penelitian sebelumnya yaitu pada [3], [28], [31] [32]. Beban total dapat dihitung menggunakan persamaan 2.11.

Total konsumsi energi harian Departemen Teknik Fisika dengan total kebutuhan energi harian pada weekday adalah 734,7 kWh/day yang ditunjukkan pada **Tabel 3.1**. Sedangkan total daya harian pada waktu weekend, adalah 44,59 kWh.

Table 3. 1 Total Konsumsi Energi Harian (*weekday*)

Waktu	Total daya (kWh)
00.00	4,268
01.00	4,268
02.00	4,268
03.00	4,268
04.00	4,268
05.00	4,268
06.00	4,268
07.00	57,2647
08.00	61,1257
09.00	90,7204
10.00	87,4064
11.00	77,4104
12.00	77,4104
13.00	72,5627
14.00	72,5627
15.00	41,014
16.00	35,086
17.00	3,746
18.00	4,868
19.00	4,868
20.00	4,697
21.00	4,697
22.00	4,697
23.00	4,697
Total daya harian	734,7094

3.3.2 Ketersediaan Sumber Energi Terbarukan

Informasi wilayah diperlukan untuk dapat mengetahui situasi, cuaca, serta kondisi Departemen Teknik Fisika yang mendukung implementasi sistem microgrid. Departemen Teknik Fisika berada di Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang merupakan Perguruan Tinggi Negeri yang berlokasi di kota Surabaya yang berada pada latitude -7.2836 dan longitude 112.79.

Ketersediaan sumber daya energi terbarukan dapat diperoleh dari data informasi wilayah tersebut pada [2]. Potensi sumber energi terbarukan harus diketahui terlebih dahulu untuk kemudian dapat ditentukan sumber energi yang akan dipakai dalam sistem microgrid. Berikut dijabarkan potensi sumber energi terbarukan

dari pemanfaatan radisi sinar mathari dan kecepatan angin yang ada pada daerah Departemen Teknik Fisika.

1. Radiasi Matahari

Departemen Teknik Fisika ITS yang berada pada kota Surabaya memiliki potensi radiasi sinar matahari yang baik guna dapat dimanfaatkan pada sistem microgrid. **Gambar 3.4** menunjukkan data *clearness index* bulanan yang menunjukkan proporsi dari radiasi matahari yang sampai kebumi dan dapat dimanfaatkan sebagai PLTS dengan sistem microgrid.

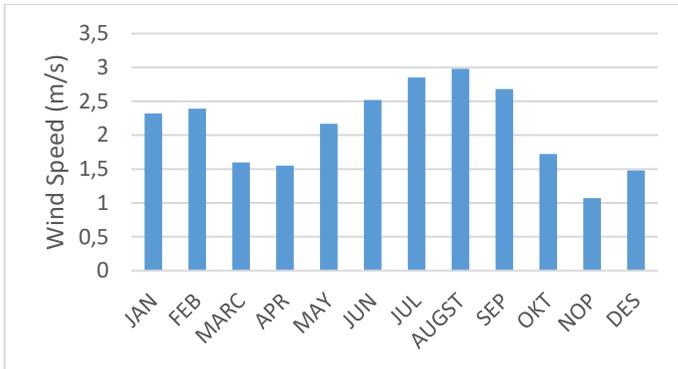


Gambar 3. 4 Grafik *Clearness index* pada Departemen Teknik Fisika

Data diperoleh dari Website NASA yang merangkum keadaan atmosfer didunia. Data ini kemudian digunakan untuk keperluan simulasi sistem microgrid pada perangkat lunak HOMER. Dari **Gambar 3.4** diketahui bahwa rata-rata *clearness index* satu tahun sebesar 0,52 sedangkan untuk rata-rata radiasi harian sebesar 5,17 kWh/m²/day.

2. Kecepatan Angin

Menurut [5] kecepatan angin yang sesuai untuk kinerja sistem pembangkit listrik tenaga angin adalah 3 m/s – 5 m/s. Sedangkan di Surabaya, tepatnya pada implementasi pembangkit nantinya berdasarkan data kecepatan angin yang diambil dari website NASA, Surabaya memiliki kecepatan angin yang dibawah dari nilai tersebut yaitu kecepatan angin rata-rata didaerah Departemen Teknik Fisika sebesar 2,11 m/s. sehingga kecepatan angin sebagai sumber energi dari PLTA kurang berpotensi pada daerah Departemen Teknik Fisika.



Gambar 3. 5 Kecepatan Angin Setiap Bulan

Dari **Tabel 3.2** dan **Gambar 3.5** dapat diketahui rata-rata kecepatan angin tiap bulan di Departemen Teknik Fisika sebesar 2,11 m/s. Kecepatan tersebut kurang dari kecepatan yang disarankan untuk kebutuhan pembangkit listrik, maka sumber energi terbarukan yang dipakai sistem microgrid pada tugas akhir ini adalah radiasi sinar matahari atau sistem PLTS.

3.4 Sistem Sumber Daya Terbarukan yang Digunakan

Dari data sumber energi terbarukan diatas maka dalam tugas akhir ini menggunakan sumber energi dari radiasi matahari sebagai salah satu sumber energi pada sistem microgrid. Hal ini dikarenakan untuk kecepatan rata-rata angin yang berada pada lokasi Departemen Teknik Fisika kurang disarankan untuk dijadikan sistem pembangkit.

3.5 Sizing Komponen Sistem Microgrid

Dalam pemenuhan kebutuhan listrik Departemen Teknik Fisika baik dalam kondisi *on grid* maupun *off grid*, maka dilakukan sizing komponen yang terdiri dari PV, baterai, *converter*, dan diesel untuk mendapatkan ukuran komponen terbaik. Size komponen-komponen tersebut kemudian dijadikan parameter *input*, untuk selanjutnya di simulasikan pada HOMER.

1. PV

Pemilihan PV didasari pada ketersediaan PV dipasaran. Indonesia memiliki produsen PV yaitu PT. LEN yang menyediakan PV dengan kapasitas mulai dari 50 Wp sampai dengan 260 Wp dengan tipe *polycrystalline* dan *monocrystalline*. Tipe PV *monocrystalline* memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan PV *polycrystalline*.

Maka dari itu dipilih PV LEN 200 WP, spesifikasi mengenai PV dapat dilihat pada **Tabel 3.2**. Informasi mengenai harga awal (*initial capital*), biaya pemasangan, dan biaya perawatan (*operation & mantainance cost*), *lifetime* dan *derating factor* dijadikan *input* pada HOMER. Harga satuan PV LEN 200 WP 24 V Eff 15% *Monocrystalline* dengan kapasitas 200 Watt adalah Rp.3.849.000, biaya pemasangan sebesar Rp. 1.000.000. *Lifetime* PV yaitu 25 tahun.

Table 3. 2 Spesifikasi Modul PV LEN 200 WP *Monocrystalline*

Model	LEN 200 WP <i>Monocrystalline</i>
<i>Maximum Power at STC</i>	200 W
<i>Maximum Power Voltage</i>	37,53 V
<i>Maximum Power Current</i>	5,35 A
<i>Open Circuit Voltage</i>	44,2 V
<i>Short Circuit Current</i>	5,50 A
<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>	45 ± 2 °C
<i>Temperateture Coefficient of Power</i>	-0,41 %/°C
<i>Dimensions</i>	1576 X 806 X 50 mm

2. Jaringan Listrik PLN

Tarif tenaga listrik yang disediakan oleh PLN mengacu pada Peraturan Menteri (Permen) ESDM NO. 28 Tahun 2016. Penetapan tarif tenaga listrik untuk bulan januari sampai maret tahun 2019 adalah Rp. 1.467,28. Dikarenakan tarif listrik selalu berubah-ubah maka Input pembelian listrik pada HOMER divariasikan yaitu Rp. 1.352 Rp. 1.467,28; Rp. 1.500.

3. Baterai

Energi yang dihasilkan dari PV disimpan pada baterai untuk pasokan daya ketika tidak adanya aliran listrik PLN. Baterai mampu menyimpan daya masukan DC dari PV dan memiliki batas

untuk dapat diisi (*charge*) dan *discharge*. Baterai harus mampu memenuhi kebutuhan arus (Ah) pada beban.

Baterai yang digunakan adalah Luminous 12V 200AH @20HR RATE SMF Deep Cycle Battery, dengan kapasitas 2,4 kWh untuk setiap baterainya dengan harga Rp. 4.100.000 dengan biaya penggantian (*replacement*) sebesar Rp. 4.100.000. Baterai tersebut memiliki *lifetime* 5 tahun.

4. Inverter

Inverter yang digunakan pada sistem memiliki kapasitas 4 kW dengan biaya awal sebesar Rp. 9.001.626. Biaya penggantian komponen (*replacement*) sebesar Rp. 4.000.000.

Pemilihan inverter berdasarkan ketersediaan inverter dipasaran dan referensi [34] menetapkan kapasitas inverter yang digunakan dengan menghitung daya maksimum keluaran sel surya, [34] memiliki beban puncak sebesar 37 kWp, sehingga peneliti menggunakan inverter dengan kapasitas 50 kW. Pada Tugas Akhir ini daya maksimum keluaran sel surya setiap string adalah 3,8 kWp, maka dipilih inverter dengan kapasitas 4 kW.

3.5.1 Penentuan kapasitas PV off grid

Telah diketahui pada **Tabel 3.1** bahwa total energi yang dibutuhkan Departemen Teknik Fisika untuk setiap harinya adalah 734,7094 kWh/day. Berdasarkan ketersediaan dipasaran maka pada tugas akhir ini PV yang akan digunakan adalah PV LEN 200 Wp *monocrystalline* dengan spesifikasi pada Tabel 3.3.

Hasil Simulasi dan optimisasi HOMER akan menyajikan adalah kapasitas PV yang dibangkitkan. Maka akan dihitung daya keluaran PV dengan menggunakan persamaan 2.3. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi daya keluaran yang dihasilkan oleh modul PV, yaitu *derating factor*.

Dengan mempertimbangkan temperatur lingkungan, maka temperatur efektif PV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.4 dengan nilai temperatur ambient/lingkungan Surabaya adalah 35 °C, temperatur cell pada normal operating test condition (NOCT) adalah 45°C dan temperatur ambient pada NOCT adalah 20°C, intensitas radiasi matahari pada kondisi

NOCT adalah $0,8 \text{ kW/m}^2$, nilai η_c merupakan efisiensi PV dan $\tau\alpha$ adalah kemampuan PV untuk dapat menyerap radiasi cahaya matahari. Tingkat penyerapan panel surya merupakan rasio antara radiasi total yang terserap oleh panel surya terhadap radiasi total yang mengenai permukaan panel surya. Pada kondisi normal, panel surya harus mampu menyerap setidaknya 90% dari radiasi matahari yang mengenainya [33].

$$\begin{aligned} T_{cell} &= T_{amb} + S \left(\frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{T,NOCT}} \right) \times \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau\alpha} \right) \\ &= 35 + 1 \left(\frac{47 - 20}{0,8} \right) \times \left(1 - \frac{15\%}{90\%} \right) \\ &= 62,08^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Setiap kenaikan suhu diatas 25°C maka akan terjadi penurunan daya sebesar $0,41\% / ^\circ\text{C}$, maka daya keluaran PV adalah:

$$P_{PV} = 200 \times \left(1 - 0,0041 \times (63,5 - 25) \right) = 169,59 \text{ Watt}$$

Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu lingkungan Surabaya bernilai 35°C maka daya keluran dari PV adalah 169,59 Watt, apabila dipersentasekan PV hanya mengeluarkan daya 84,79% maka faktor temperatur dapat mengurangi daya keluaran PV sebesar 15,21% dari keluaran PV semestinya (100%). Selain temperatur terdapat faktor lain yang mempengaruhi keluaran Pv yang disebut derating factor ditunjukkan pada Tabel 3.3

Table 3. 3 Derating factor

Losses	
Pengkabelan (2-5%)	2%
Temperatur (5-15%)	15%
Shading (0 - 40%)	2%
Weak irradiation (3 - 7%)	3%
Inverter (5 - 15%)	5%
Debu (2%)	2%
Performance ratio	0,737212

Sehingga PV area dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.5 dengan estimasi beban 909 kWh, derating factor 73,72, Iradiasi matahari 5,17 kWh.m².day, dan efisiensi PV sebesar 15%

$$PV_{\text{area}} = \frac{E_L}{G_{\text{av}} \times \text{derating factor} \times \eta_{\text{PV}} \times \eta_{\text{out}}}$$

$$PV_{\text{area}} = 1674,3$$

Dapat dihitung daya yang dibangkitkan PLTS (Wattpeak) dengan menggunakan persamaan 2.6 *Peak Sun Insolation* (PSI) adalah 1000W/m² dan efisiensi panel surya adalah 15%

$$P_{\text{wattpeak}} = PV_{\text{area}} \times \text{PSI} \times \eta_{\text{PV}}$$

$$P_{\text{wattpeak}} = 1674,3 \times 1000 \times 15$$

$$P_{\text{wattpeak}} = 205,4 \text{ kWp}$$

Dari P_{wattpeak} dapat dihitung banyaknya *photovoltaic* yang dibutuhkan

$$n_{\text{pv}} = \frac{P_{\text{wattpeak}}}{200}$$

$$= 1253 \text{ unit PV}$$

Selain itu banyaknya PV juga dapat dihitung dari luas satuan PV, PV yang digunakan memiliki luas sebesar 1,27 m² dan setiap satu PV akan menghasilkan 726,07 W. Sehingga beban dibagi dengan output PV akan diperoleh banyaknya PV sebanyak 1253 unit PV.

3.5.2 Penentuan sizing baterai untuk sistem *off grid*

Penentuan ukuran baterai berdasarkan ketersediaan pasar serta disesuaikan dengan kebutuhan *ampere-hours* (Ah) pada Departemen Teknik Fisika. Kebutuhan *ampere-hours* dapat dihitung dengan persamaan 2.8. Maka akan diperoleh kebutuhan Ah/day sebesar 22419,805 Ah/day.

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi penentuan jumlah baterai yang akan digunakan, yaitu *Depth of Charge* dan *days of storage* dapat dilihat pada **Tabel 2.2**. Maka banyaknya baterai paralel dan seri yang akan digunakan pada sistem microgrid dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.9 dan 2.10.

Apabila baterai yang digunakan 12V-200Ah, maka jumlah baterai yang dibutuhkan adalah 808 unit baterai dengan string 24 V

3.5.3 Sizing Inverter

Pemilihan Inverter berdasarkan pada nilai P_{mpp} atau daya keluaran maksimum panel [34]. Kemudian dipilih inverter yang memiliki kapasitas lebih besar dari daya keluaran maksimum panel. Nilai P_{mpp} adalah 3,8 kW maka dipilih inverter Luminous 4 kW. Pemilihan kapasitas inverter lebih tinggi dari pada P_{mpp} dikarenakan untuk alasan keamanan.

3.6 Variasi Skenario Sistem Microgrid

Simulasi sistem microgrid dibagi menjadi 2 yaitu pada keadaan *on grid* dan *off grid*, untuk *on grid* hasil simulasi HOMER akan dibandingkan dengan kondisi Departemen Teknik Fisika saat ini yang hanya menggunakan sistem *grid*. pemenuhan kebutuhan dilakukan berdasarkan variasi berikut ini :

1. 100% PLN
2. 100% PV (PV + Baterai)
3. Hybrid PLN + PV
4. Hybrid PV + Genset

3.7 Simulasi

Proses simulasi dapat dijabarkan seperti **Gambar 3.6**. Lokasi dan data beban yang digunakan sebagai *inputan* yaitu Departemen Teknik Fisika. Kemudian, ditambahkan komponen seperti PV, Grid, Baterai, *converter*, dan controller. Tiap komponen memiliki variable tertentu untuk dilakukan peng-*inputan* seperti harga, kapasitas, serta jumlah komponen yang diinginkan. Serta dilakukan *input* variabel sensitifitas, untuk analisis sensitifitas sistem yang telah dibuat.



Gambar 3. 6 Proses Simulasi

3.8 Pengambilan Keputusan

Setiap variasi sistem microgrid yang telah disimulasikan, pada hasil simulasi akan diperoleh nilai *Net Present Cost* (NPC) sebagai total biaya yang dikeluarkan selama masa hidup sistem. Dilakukan pengambilan keputusan ketika salah satu variasi sistem NPC mencapai harga terendah, maka akan dilanjutkan ke proses selanjutnya yaitu analisis ekonomi berupa analisis sensitifitas, *multi-year analysis*, serta karakteristik NPC dari sistem tersebut.

Tiap sistem yang didesain dilakukan analisis tekno-ekonomi dengan memperhitungkan total Net Present Cost (NPC) untuk mengetahui sistem yang memiliki keuntungan terbesar dan sesuai dengan kebutuhan Departemen Teknik Fisika. Dalam menentukan sistem yang optimal maka dapat dilihat dari besarnya nilai NPC, sistem yang optimal memiliki nilai NPC yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem yang lain. Pengambilan keputusan “Ya” dilakukan ketika NPC salah satu sistem dari semua yang disimulasikan mencapai harga terendah.

Analisis sensitifitas dilakukan untuk menyiapkan biaya cadangan apabila terjadi perubahan dalam suatu sistem di masa mendatang. Analisis sensitifitas dilakukan dengan memasukkan range nilai untuk tiap variabel komponen yang ingin diketahui kemungkinan-kemungkinannya untuk yang akan datang.

3.9 Kesimpulan dan Penyusunan Laporan

Dilakukan pembahasan dan untuk menjawab tujuan, maka diambil kesimpulan dengan penyusunan dan penulisan laporan adalah tahap akhir dari metodologi. Pada tahap ini seluruh hasil dan kesimpulan yang didapatkan disusun dalam bentuk laporan akhir.

Halaman ini sengaja dikosongkan

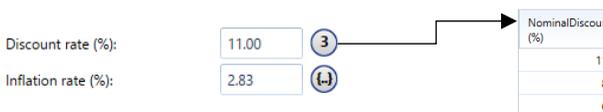
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dilakukan simulasi dan optimasi untuk mengetahui kemungkinan pengadaan sistem pembangkit untuk dapat memenuhi kebutuhan listrik disuatu wilayah secara ekonomis dan efektif dengan menggunakan perangkat lunak HOMER, sistem pembangkit yang dimaksud adalah sistem pembangkit yang memiliki sumber energi berasal dari energi baru terbarukan maupun energi fosil (diesel, PLN), kedua sumber energi tersebut dapat dimanfaatkan kedalam sistem micogrid. Pada wilayah yang telah terhubung dengan jaringan listrik PLN dapat dibangun sistem microgrid dengan kondisi on grid, di mana kebutuhan listrik dapat dilakukan dengan memanfaatkan kedua sumber energi (PLN dan EBT). Studi kasus tugas akhir ini difokuskan ke wilayah Departemen Teknik Fisika yang telah terhubung dengan PLN.

Pada tugas akhir ini telah dilakukan simulasi secara *on grid* dan *off grid*, untuk mengetahui seberapa ekonomis dan efektif sistem tersebut diadakan di Departemen Teknik Fisika, sistem *on grid* akan dibandingkan dengan kondisi Departemen Teknik Fisika saat ini yang tanpa menggunakan sumber energi terbarukan. pemenuhan kebutuhan dilakukan berdasarkan variasi berikut ini :

1. 100% PLN
2. 100% PV (PV + Baterai)
3. hybrid PV + PLN
4. hybrid PV + Genset

Pada tugas akhir ini juga dilakukan pertimbangan discount rate dan inflasi. Discount rate divariasikan yaitu 8% dan 11%. Berdasarkan data inflasi dari Bank Indonesia nilai inflasi Indonesia pada april 2019 adalah 2,83 %, sedangkan *discount rate* adalah 8% dan 11 %



Gambar 4. 1 *Discount Factor* dan Inflasi

Pertimbangan kedua nilai tersebut digunakan untuk mengetahui nilai yang akan datang yang dikonversikan oleh discount rate dan ditampilkan pada nilai sekarang. Pada umumnya nilai discount rate yang digunakan adalah 5%-10% [30]. Pada beberapa penelitian terdahulu discount rate yang digunakan di Indonesia sekitar 8%. Tekno ekonomi pada tugas akhir ini hanya berfokus pada kebutuhan listrik Departemen Teknik Fisika saja yang terdiri dari beberapa parameter yaitu :

1. Net present cost
2. capital cost (investari awal)
3. O&M (operational and maintenance)
4. salvage
5. Cost of Energy
6. replacement
7. simple payback return
8. discount payback return
9. Internal Rate of Return

4.1 Letak Geografis Departemen Teknik Fisika

Departemen Teknik Fisika terletak di Kota Surabaya , lokasinya berada pada *latitude* -7.2836 dan *longitude* 112.795. Departemen Teknik Fisika dipilih karena pemakaian listrik yang cukup tinggi serta beberapa kali terjadi pemadaman listrik yang dapat mengganggu kegiatan belajar mengajar. Untuk menanggulangi masalah tersebut, maka pengadaan sumber energi terbarukan merupakan salah satu solusinya.

Departemen Teknik Fisika memungkinkan untuk mengadakan sumber energi terbarukan. sumber energi yang berpotensi untuk dimanfaatkan di Departemen Teknik Fisika adalah sumber energi matahari, sumber energi matahari dipilih karena potensinya cukup besar dengan rata-rata *clearness index* satu tahun sebesar 0,52 sedangkan untuk rata-rata iradiasi harian sebesar 5,17 kWh/m²/day. Rata-rata iradiasi harian tersebut merupakan jumlah radiasi sinar matahari, difusi sinar matahari, dan pemantulan sinar matahari yang dapat menumbuk permukaan PV.

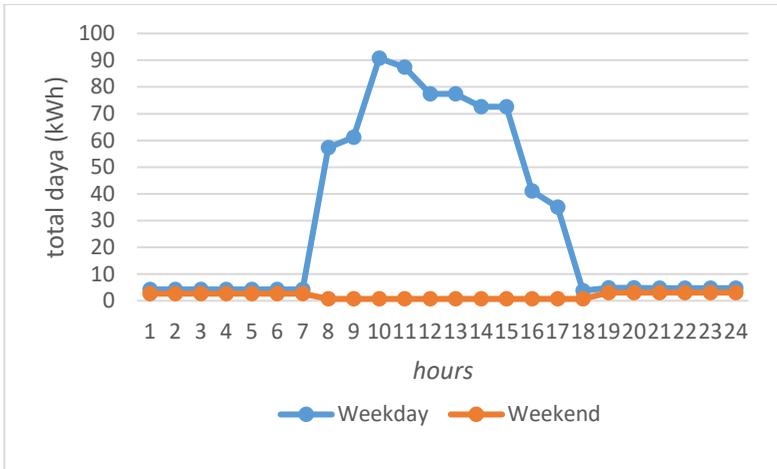
Untuk sumber energi lain yang ada pada Departemen Teknik Fisika adalah Sumber energi angin dan biomass.

Menurut [5] kecepatan angin yang sesuai untuk kinerja sistem pembangkit listrik tenaga angin adalah 3 m/s – 5 m/s. Sedangkan di Surabaya, tepatnya pada implementasi pembangkit nantinya berdasarkan data kecepatan angin yang diambil dari NASA, Surabaya memiliki kecepatan angin yang dibawah dari nilai tersebut yaitu kecepatan angin rata-rata didaerah Departemen Teknik Fisika sebesar 2,11 m/s. Sedangkan sumber energi biomass, tidak tersedia data biomass di Departemen Teknik Fisika, untuk mendapatkan data tersebut harus dilakukan kajian yang berfokus pada biomass di Departemen Teknik Fisika.

4.2 Beban Listrik Departemen Teknik Fisika

Profil beban harian Departemen Teknik Fisika ditunjukkan oleh Gambar 4.2. Data diperoleh dengan dilakukan survey lapangan untuk mengetahui waktu operasional perangkat pada setiap ruangan, kemudian dilakukan pengecekan konsumsi daya yang dapat dilihat pada spesifikasi perangkat listrik tersebut, serta dihitung banyaknya banyaknya perangkat tersebut. Metode pengambilan data tersebut mengacu pada beberapa penelitian sebelumnya yaitu pada [3], [28], [31] [32]. Data beban tersebut kemudian dijadikan acuan sistem perencanaan dan analisis tekno-ekonomi dari suatu sistem pembangkit. Berikut ini merupakan beban harian Departemen Teknik Fisika yang dikelompokkan dari *weekday* dan *weekend*.

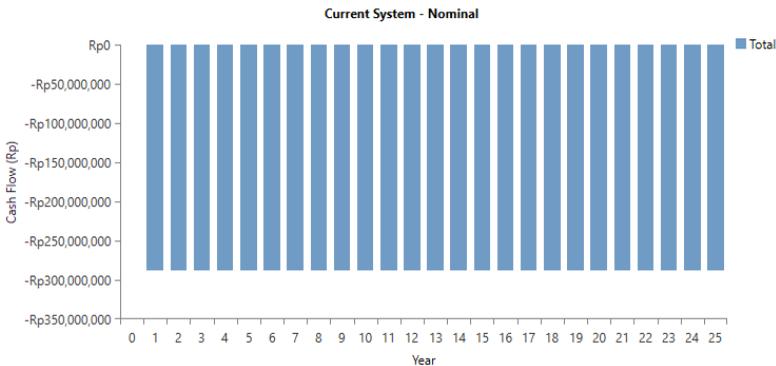
Total beban harian pada *weekday* adalah 734,7094 kWh, sedangkan total daya harian pada waktu *weekend*, adalah 44,59 kWh. Maka rata-rata kebutuhan harian Departemen Teknik Fisika adalah 538,07 dengan beban puncak sebesar 145,8 dan *load factor* 0,15. Profil beban Departemen Teknik Fisika ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Profil Beban Harian Departemen Teknik Fisika

4.3 Hasil On grid (100% PLN)

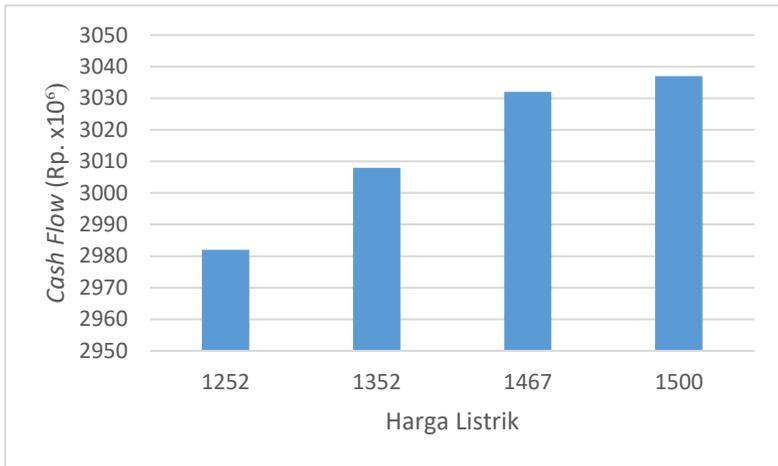
Pemenuhan kebutuhan beban dilakukan dengan supply sepenuhnya oleh PLN. ITS merupakan konsumen golongan 4 dengan biaya yang harus dibayar untuk setiap pembelian kWh adalah Rp. 1467. Maka pembelian listrik setiap tahunnya untuk memenuhi kebutuhan listrik Departemen Teknik Fisika sebesar 196.397 kWh/tahun. Dengan pembelian listrik setiap tahun sebesar Rp. 288 Juta yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Cash Flow 100% PLN

4.3.1 Analisis Sensitifitas Biaya Listrik

Telah diketahui bahwa sistem PV-Grid merupakan sistem yang paling optimal untuk dapat memenuhi kebutuhan Departemen Teknik Fisika, namun terdapat beberapa kemungkinan yang akan terjadi pada sistem tersebut salah satunya adalah faktor perubahan harga listrik. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari naiknya harga listrik terhadap NPC sistem.



Gambar 4. 4 Grafik Dampak Perubahan Harga Listrik terhadap NPC

Dampak dari perubahan harga listrik terhadap biaya NPC diperlihatkan pada **Gambar 4.4**. Semakin tinggi harga listrik maka NPC juga akan semakin meningkat, hal ini dikarenakan harga beli daya listrik mempengaruhi biaya operasional yaitu pembelian listrik, sehingga meningkatnya biaya operasional maka akan disertai dengan meningkatnya NPC.

4.4 Hasil *Off grid* (100% PV)

Pada tugas akhir ini beban listrik Departemen Teknik Fisika dengan rata-rata beban yaitu 538,07 kWh yang terdiri dari beban weekday adalah 734 kWh dan weekend 44 kWh, untuk mengantisipasi pertambahan beban yang akan terjadi kedepannya maka dilakukan beban dikalikan dengan 30% serta untuk

mengantisipasi rugi-rugi sistem maka beban total dan beban cadangan dikalikan dengan rugi-rugi sistem, rugi-rugi sistem diasumsikan 30%. Sehingga estimasi kebutuhan energi listrik Departemen Teknik Fisika sebesar 909,34 kWh/hari yang ditunjukkan pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Estimasi Kebutuhan Energi Listrik DTF

Beban	Beban (kWh)
<i>Rata-rata beban</i>	538,07
<i>Cadangan Energi (30%)</i>	161,42
<i>Total</i>	699,49
<i>Rugi-rugi sistem (30%)</i>	209,84
<i>Jumlah Total beban</i>	909,34

Untuk dapat memenuhi kebutuhan Departemen Teknik Fisika dengan Supply 100% PV maka dilakukan perhitungan PV yang dibutuhkan berdasarkan potensi radiasi matahari 5,17 kWh/m²/day serta luasan PV sebesar 1,27 m² ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 2 *Derating factor*

	Losses
Pengkabelan (2-5%)	2%
Temperatur (5-15%)	15%
Shading (0 - 40%)	2%
Weak irradiation (3 - 7%)	3%
Inverter (5 - 15%)	5%
Debu (2%)	2%
Performance ratio	0,737212

Tabel 4. 3 Total energi yang dibangkitkan tiap PV

Luas satuan PV (from spec)	1,27	m ²
Efisiensi PV (from spec)	15%	%
Rata-rata irradasi	5,07	kWh/ m ² .day
Total energi yang dihasilkan	712,0253	Wh/day/panel

Tabel 4. 4 Total PV

Parameter	Jumlah
Beban (kWh)	909,34
Energi yg dihasilkan PV (Wh)	726,069
Total jumlah PV (unit)	1253
PV area (m²)	1674,3
P_{mpp} (wattpeak)	250,4

Pada Tabel 4.4 ditunjukkan PV area 1674,3 m² yang diperoleh dari hasil pembagian antara total beban dengan derating factor, rata-rata iradiasi, efisiensi PV dan efisiensi inverter yang dapat dilihat pada persamaan 2.5, maka untuk dapat memenuhi kebutuhan beban sebesar 909,34 kWh dibutuhkan daya yang dibangkitkan oleh sistem sebesar 250,4 kWp. Sehingga banyaknya panel yang akan dipasang adalah $250,4 : 200 = 1253$ unit panel surya.

Jumlah panel surya dibagi menjadi 66 rangkaian, setiap rangkaian terdiri dari 19 panel surya yang dipasang seri dan paralel panel surya yang digunakan yaitu LEN dengan spesifikasi $V_{mpp} = 37,54$ V, $I_{mpp} = 5,35$ A dan $P_{mpp} = 200$ Wp per panel surya.

- V_{mpp} array adalah $37,53$ V x $1 = 37,53$ V
- I_{mpp} array adalah $5,35$ A x $19 = 101,65$ A

Maka P_{mpp} array adalah $37,53$ V x $101,65$ A = $3814,9$ W untuk 1 rangkaian (string). Apabila terdapat 66 rangkaian, maka $66 \times 3814,9$ W = $251,7$ kWp. Tiap rangkaian terhubung oleh inverter 4,4 kWp. Pemilihan inverter melebihi dari daya yang dibangkitkan oleh PV (P_{mpp}) berdasarkan alasan *safety factor* serta Baterai yang dibutuhkan sebesar 808 unit.

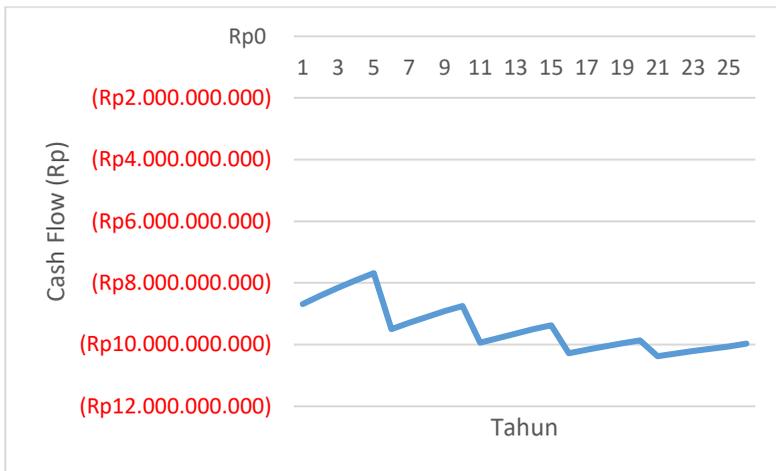
Analisis Tekno-Ekonomi

Analisis tekno ekonomi menggunakan discount rate sebesar 6%, 8%, dan 11%. Pada sistem 100% PV maka biaya yang dikeluarkan selama masa proyek ditampilkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 5 NPC setiap discount rate

Discount Rate	life cycle cost (NPC)
6	Rp. $17,0 \times 10^9$
8	Rp. $15,4 \times 10^9$
11	Rp. $13,7 \times 10^9$

Apabila dibandingkan dengan sistem 100% PLN maka untuk sistem 100% PV tidak lebih menguntungkan karena biaya (NPC) PLN hanya sebesar Rp. 4.049.420.000, hal ini dapat ditunjukkan oleh gambar 4.5. *Payback periode* akan terjadi ketika selisih antara kedua sistem bernilai 0, namun sistem aliran kas (cash flow) 100% PV tidak dapat memotong sumbu x (Rp 0). Sehingga *payback periode* tidak dapat dipenuhi selama 25 tahun.

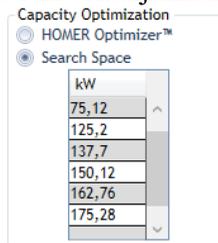
**Gambar 4. 5** Grafik cash flow 100% PV minus 100% grid

4.5 Hasil *On grid* (Hybrid PLN + PV)

Skenario sistem *on grid* yang diadopsi dari beberapa jurnal yaitu pada referensi [35]. Diperoleh simulasi sistem *on grid* berupa kapasitas komponen yang disarankan untuk pembangunan sistem dengan biaya total proyek atau *net present cost* terendah.

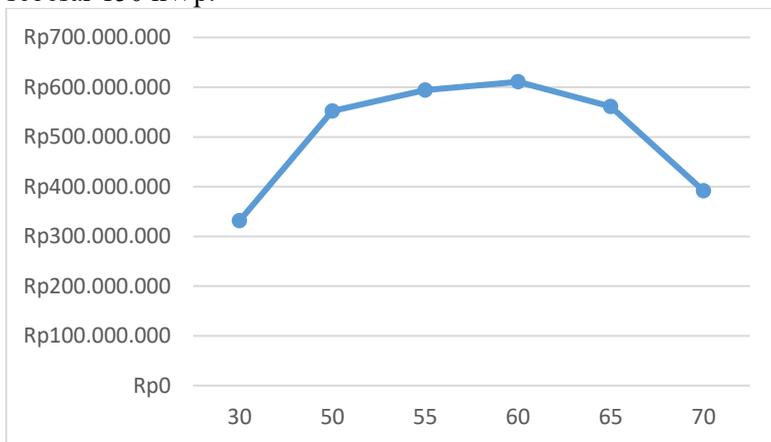
Simulasi dilakukan dengan melakukan input kapasitas PV yaitu P_{mpp} yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Dimana kapasitas PV divariasikan sebagai berikut :

1. 30% PV + 70% PLN ditunjukkan oleh 75,12 kWp
2. 50% PV + 50% PLN ditunjukkan oleh 125,2 kWp
3. 55% PV + 45% PLN ditunjukkan oleh 137,7 kWp
4. 60% PV + 40% PLN ditunjukkan oleh 150,12 kWp
5. 65% PV + 35% PLN ditunjukkan oleh 162,76 kWp
6. 70% PV + 30% PLN ditunjukkan oleh 175,28 kWp



Gambar 4. 6 Kapasitas Hybrid PV dan PLN

Diperoleh Selisih biaya selama 25 tahun (NPC) anatar 100% PLN dengan variasi sistem yang ditunjukkan pada gambar menunjukkan bahwa sistem desain hybrid PLN + PV yang paling optimal pada variasi 60% PV + 40% PLN dengan kapasitas PV sebesar 150 kWp.



Gambar 4. 7 Grafik Selisih NPC PLN dan setiap variasi sistem

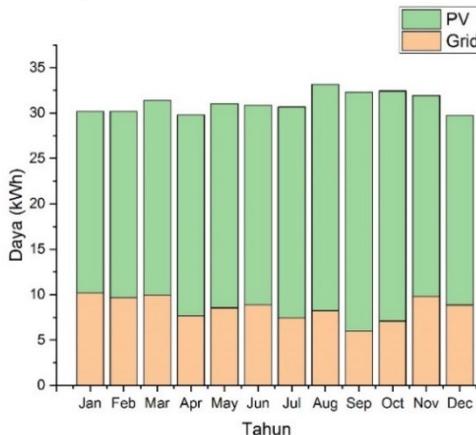
Pada *discount factor* 8% dan 6% sistem yang paling optimal adalah menggunakan kapasitas PV 150 kW dengan jumlah panel sebanyak 750 panel PV, jaringan listrik PLN, serta inverter 92,4 kW.

4.5.1 Analisis Teknis 60% PV + 40% PLN

Untuk mengetahui susunan rangkaian PV pada kondisi real maka telah diketahui bahwa jumlah modul untuk dapat memenuhi kebutuhan listrik Departemen Teknik Fisika dengan rata-rata konsumsi daya setiap hari sebesar 538,075 kWh/day adalah 750 panel surya yang kemudian akan dibagi menjadi 50 string, setiap string terdiri dari 15 modul sel surya disusun seri. Dengan mengetahui tegangan maksimum PV yaitu 37,53V dan arus maksimum PV yaitu 5,35A.

- V_{mpp} array adalah $37,53 \text{ V} \times 1 = 37,53 \text{ V}$
- I_{mpp} array adalah $5,35 \text{ A} \times 15 = 80,25 \text{ A}$

Diperoleh P_{mpp} sebesar 3011,7 W, maka total daya yang dihasilkan oleh sistem PLTS 50 string adalah 150 kW. dengan kapasitas PV tersebut, PV mampu memenuhi kebutuhan sebesar 60%, sedangkan 40% dipenuhi oleh PLN.

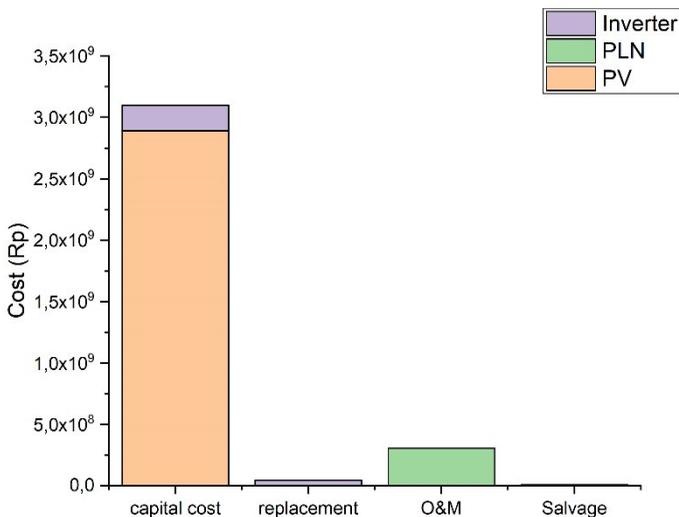


Gambar 4. 8 Rata-rata Produksi Listrik pada Setiap Bulan

Produksi listrik sistem PV-Grid ditunjukkan pada Gambar 4.8. Gambar 4.8 menunjukkan bahwa PV memiliki intensitas produksi listrik relatif lebih tinggi dibandingkan dengan listrik yang diperoleh dari pembelian pada PLN setiap bulannya. Pembelian listrik pada PLN dilakukan karena PV tidak sepenuhnya mampu memproduksi listrik untuk pemenuhan kebutuhan listrik, sehingga sistem perlu suply listrik tambahan yang diperoleh dari pembelian listrik pada PLN.

4.5.1 Analisis Tekno-Ekonomi 60% PV + 40% PLN

Selama masa proyek (25 tahun) biaya yang dikeluarkan untuk setiap komponen sistem 60% PV + 40% PLN ditunjukkan oleh Gambar 4.9



Gambar 4.9 Net Present Cost by Cost type

Sistem dengan komponen PV-Grid dapat dibangun dengan biaya investasi awal (*initial capital*) yang cukup tinggi yaitu Rp.3.096.975.863, dengan biaya operasi sistem tersebut sangat rendah yaitu Rp. 24.310.480 mengingat jangka waktu (*lifetime*) sistem tersebut adalah 25 tahun. Tabel 4.7 menunjukkan parameter-parameter yang ditentukan dalam pertimbangan dilakukannya pengadaan PLTS.

Tabel 4. 6 Cost Summary 60% PV + 40 % PLN selama 25 tahun

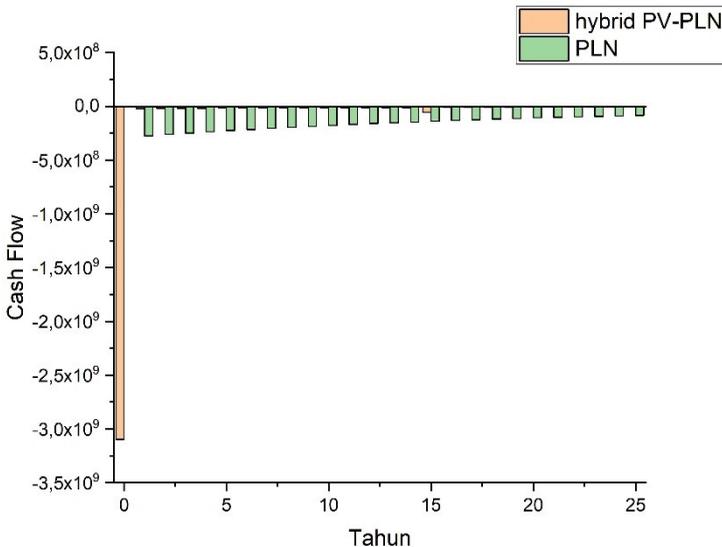
Komponen	Capital cost (Juta)	replacement (Juta)	O&M (Juta)	salvage (Juta)	Total (Juta)
PV (Rp)	2889	0	0	0	2889
PLN(Rp)	0	0	306	0	306
Inverter	207	44,26	0	9	243
System	3096	44,26	306	9	3438

Pada Tabel 4.6 diketahui bahwa biaya-biaya yang digunakan sistem selama 25 tahun dengan rincian sebagai berikut:

- Biaya investasi awal PV sebesar Rp.2.889.000.000 yang sudah termasuk dengan biaya pemasangan dan *maintenance*, estimasi biaya pemasangan untuk satu PV yaitu Rp.440.000 dan *maintenace* Rp.200.000 setiap 6 bulan
- Biaya investasi awal inverter beserta 8 baterai sebesar Rp.207.000.000, untuk biaya penggantian baterai inverter sebesar Rp.44.260.000.
- Biaya pembelian listrik ke PLN yaitu Rp.306.000.000

Maka total biaya yang dikeluarkan untuk 25 tahun adalah Rp.3.348.000.000.

Setelah dilakukan investasi awal setiap tahunnya Sistem 60%PV + 40%PLN mengeluarkan biaya operasional untuk pembelian listrik pada grid sebesar Rp. 21.803.784. Pada tahun ke 15 ditunjukkan cash flow yang mengalami penurunan, hal ini dikarenakan adanya penggantian inverter sebesar Rp.44.265.881. Pada tahun ke-25 atau tahun akhir sistem terdapat nilai sisa atau *salvage* sebesar Rp.8.993.091, nilai ini diperoleh dari sisa komponen sistem yang pada akhir tahun proyek masih dapat digunakan. Sedangkan untuk sistem grid saja, tidak terdapat biaya investasi awal, hanya biaya operasional setiap tahun untuk pembelian listrik pada grid sebesar Rp. 288.114.928.

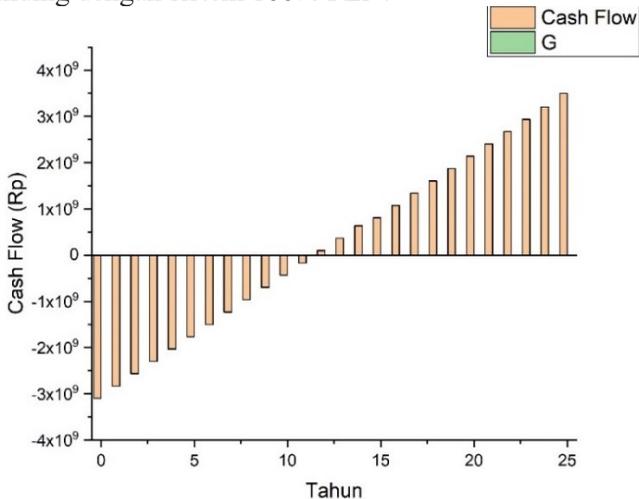


Gambar 4. 10 Grafik *Cash Flow Annual* sistem PV-grid dan sistem grid

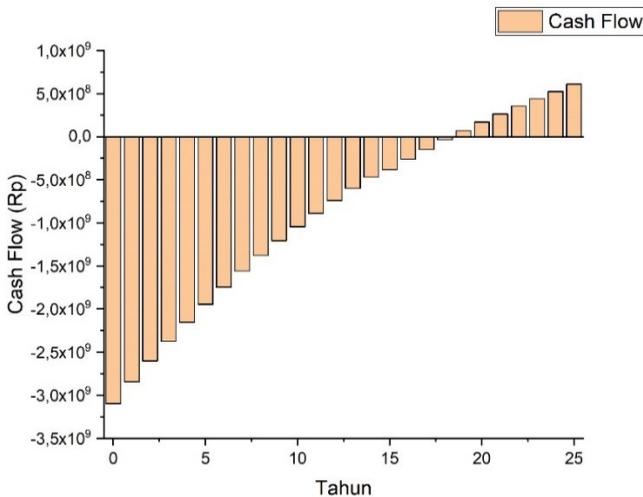
Untuk melihat bahwa sistem PV-grid merupakan sistem paling optimal maka dibandingkan dengan kondisi Departemen Teknik Fisika saat ini yang hanya menggunakan grid atau aliran listrik dari PLN saja. Sistem yang menggunakan aliran listrik hanya dari PLN memiliki NPC sebesar Rp. 4.049.420.000. Nilai tersebut menunjukkan biaya total proyek selama 25 tahun.

Berdasarkan perhitungan ditunjukkan bahwa sistem 60% PV + 40% PLN dapat menghemat biaya sebesar Rp. 610.762.900 selama 1 kali masa proyek (25 tahun). Sistem yang hanya menggunakan grid saja mengeluarkan biaya 15 % lebih besar dibandingkan sistem PLN saja. Hal tersebut disebabkan oleh produksi PV dengan kapasitas sebesar 150 kW yang mana terdiri dari 750 panel PV dengan 50 string dan setiap sting terdapat 15 panel dapat mencukupi 60% kebutuhan listrik Departemen Teknik Fisika, sehingga pembelian listrik PLN tidak terlalu besar hal ini dapat dilihat pada pengeluaran pembelian listrik setiap tahunnya sebesar Rp. 21.803.784. Hal ini mengakibatkan NPC dari sistem PV-Grid lebih rendah dibandingkan dengan sistem Grid saja.

Gambar 4.11 menunjukkan grafik cumulative *nominal cash flow* sistem 60%PV + 40%PLN dikurangi dengan sistem 100% PLN. *Nominal cash flow* merupakan aliran kas sistem yang tidak dipengaruhi oleh inflasi dan *discount rate*. Pada awal tahun proyek sistem memerlukan biaya investasi sehingga *cash flow* bernilai negatif sampai tahun ke 10. *Simple payback* ditunjukkan ketika garis cashflow memotong sumbu x pada 0, dimana pada masa proyek tahun ke 11,63 *cash flow* memotong di sumbu x sebesar 0, hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat mengembalikan biaya investasi awal. Aliran kas tidak lagi bernilai negatif. Pada tahun ke-11. Sistem 60%PV + 40%PLN pada tahun ke 11 sampai tahun ke 25 memiliki pengeluaran yang lebih rendah dibanding dengan sistem 100% PLN.



Gambar 4. 11 Grafik *Nominal Cash Flow Cumulative* Sistem 60% PV + 40% PLN



Gambar 4. 12 Grafik *Discount Cash Flow cumulative* sistem 60% PV + 40% PLN

Apabila mempertimbangkan *discount rate* dan inflasi maka sistem aliran kas sistem ditunjukkan pada Gambar 4.12. Berdasarkan data inflasi dari Bank Indonesia nilai inflasi Indonesia pada april 2019 adalah 2,83 %, sedangkan *discount rate* adalah 8%. *Discount rate* 11% juga dipertimbangkan, pertimbangan kedua nilai tersebut digunakan untuk mengetahui nilai yang akan datang yang dikonversikan oleh *discount rate* dan ditampilkan pada nilai sekarang. Pada *discount cash flow*, sistem mampu menutupi biaya investasi pada tahun ke 18. Tabel 4.7 menunjukkan parameter-parameter yang ditentukan dalam pertimbangan dilakukannya pengadaan PLTS dengan sistem 60% PV + 40% PLN.

Tabel 4. 7 Parameter hasil perbandingan sistem

Parameter	Nilai
<i>Present worth</i> (Rp)	Rp. 610.762.900
<i>Annual worth</i> (Rp/tahun)	Rp. 43.455.580
<i>Return on investment</i> (%)	5,7
<i>Internal Rete of Return</i> (%)	8,4
<i>Simple payback periode</i> (tahun)	11,63
<i>Discount payback periode</i> (tahun)	18,33

Selama masa proyek keuntungan dari sistem ditunjukkan oleh nilai *Return of Investment* yaitu 5,7 %. Nilai positif dari *Return of Investment* menunjukkan bahwa sistem ini akan menghasilkan keuntungan dibandingkan dengan sistem PLN saja. Jika $IRR > discount\ rate$ yang berlaku maka proyek layak untuk dilaksanakan, sebaliknya jika $IRR < discount\ rate$ yang berlaku maka proyek tidak layak untuk dilaksanakan [29]. Nilai *Internal Rete of Return* (8,4%) $> discount\ rate$ (8%), maka sistem layak untuk dilaksanakan.

Apabila mempertimbangkan Feed in Tarif (insentif) maka hasil penjualan surplus energy dapat dilihat pada Lampiran 1. Namun untuk menjual listrik ke PLN harus ada prosedur dan syarat tertentu yang harus dipenuhi yang di atur pada PERMEN No 49 tahun 2018 dimana konsumen yang menjual energy ke PLN harus dalam bentuk badan usaha untuk dapat memasang kWh ekspor-impor

4.6 Hasil *On grid* (Hybrid PV + Genset)

Dilakukan variasi pada hybrid PV + Genset dengan input kapasitas PV yaitu P_{mpp} yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Genset yang digunakan memiliki kapasitas 60 kVA dengan kapasitas PV divariasikan sebagai berikut :

1. 30% PV + 70% Genset ditunjukkan oleh 75,12 kWp
2. 50% PV + 50% Genset ditunjukkan oleh 125,2 kWp
3. 55% PV + 45% Genset ditunjukkan oleh 137,7 kWp
4. 60% PV + 40% Genset ditunjukkan oleh 150,12 kWp
5. 65% PV + 35% Genset ditunjukkan oleh 162,76 kWp
6. 70% PV + 30% Genset ditunjukkan oleh 175,28 kWp

Berdasarkan tekno ekonomi hybrid PV + Genset biaya hidup (NPC) yang paling rendah adalah pada sistem 65% PV dan 35% Genset yaitu Rp.7.373.097.000 dengan *cost of energy* sebesar Rp.3.503. namun apabila dibandingkan dengan sistem yang hanya menggunakan PLN, sistem ini akan mendapatkan kerugian sebesar Rp. 3.323.677.000 apabila diadakan. Serta tidak mampu mengembalikan modal selama 1 kali masa proyek (25 tahun).

4.7 Diskusi

Setelah dilakukan simulasi dari variasi microgrid yang terdiri dari kondisi on grid dan off grid maka diperoleh hasil yang paling optimal dari masing-masing kondisi. Pada on grid, konfigurasi sistem PV-Grid merupakan sistem yang paling optimal sedangkan pada kondisi off grid adalah PV-Baterai. Kondisi optimal dapat ditunjukkan dari harga NPC yang terendah, selain itu pada penelitian sebelumnya [29] kelayakan sistem untuk dapat dilaksanakan atau tidak dapat dilihat dari IRR. IRR menunjukkan tingkat bunga pengembalian atas sebuah proyek yang diterima perusahaan apabila $IRR > discount\ rate$ maka sistem layak untuk dilaksanakan dan apabila $IRR < discount\ rate$ maka sistem tidak layak untuk dilaksanakan [29].

Pada kondisi sistem off grid, dimana beban seluruhnya disuply oleh 100% PV dengan baterai maka untuk membangun sistem tersebut membutuhkan PV area sebesar 1674,3 dengan P_{mpp} sebesar 205,4 kWp. Maka jumlah panel surya yang dibutuhkan adalah 1253 unit panel surya. Biaya yang dikeluarkan oleh sistem 100% PV selama 25 tahun adalah 17 milyar sedangkan apabila dibandingkan dengan 100% PLN yang biaya selama 25 tahun adalah 3 milyar, maka sistem 100% PV tidak dapat diaplikasikan karena tidak dapat balik modal (*Return on investment*).

Pada kondisi on grid hybrid PV-PLN memiliki NPC atau biaya yang dikeluarkan untuk sistem dapat beroperasi selama 25 tahun adalah yang paling rendah dibanding dengan sistem yang hanya menggunakan sumber energi dari grid (PLN) yang digunakan Departemen Teknik Fisika saat ini. Sistem PV Grid memiliki NPC sebesar Rp 3.438.657.000 sedangkan NPC sistem grid adalah Rp 4.049.420.000. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang hanya menggunakan grid saja mengeluarkan biaya 15 % lebih besar dibandingkan sistem PV-Grid. Hal tersebut disebabkan oleh produksi PV dengan kapasitas sebesar 150 kW yang mana terdiri dari 750 panel PV dengan 50 string dan setiap string terdapat 15 panel surya dapat mencukupi sebagian kebutuhan listrik Departemen Teknik Fisika ketika siang hari dimana kebutuhan listrik pada siang hari lebih besar dari pada kebutuhan listrik pada malam hari. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.4 yang

menunjukkan rata-rata pemenuhan kebutuhan oleh PV lebih besar dari pada oleh grid, PV dapat memenuhi 60% dari total beban, dan grid memenuhi 40% beban.

Sistem hybrid PV-PLN membutuhkan waktu selama 18,33 tahun untuk dapat menutupi biaya investasi (*payback*), dan ROI atau jumlah keuntungan semasa proyek sebesar 5,7 %, kecilnya nilai ROI. Kelayakan sistem PV-Grid ditentukan dari nilai IRR, IRR pada sistem 60 % PV + 40% Grid adalah 8,4 % hal ini menunjukkan bahwa $IRR > Discount\ rate$. Maka sistem PV-PLN layak untuk dilaksanakan. Sedangkan apabila *discount rate* 11% Sistem PV-PLN tidak layak diadakan karena akan merugi yang dapat ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Parameter Ekonomi PV-PLN (discount 11%)

Parameter	Nilai
<i>Present worth</i> (Rp)	-Rp. 113.602.600
<i>Annual worth</i> (Rp/tahun)	-Rp. 10.592.330

Pada kondisi off grid PV+Genset memiliki NPC lebih rendah jika dibandingkan dengan konfigurasi sistem off grid lainnya. Namun apabila dibandingkan dengan sistem 100% PLN yang digunakan Departemen Teknik Fisika saat ini sistem off grid tidak lebih menguntungkan. Nilai IRR dari sistem off grid juga menunjukkan $< discount\ rate$. Maka sistem off grid tidak layak untuk dilaksanakan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa data yang telah dilakukan, maka pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Microgrid dengan hybrid 60% PV-30% PLN layak dilaksanakan karena $IRR (8,4\%) > discount\ rate (8\%)$,
2. Skenario mirogrid memiliki kapasitas sebesar 150 kWp yang dapat dibangun dengan 750 PV dibagi menjadi 50 *string*, setiap *string* terdiri dari 15 panel surya yang dihubungkan dengan 1 inverter dan pembelian grid. sistem PV memenuhi 60% dari beban Departemen Teknik Fisika dan 30% PLN
3. Perhitungan tekno-ekonomi sistem microgrid dapat menghemat pengeluaran sebesar Rp610.762.900 jika dibandingkan dengan sistem grid saja. Sistem microgrid juga memiliki nilai COE terendah yaitu Rp. 940,80. Dengan investasi awal sebesar Rp. 3.096.975.863, Sistem akan dapat menutupi biaya investasi selama 18 tahun dengan ROI sebesar 5,7%.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat penulis berikan dalam tugas akhir ini adalah perlu dilakukan analisis *multiyear load growth* untuk mengetahui kemungkinan sistem apabila terjadi pertumbuhan beban setiap tahunnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. J. Ketenagalistrikan, "Statistik Ketenagalistrikan 2017," Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta, 2018.
- [2] NASA, "Surface Meteorology And Solar Energy," [Online]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov>. [Accessed 25 12 2018].
- [3] J. J. Gandhi, "Optimisasi Sistem Tenaga PV dan PV-deiesel pada Operasi Microgrid Skala Laboratorium di Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [4] A. Lubis, "Energi Terbarukan dalam Pembangunan Berkelanjutan," *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 8, no. ISSN 1441-318, pp. 155-162, 2007.
- [5] A. Taradini, "Multiobjektif Direct Current Optimal Power Flow pada Microgrid untuk Meminimalkan Biaya Pembangunan dan Memaksimalkan Umur Baterai," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [6] A. K. A. R. S. Ramesh C. Bansal, P. K. Y. D. and X. H. , "Multiyear Load Growth Based Techno-Financial," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 37533-37555, 2018.
- [7] K. Yonata, "Analisis Tekno Ekonomi Terhadap Desai Sistem PLTS pada Bangunan Komersial di Surabaya," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [8] University of California, "Microgrids," US San Diego, [Online]. Available: <https://sustainability.ucsd.edu/highlights/microgrids.html>. [Accessed 24 03 2019].
- [9] US Departement of Energy, How Microgrid Work, Office of Electricity Delivery & Energy Reliability .
- [10] J. Goldemberg, Energy, Environment and Development, London: Earthscan, 2010.

- [11] H. P. E, Energy, the Environment and Climate Change, London: Imperial College Press, 2010.
- [12] Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Program Strategis EBTKE dan Ketenagalistrikan," *Jurnal Energi Media Komunikasi Edisi 02*, p. 9, 2016.
- [13] J. A. Fay and S. D. Golomb, Energy and The Environment, New York: Oxford University Press, 2002.
- [14] Homer Energy, [Online]. Available: https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/cle_arness_index.html.
- [15] J. G. McGowan, J. F. Manwell and A. L. Rogers, "Wind Energy Explained," in *Wind Characteristics and Resources*, UK, Willey, 2009, p. 24.
- [16] N. Sriram and M. Shahidehpour, "Renewable Biomass Energy," Illinois Institute of Technology, Chicago.
- [17] A. J. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, New Jersey: Willey, 2006.
- [18] S. Chowdhury and P. Crossley, Microgrids and Active Distribution Networks, London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [19] F. J. C. Cordero, "Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems," University of Toronto, Canada, 2015.
- [20] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury and P. Crossley, Microgrids and Active Distribution Networks, London: The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [21] J. F. Manwell and J. G. McGowan, "Lead Acid Battery Storage Model for Hybrid Energy Systems," *Solar Energy*, vol. 50, no. 5, pp. 399 - 405, 1993.
- [22] J. F. Manwell, J. G. McGowan and A. L. Rogers, Wind Energy Explained, New York: Wiley, 2002.
- [23] Solarex, Discover the Newest World Power, Maryland, USA: Frederick Court, 1996.

- [24] PT. PLN (PERSERO), KEPUTUSAN DIREKSI PT PLN (PERSERO) NOMOR : 0357.K/DIR/2014 TENTANG PEDOMAN PENYAMBUNGAN PEMBANGKIT LISTRIK ENERGI TERBARUKAN KE SISTEM DISTRIBUSI PLN, JAKARTA: PT. PLN, 2014.
- [25] A. Babaei, "Optimizing and Economical Assessment of the Utilization of Photovoltaic Systems in Residential Buildings: The Case of Sari Station, Northern of Iran," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 6, pp. 133-138, 2012.
- [26] F. A. Farret and M. G. Simoes, *Integration of Alternative Sources of Energy*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [27] C. C. Fung, W. Rattanongphisat and C. Nayar, "A simulation study on the economic aspects of hybrid energy systems for remote islands in Thailand," *Proc. IEEE*, pp. 1966-1969, 2002.
- [28] R. Srivastava and V. K. Giri, "OPTimization oh Hybrid Renewable Resources using HOMER," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 6, no. 1, 2016.
- [29] M. Ibrochim, "Analisis Tekno-Ekonomi Desain Konfigurasi Pusat Listrik Tenaga Angin (Wind Farm) dan Perhitungan Feed In Tarif Di Indonesia)," Universitas Indonesia, 2012, 2012.
- [30] E. Hau, *Fundamental, Technologies, Application and Economics*, Heidelberg, Germany: Springer 2nd Edition, 2006.
- [31] K. M. Shahzad, A. Zahid, u. T. Rashid, M. A. Rehan, M. Ali and M. Ahmad, "Techo-Economic Feasibility Analysis of Solar-Biomass off Grid System for The Electrification of Remote Rural Area Pakistan Using HOMER Software," *Renewable Energy*, vol. 106, pp. 264-273, 2017.
- [32] A. W. Putra, E. Kamandika, S. Rosyadi, A. Purwadi and Y. Haroen, "Study and Design of hybrid Off-Grid PV-

- Generator Power System for Administration Load and Communal Load at Three Regions in Indonesia," in *The 3rd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy*, 2016.
- [33] D. Suryana and M. M. Ali, "Pengaruh Temperatur Terhadap Tegangan yang Dihasilkan Panel Surya Jenis Monokristalin (Studi kasus: Baristand Industri Surabaya)," *Jurnal Teknologi Proses dan Inovasi Industri*, vol. 2, no. 1, pp. 49-52, 2016.
- [34] E. T. A. Duka, I. N. Setiawan and A. I. Weking, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hybrid Pada Area Parkir Gedung Dinas Cipta Karya, Dinas Bina Marga Dan Pengairan Kabupaten Badung," *E-Journal SPEKTRUM*, vol. V, no. 2, pp. 67-73, 2018.
- [35] E. Park and S. J. Kwon, "Solution for Optimizing Renewable Power Generation Systems at Kyung-Hee University's Global Campus, South Korea," *Elsevier*, vol. 58, pp. 439-449, 2016.
- [36] D. Tan and A. K. Seng, *Handbook for Solar Photovoltaic (PV) Systems*, Singapore: Energy Market Authority.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Energy Purchased (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge
January	7.686	4.492	3.194	113	Rp4,69M
February	6.590	4.542	2.047	103	Rp3,00M
March	7.527	5.434	2.093	92,6	Rp3,07M
April	5.621	4.667	954	89,8	Rp1,40M
May	6.487	5.314	1.173	95,3	Rp1,72M
June	6.511	5.014	1.497	107	Rp2,20M
July	5.652	5.343	309	82,8	Rp453,684
August	6.248	5.650	598	105	Rp876,651
September	4.396	6.535	-2.138	107	-Rp4,38M
October	5.422	5.843	-421	72,2	-Rp861,407
November	7.142	5.663	1.478	99,5	Rp2,17M
December	6.700	5.483	1.217	93,1	Rp1,78M
Annual	75.981	63.980	12.001	113	Rp16,1M

Lampiran 2 Tarif Tenaga Listrik



PT PLN (Persero)

Jalan Trunojoyo Blok M 1/135 Kebayoran Baru – Jakarta 12160

Telepon : (021) 7261815, 7261122, 7262234

Facsimile : (021) 7221330

Website : www.pln.co.id

(021) 7251234, 7250550

PENETAPAN PENYESUAIAN TARIF TENAGA LISTRIK (TARIFF ADJUSTMENT) BULAN JANUARI - MARET 2019

NO.	GOL. TARIF	BATAS DAYA	REGULER		PRA BAYAR (Rp/kWh)
			BIAYA BEBAN (Rp/kVA/bulan)	BIAYA PEMAKAIAN (Rp/kWh) DAN BIAYA KVArh (Rp/kVArh)	
1.	R-1/TR	1.300 VA	*)	1.467,28	1.467,28
2.	R-1/TR	2.200 VA	*)	1.467,28	1.467,28
3.	R-2/TR	3.500 VA s.d. 5.500 VA	*)	1.467,28	1.467,28
4.	R-3/TR	6.600 VA ke atas	*)	1.467,28	1.467,28
5.	B-2/TR	6.600 VA s.d. 200 kVA	*)	1.467,28	1.467,28
6.	B-3/TM	di atas 200 kVA	**) Blok WBP = K x 1.035,78 Blok LWBP = 1.035,78	1.114,74 ****)	-
7.	I-3/TM	di atas 200 kVA	**) Blok WBP = K x 1.035,78 Blok LWBP = 1.035,78	1.114,74 ****)	-
8.	I-4/TT	30.000 kVA ke atas	**) Blok WBP dan Blok LWBP = 996,74	996,74 ****)	-
9.	P-1/TR	6.600 VA s.d. 200 kVA	*)	1.467,28	1.467,28
10.	P-2/TM	di atas 200 kVA	**) Blok WBP = K x 1.035,78 Blok LWBP = 1.035,78	1.114,74 ****)	-
11.	P-3/TR	*)		1.467,28	1.467,28
12.	L/TR, TM, TT	-	-	1.644,52	-

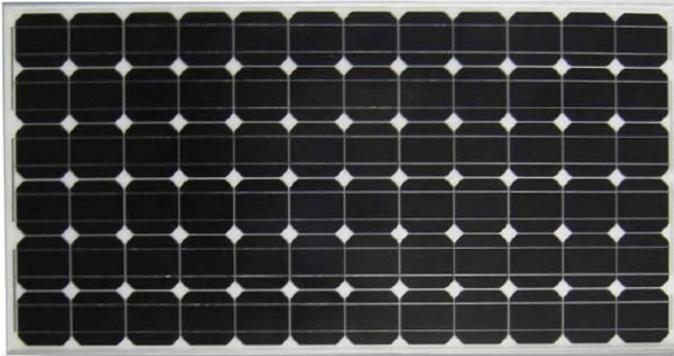
Catatan :

- *) Diterapkan Rekening Minimum (RM).
 RM1 = 40 (Jam Nyala) x Daya tersambung (kVA) x Biaya Pemakaian.
 **) Diterapkan Rekening Minimum (RM).
 RM2 = 40 (Jam Nyala) x Daya tersambung (kVA) x Biaya Pemakaian LWBP.
 Jam nyala : kWh per bulan dibagi dengan kVA tersambung.
 ***) Diterapkan Rekening Minimum (RM).
 RM3 = 40 (Jam Nyala) x Daya tersambung (kVA) x Biaya Pemakaian WBP dan LWBP.
 Jam nyala : kWh per bulan dibagi dengan kVA tersambung.
 ****) Biaya kelebihan pemakaian daya reaktif (kVArh) dikenakan dalam hal faktor daya rata-rata setiap bulan kurang dari 0,82 (delapan puluh lima per seratus).
 K : Faktor perbandingan antara harga WBP dan LWBP sesuai dengan karakteristik beban sistem tenaga listrik setempat (1,4 < K < 2), ditetapkan oleh Direksi Perusahaan Penerimaan (Persero) PT Perusahaan Listrik Negara.

WBP : Waktu Beban Puncak.

LWBP : Luar Waktu Beban Puncak.

Lampiran 3 Sepsifikasi Sel Surya LEN 200 Wp



Certified by B2TE BPPT Based on SNI:04-3850.2-1995
Corrosion Test Report Based on SNI:04-6298-2000

Electrical Characteristics

STC

Optimum Operating Voltage (Vmp)	: 37.53 V
Optimum Operating Current (Imp)	: 5.35 A
Open – Circuit Voltage (Voc)	: 44.2 V
Short – Circuit Current (Isc)	: 5.50 A
Maximum Power at STC (Pmax)	: 200 W
Modul Efficiency	: 15 %
Operating Module Temperature	: -40 °C to +85°C
Maximum System Voltage	: 1000 V DC
Maximum Series Fuse Rating	: 20 A
Power Tolerance	: + 0 – 3 %

STC : Irradiance 1000 W/m², module temperature 25 °C, AM=1.5;

Power measurement tolerance : ±3 %

Mechanical Characteristics

Solar Cell	: Monocrystalline
No. of Cells	: 72 (6 X 12)
Dimensions	: 1576 X 806 X 50 mm

Weight : 16.5 Kg
 Junction Box : IP65
 Output Cables : TUV (2Pfg1169:2007), UL 4703, UL 44 4 mm² (0.00375 inches²)
 Connectors : ZJRH connectors(MC3 or Mc4 type), symmetrical length – 1000mm(-) and 1000 mm(+)
 Construction : Front = High Transmission low-iron, 3.2mm tempered glass; Back cover = Tedlar /TPE/TPT; Encapsulant = EVA; Frame = Anodized aluminium alloy

Temperature Characteristics

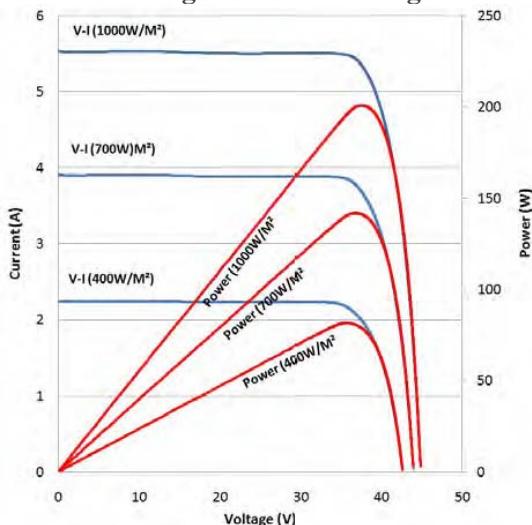
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) : 45 ± 2 °C

Temperature Coefficient of Power : -0.41 %/°C

Temperature Coefficient of Voc : -0.31 %/°C

Temperature Coefficient of Isc : 0.047 %/°C

Current-Voltage & Power-Voltage Curve



Lampiran 4 Spesifikasi Inverter

Produk	Model	PCU MPPT 4KW
	MPPT Voltage	130V - 160V DC
	Max. Input Current	31A
	Max. PV	4400WP
	Jumlah Charge Controller	1
MPPT Base Charge Controller	Switching Element	MOFSET / IGBT
	Type of Charger	PWM with MPPT
Grid Input	Input Supply Phase	1 Phase 2 Wire
	Nominal Voltage & Voltage Range	230VAC (+15%, -20%)

Baterai	Voltase	96V
	Jumlah	8
Inverter	Nominal Output Voltage	230V AC L-N
	Output Supply Phase	1 Phase 2 Wire
	Output Wave Form	Sine Wave
	Nominal Freq (Hz)	50 Hz
	Power Factor (Within KVA/KW)	0.6 lag to 1 (within KVA and KW rating)
	Nominal Output Current	17A
	Voltage Regulation	±2%
	Voltage Stability in Dynamic Condition	Complies with IEC/EN 62040-3, Class 1
	Output Voltage Distortion with 100% Linear Load	< 2%
	Overload at Nominal Output Voltage for 10 Minute	125%
	Overload at Nominal Output Voltage for 1 Minute	150%
Inverter Peak Efficiency	Up to 90%	
Fisik	Dimensi	63 x 25 x 55 cm
	Berat	62Kg

Lampiran 6 Data Beban Weekend Departemen Teknik Fisika

WEEKEND						
waktu	TOTAL daya	r. Tu (DIS	parkir	lorong 1	lorong 2	kantin
00.00	2,671	485	575	860	751	
01.00	2,671	485	575	860	751	
02.00	2,671	485	575	860	751	
03.00	2,671	485	575	860	751	
04.00	2,671	485	575	860	751	
05.00	2,671	485	575	860	751	
06.00	2,671	485	575	860	751	
07.00	0,685	485	200			
08.00	0,685	485	200			
09.00	0,685	485	200			
10.00	0,685	485	200			
11.00	0,685	485	200			
12.00	0,685	485	200			
13.00	0,685	485	200			
14.00	0,685	485	200			
15.00	0,685	485	200			
16.00	0,685	485	200			
17.00	0,685	485	200			
18.00	3,061	485	575	860	751	390
19.00	3,061	485	575	860	751	390
20.00	3,061	485	575	860	751	390
21.00	3,061	485	575	860	751	390
22.00	3,061	485	575	860	751	390
23.00	3,061	485	575	860	751	390
TOTAL d	44,598					

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Desa Saka Jaya pada 23 September 1996. Penulis menempuh pendidikan di SDN 2 Saka Jaya (2002 – 2008), SMP Negeri 2 Muara Enim (2008 – 2011), SMA Negeri 2 Muara Enim (2011 – 2014), pendidikan D-3 Metrologi dan Instrumentasi di Universitas Gadjah Mada (UGM) (2014 – 2017), dan melanjutkan lintas jalur S – 1 di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Penulis pernah melakukan *internship* di Lembaga Pusat Penelitian Indonesia (LIPI), Serpong. Penulis dapat dihubungi melalui *e – mail*: khasana90@gmail.com