

**PERANCANGAN PLTS UNTUK MENYUPLAI DAYA PADA
PROSES ELEKTROLISIS DALAM KEBUTUHAN
HIDROGEN**

LAPORAN TUGAS AKHIR

Laporan ini disusun untuk memenuhi syarat memperoleh
gelar S1 pada Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Sultan Agung



Disusun oleh :

RIAN PAMBUDI

Nim. 30601900041

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

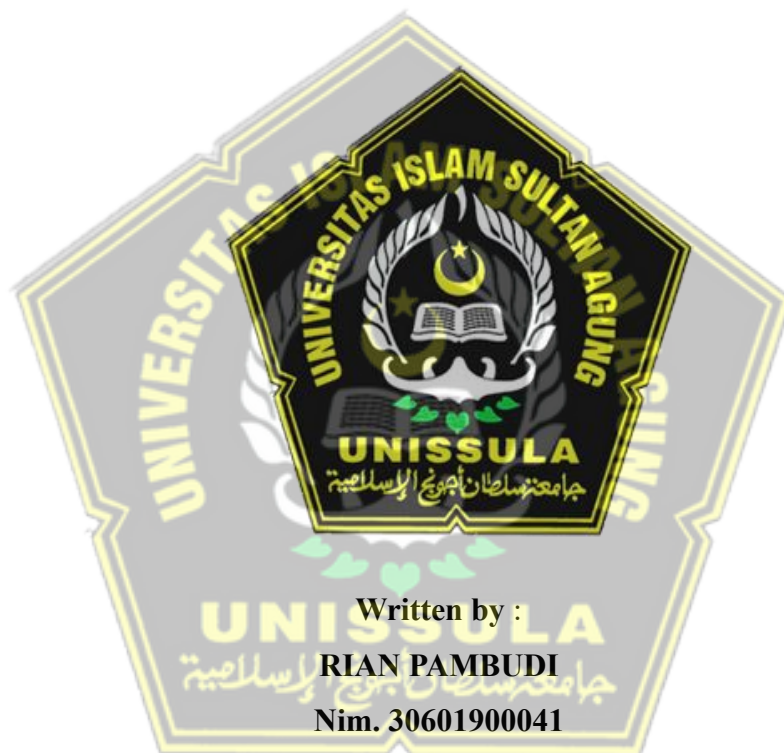
DESIGN OF PLTS TO SUPPLY POWER TO THE ELECTROLYSIS PROCESS IN HYDROGEN NEEDS

FINAL PROJECT REPORT

This report is prepared to fulfill the requirements for obtaining
a Bachelor's degree in the Electrical Engineering Program

Faculty of Industrial Technology

Sultan Agung Islamic University Semarang



Written by :

RIAN PAMBUDI

Nim. 30601900041

**DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SULTAN AGUNG ISLAMIC UNIVERSITY
SEMARANG**

2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “PERANCANGAN PLTS UNTUK MENYUPLAI DAYA PADA PROSES ELEKTROLISIS DALAM KEBUTUHAN HIDROGEN” ini disusun oleh:

Nama : Rian Pambudi

NIM 30601900041

Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Rian Pambudi

Tanggal : Selasa, 03 Juni 2025



Ketua Program Studi Teknik Elektro



LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “PERANCANGAN PLTS UNTUK MENYUPLAI DAYA PADA PROSES ELEKTROLISIS DALAM KEBUTUHAN HIDROGEN” ini telah dipertahankan di depan Dosen

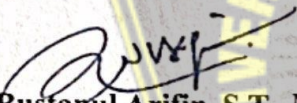
Penguji Tugas Akhir pada:

Hari : Selasa

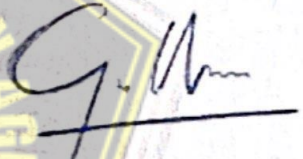
Tanggal : 03 Juni 2025

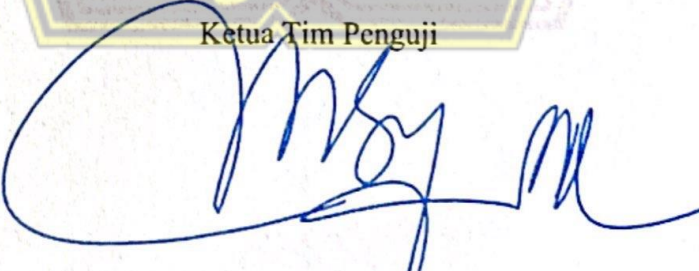
TIM PENGUJI

Anggota Tim Penguji I


Dr. Bustanul Arifin, S.T., M.T.
NIDN. 0614117701,

Anggota Tim Penguji II


Dr. Gunawan, ST., MT
NIDN. 0607117101


Ketua Tim Penguji

Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, M.T., IPM.
NIDN. 0628086501

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rian Pambudi
NIM : 30601900041
Fakultas : Teknologi Industri
Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro di Fakultas Teknologi UNISSULA Semarang dengan judul **“PERANCANGAN PLTS UNTUK MENYUPLAI DAYA PADA PROSES ELEKTROLISIS DALAM KEBUTUHAN HIDROGEN”**, adalah asli (orisinal) dan bukan menjiplak (plagiat) dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan dimanapun dalam bentuk apapun baik sebagian atau keseluruhan, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab. Apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa Karya Tugas Akhir tersebut adalah hasil karya orang lain atau pihak lain, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis.

Semarang, Selasa, 03 Juni 2025

Yang Menyatakan
Mahasiswa



Rian Pambudi

NIM.30601900041

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Rian Pambudi
NIM : 30601900041
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“PERANCANGAN PLTS UNTUK MENYUPLAI DAYA PADA PROSES ELEKTROLISIS DALAM KEBUTUHAN HIDROGEN”** dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/ Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung

Semarang, Selasa, 03 Juni 2025

Yang Menyatakan



Rian Pambudi

NIM.30601900041

HALAMAN PERSEMBAHAN

Pada lembaran ini, saya ingin mengekspresikan rasa terima kasih yang mendalam kepada semua individu yang telah berkontribusi dalam perjalanan panjang saya menuju penyelesaian thesis ini. Setiap langkah, setiap penelitian, dan setiap tantangan telah membentuk perjalanan akademik ini, dan tanpa dukungan dari berbagai pihak, pencapaian ini tidak akan menjadi kenyataan.

Pertama-tama, saya ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada keluarga saya. Keluarga saya adalah tiang pendukung utama dalam hidup saya. Mereka selalu memberikan cinta, dukungan moral, dan motivasi yang tak terbatas. Terima kasih atas pengorbanan kalian, dan rasa bangga yang kalian berikan kepada saya selama bertahun-tahun.

Saya juga ingin menghaturkan terima kasih kepada pembimbing saya, Bapak **Dr. Gunawan ST., MT.** Beliau adalah mentorku yang luar biasa, selalu siap memberikan nasihat berharga, mendengarkan ide-ide saya, dan memberikan bimbingan yang sangat dibutuhkan. Tanpa bantuan dan panduan beliau, saya tidak akan sampai pada titik ini.

Teman-teman saya adalah sumber semangat dan inspirasi. Mereka selalu ada untuk mendukung saya, berbagi pengalaman, dan bersama-sama melewati mata kuliah yang penuh tantangan. Terima kasih atas persahabatan dan dukungan kalian.

Para **dosen** dan **staf akademik** di Fakultas Teknologi Industri juga layak mendapat penghargaan. Mereka telah memberikan pendidikan yang berharga dan menciptakan lingkungan belajar yang menginspirasi. Pengalaman belajar saya di sini akan selalu menjadi bagian yang tak terpisahkan dari perjalanan akademik saya.

Pencapaian ini adalah bukti kerja keras, ketekunan, dan dukungan yang luar biasa dari semua pihak. Terima kasih sekali lagi kepada semua yang telah berperan dalam pencapaian ini. Semua yang telah kalian berikan tidak akan pernah saya lupakan. – **Rian Pambudi (2025)**

HALAMAN MOTO

"Ilmu itu ibarat pedang bermata dua entah kamu gunakan untuk kebaikan atau keburukan"

-Puang

"Jika kau mengenal musuh dan mengenal dirimu, kau tak perlu takut pada seratus pertempuran."

– Sun tzu (The Art of War)

"Hatiku tenang karena mengetahui bahwa apa yang melewatkanmu tidak akan pernah menjadi takdirku, dan apa yang ditakdirkan untukmu tidak akan pernah melewatkanmu"

-Umar bin Khattab

Terbentur,terbentur, terbentuk

-Tan Malaka



KATA PENGANTAR

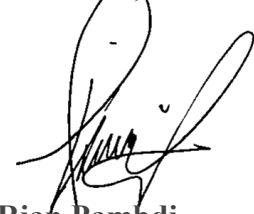
Dengan mengucapkan Alhamdulillah segala puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penyusunan Laporan Tugas Akhir yang berjudul **“Perancangan Plts Untuk Menyuplai Daya Pada Proses Elektrolisis Dalam Kebutuhan Hidrogen”** ini dapat diselesaikan guna memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan Pendidikan pada jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Perjalanan panjang telah penulis lalui dalam rangka menyelesaikan penulisan Tugas Akhir ini. Banyak hambatan yang dihadapi dalam penyusunannya, namun berkat kehendak-Nyalah sehingga penulis berhasil menyelesaikan penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, dengan penuh kerendahan hati, pada kesempatan ini patutlah kiranya penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu serta memberi saran pada penulisan laporan tugas akhir ini.

Akhir kata, penulis mengharapkan skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis khususnya bagi para pembaca pada umumnya.

Semarang, 17 Mei 2025

Penulis,



Riah Pambdi

DAFTAR ISI

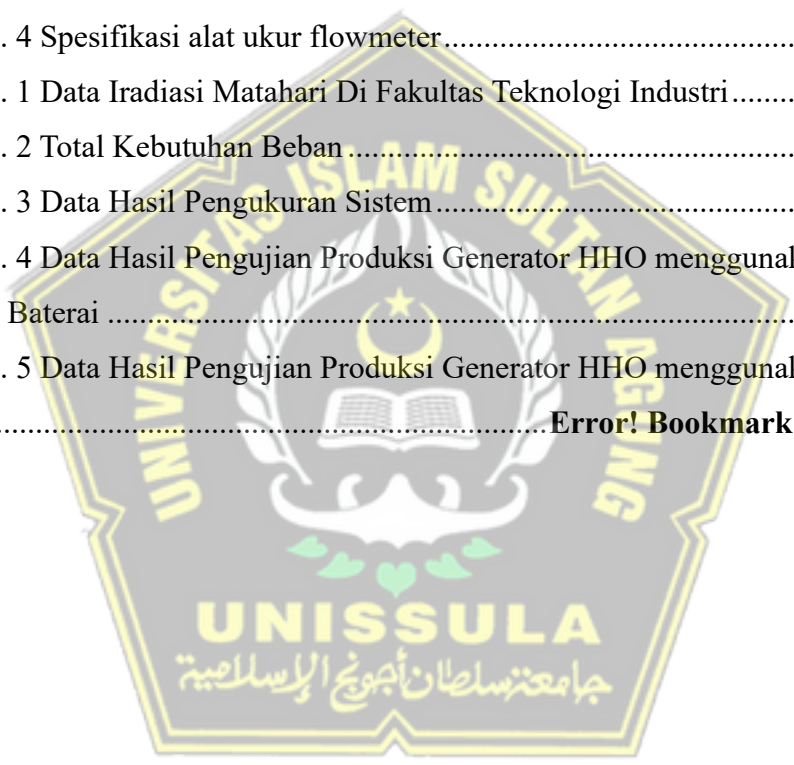
LAPORAN TUGAS AKHIR	i
FINAL PROJECT REPORT	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
HALAMAN MOTO.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
ABSTRAK.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Tugas Akhir.....	4
1.5 Manfaat Tugas Akhir.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	6
2.1 Tinjauan Pustaka	6
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 Gas Brown	7
2.2.2 Generator HHO (Hydroxy H ₂ O).....	8
2.2.3 Prinsip Kerja Generator HHO	9
2.2.4 Produksi Gas HHO	10
2.2.5 Generator HHO berbentuk pelat.....	10
2.2.6 Klasifikasi Generator HHO	11

2.2.6.1 Generator HHO Tipe Basah (<i>Wet Cell</i>)	11
2.2.6.2 Generator HHO Tipe Kering (<i>Dry Cell</i>)	12
2.2.6.3 Reservoir	13
2.2.6.4 HHO Cell	14
2.2.6.5 Selang Gas HHO	14
2.2.6.6 Pemilihan Elektroda Generator HHO	14
2.2.6.7 Larutan Elektrolit sebagai Katalis Generator HHO	16
2.2.6.8 Parameter Performa Generator HHO	16
2.2.6.9 Daya Generator HHO	17
2.2.6.10 Laju Produksi Gas HHO	17
2.2.6.11 Efisiensi generator	19
2.2.7 Sumber Energi Listrik dengan Menggunakan PLTS	21
2.2.7.1 Energi Surya (<i>Photovoltaic</i>)	21
2.2.7.2 Prinsip kerja Photovoltaic	21
2.2.7.3 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	22
2.2.7.4 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	24
2.2.7.5 Modul Panel Surya	26
2.2.7.6 Jenis - Jenis Modul Surya	29
2.2.7.7 Konfigurasi Modul Surya	31
2.2.7.8 Maximum Power Point Tracking (MPPT)	34
2.2.7.9 Baterai	36
2.2.8 Modul surya	41
2.2.8.1 Rangkaian Seri Modul Surya	41
2.2.8.2 Rangkain Paralel Modul Surya	42
2.2.8.3 Rangkain Seri Paralel Modul Surya	42
BAB III METODE PENELITIAN	44
3.1 Objek Penelitian	44
3.2 Model Perancangan PLTS Untuk Menyuplai Daya Pada .Generator HHO	
	44
3.3 Alat dan Bahan	45
3.3.1 Alat	45

3.3.2 Bahan	46
3.4 Prosedur Penelitian	49
3.4.1 Pengambilan Data	49
3.4.2 Menentukan Daya Yang Dibutuhkan Generator HHO	51
3.4.3 Perancangan PLTS Dengan Waktu Operasional 6 jam	52
3.4.4 Menentukan Kebutuhan Baterai Pada Panel Surya	52
3.4.5 Menentukan Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Controller Panel Surya	53
3.4.6 Parameter Pengujian Output	53
3.5 Flowchart Penelitian	53
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1 Iradiasi Matahari	55
4.2 Menentukan Daya Yang Dibutuhkan Generator HHO	55
4.3 Konfigurasi Kemiringan Modul Pv	57
4.4 Perancangan Teknis Sistem PLTS dan beban Generator HHO	58
4.5 Menghitung Area (PV Area)	60
4.6 Menghitung Daya Yang Di Bangkitkan PLTS	61
4.7 Menghitung Jumlah Panel Surya	61
4.8 Penyusunan Array Modul PLTS	61
4.9 Menentukan kapasitas <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT)	62
4.10 Penentuan Kapasitas Baterai	63
4.11 Pengujian PLTS dalam menyuplai Generator HHO	63
4.12 Hasil Pengujian Produksi Generator HHO Menggunakan Sumber PLTS + Baterai dan Sumber PLTS	67
4.13 Laju Aliran Produksi	68
4.14 Efisiensi Generator HHO	69
BAB V KESIMPULAN	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN	76

DAFTAR TABEL

Table 2. 1 Properti Gas Hidrogen.....	8
Table 2. 2 Properti Gas Hidrogen.....	9
Table 2. 3 <i>Spesifikasi Stainless Steel</i>	15
Table 3. 1 Spesifikasi Modul PV.....	46
Table 3. 2 Spesifikasi MPPT.....	47
Table 3. 3 Spesifikasi Generator HHO.....	48
Table 3. 4 Spesifikasi alat ukur flowmeter.....	49
Table 4. 1 Data Iradiasi Matahari Di Fakultas Teknologi Industri.....	55
Table 4. 2 Total Kebutuhan Beban.....	59
Table 4. 3 Data Hasil Pengukuran Sistem.....	64
Table 4. 4 Data Hasil Pengujian Produksi Generator HHO menggunakan PLTS dan Baterai	67
Table 4. 5 Data Hasil Pengujian Produksi Generator HHO menggunakan PLTS	Error! Bookmark not defined.



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema Pemecahan Molekul Air	7
Gambar 2. 2 generator HHO dengan Elektroda Berbentuk Susunan Pelat.....	11
Gambar 2. 3 Bentuk Generator HHO Tipe Basah (Wet Cell)	12
Gambar 2. 4 Bentuk Generator HHO Tipe kering (Dry Cell).....	13
Gambar 2. 5 Konversi Cahaya Matahari.....	22
Gambar 2. 6 PLTS Sistem Off-Grid.....	23
Gambar 2. 7 PLTS Sistem On-grid	24
Gambar 2. 8 PLTS sistem hybrid	24
Gambar 2. 9 Rangkaian pengetesan sel surya.....	25
Gambar 2. 10 Grafik Karakteristik I-V Sel Surya.....	25
Gambar 2. 11 P-N Junction (Panjar-Mundur)	27
Gambar 2. 12 Panel Surya monokristal (Mono-crystalline)	30
Gambar 2. 13 Poly-Crystalline PV Cell.....	30
Gambar 2. 14 Thin Film Photo Voltaic PV Cell.....	31
Gambar 2. 15 Modul Maximum Power Point Tracking (MPPT)	34
Gambar 2. 16 Kurva I-V dan P-V kurva karakteristik modul.....	35
Gambar 2. 17 Baterai panel surya.....	37
Gambar 2. 18 Rangkaian Seri Modul Surya	41
Gambar 2. 19 Rangkaian Paralel Modul Surya.....	42
Gambar 2. 20 Rangkaian Seri-Paralel Modul Surya.....	42
Gambar 3. 1 Lokasi penelitian	44
Gambar 3. 2 Perancangan PLTS Untuk Menyuplai Daya Pada Generator HHO .	45
Gambar 3. 3 Modul PV Monocrystalline	46
Gambar 3. 4 MPPT Solar Controller For Models	47
Gambar 3. 5 Kabel penghubung.....	48
Gambar 3. 6 Alat Ukur flowmeter.....	49
Gambar 3. 7 flowchart Penelitian.....	54
Gambar 4. 1 kemiringan optimal modul PV	57
Gambar 4. 2 Array Modul PV	62

Gambar 4. 3 Rangkaian seri pada baterai PLTS.....	63
Gambar 4. 4 Grafik Lajur aliran gas HHO terhadap waktu pengujian	65
Gambar 4. 5 Grafik Daya yang Dihasilkan PLTS dan Baterai terhdap waktu pengujian.	65
Gambar 4. 6 Grafik daya gas HHO terhdap waktu pengujian	66
Gambar 4. 7 Grafik Laju aliran gas HHO terhadap waktu pengujian.....	66
Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Jumlah Prouksi yang dihasilkan Generator HHO Menggunakan PLTS + Baterai dengan PLTS.....	68



ABSTRAK

Kebutuhan akan energi bersih dan terbarukan semakin meningkat seiring dengan upaya global dalam mengurangi emisi karbon. Salah satu solusi yang potensial adalah produksi hydrogen melalui proses elektrolisis air menggunakan sumber energi terbarukan, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Dalam penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem PLTS yang mampu menyuplai daya secara optimal untuk generator HHO yang memproduksi hydrogen yang ramah lingkungan. Metode yang digunakan meliputi pengumpulan data intensitas radiasi iradiasi matahari, perhitungan kebutuhan daya untuk proses elektrolisis, pemilihan komponen utama sistem PLTS seperti panel surya, MPPT dll. Serta analisis performa sistem yang dibuat. Hasil perancangan menunjukkan bahwa sistem PLTS yang dirancang mampu memenuhi kebutuhan daya untuk proses elektrolisis dalam kondisi radiasi matahari tertentu. Generator HHO mampu menghasilkan laju produksi gas yang meningkat dari 0,356 m/s hingga 2,754 m/s dalam 22 menit pengujian, dengan tegangan dan arus yang terjaga dalam batas kerja yang telah direncanakan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan sistem energi terbarukan yang efisien dan berkelanjutan dalam mendukung transisi energi hijau.

Kata Kunci : PLTS, elektrolisis, hidrogen, energi terbarukan, generator HHO, MPPT

ABSTRACT

The demand for clean and renewable energy is increasing in line with global efforts to reduce carbon emissions. One potential solution is hydrogen production through water electrolysis using renewable energy sources such as Solar Power Plants (PLTS). This study aims to design a PLTS system capable of optimally supplying power to an HHO generator for environmentally friendly hydrogen production. The methods include collecting solar radiation intensity data, calculating power requirements for the electrolysis process, selecting key components such as solar panels and MPPT controllers, and analyzing the performance of the designed system. The design results show that the PLTS system is capable of meeting the power needs for electrolysis under specific solar radiation conditions. The HHO generator was able to increase the gas production rate from 0.356 m/s to 2.754 m/s within 22 minutes of testing, with voltage and current maintained within the planned operating range. This research is expected to serve as a foundation for developing efficient and sustainable renewable energy systems to support the green energy transition.

Keywords : Solar Power, Electrolysis, Hydrogen, HHO Generator, Renewable Energ,

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Dalam beberapa dekade terakhir, perhatian global terhadap perubahan iklim dan degradasi lingkungan telah mendorong pencarian sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Bahan bakar fosil, yang mendominasi konsumsi energi global, menghasilkan emisi gas rumah kaca yang signifikan, berkontribusi pada pemanasan global dan berbagai masalah lingkungan lainnya. Oleh karena itu, peralihan ke sumber energi terbarukan seperti tenaga surya menjadi semakin mendesak.

Bentuk energi alternatif adalah Tenaga surya salah satu sumber energi terbarukan yang paling potensial dan melimpah. Dengan menggunakan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), energi matahari dapat diubah menjadi listrik yang ramah lingkungan. PLTS tidak menghasilkan emisi karbon selama operasinya, menjadikannya pilihan yang ideal untuk mengurangi jejak karbon dan mempromosikan keberlanjutan energi. Semakin meningkatnya konsumsi energi adalah dengan menawarkan sumber energi baru dan terbarukan sebagai alternatif penyediaan energi listrik dengan sistem kelistrikan PLTS, pada proses elektrolisis pada generator HHO (Hydroxy H₂O) dengan menggunakan transisi energi dengan menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menawarkan sumber energi yang bersih dan berkelanjutan untuk berbagai aplikasi, termasuk elektrolisis. Elektrolisis adalah proses menggunakan arus listrik untuk memisahkan elemen-elemen dari senyawa kimia. PLTS dapat digunakan untuk memberi daya secara langsung pada proses elektrolisis, menghasilkan hidrogen, oksigen, atau bahan kimia lainnya tanpa emisi gas rumah kaca.

Hidrogen telah diakui sebagai bahan bakar masa depan yang bersih dan serbaguna. Hidrogen dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk sebagai bahan bakar kendaraan, bahan bakar untuk pembangkit listrik, dan sebagai bahan baku dalam industri kimia. Salah satu metode paling bersih untuk memproduksi hidrogen adalah melalui elektrolisis air, proses yang memisahkan air menjadi

hidrogen dan oksigen menggunakan listrik. PLTS dipilih untuk menjalankan proses elektrolisis air menghasilkan hidrogen hijau, hidrogen yang diproduksi tanpa emisi karbon. Integrasi ini menawarkan solusi yang berkelanjutan untuk produksi hidrogen, memanfaatkan sumber daya alam yang tidak terbatas dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Untuk mengetahui model perancangan yang sesuai dengan kebutuhan proses elektrolisis, dapat dilakukan dengan mengetahui jumlah daya yang dihasilkan kemudian disalurkan pada proses elektrolisis di generator HHO untuk menghasilkan hydrogen pada saat kondisi waktu operasional yang paling optimal dalam penyerapan iradiasi matahari.

Berdasarkan uraian tersebut penelitian ini membahas tentang Perancangan PLTS Untuk Menyuplai Daya Pada Proses Elektrolisis Dalam Kebutuhan Hidrogen, sebagai proses elektrolisis pada generator HHO untuk menghasilkan hydrogen pada saat kondisi waktu operasional 6 jam, dengan metode yang digunakan dalam perancangan simulasi PLTS akan menghasilkan daya yang akan disambungkan ke generator HHO. Di dalam perancangan instalasi membutuhkan beberapa variable yang digunakan untuk perancangan ini.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang pada penelitian ini terdapat perumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang generator HHO yang berkapasitas 400 watt dengan menggunakan sumber energi surya?
2. Bagaimana merencanakan kapasitas PLTS dengan beban elektrolisis dengan waktu operasional yang sesuai?
3. Bagaimana variabel yang mempengaruhi kinerja PLTS dalam menyediakan daya untuk proses elektrolisis?
4. Berapa nilai efisiensi yang dibangkitkan PLTS pada alat generator HHO untuk proses elektrolisis?

1.3 Batasan Masalah

Untuk pembahasan yang lebih mendalam maka penelitian ini penulis membatasi ruang lingkup pembahasan antara lain:

1. Penelitian ini akan berfokus perancangan PLTS untuk menyuplai daya pada proses elektrolisis pada generator HHO.
2. Penelitian ini tidak membahas tentang keseluruhan proses elektrolisis gas hydrogen HHO.
3. Penelitian ini menetapkan kemiringan panel surya sebesar 11° pada atap Gedung Fakultas Teknologi Industri.
4. Jenis generator HHO yang digunakan adalah tipe *wet cell*, yaitu jenis generator elektrolisis di mana pelat elektroda terendam sepenuhnya dalam larutan elektrolit.
5. Material pelat elektroda yang digunakan adalah *stainless steel* tipe 304, karena material ini tahan terhadap korosi dan memiliki konduktivitas listrik yang baik.
6. Jumlah pelat elektroda dibatasi sebanyak 24 buah, yang membentuk 12 ruang elektrolisis aktif, disesuaikan dengan sistem tegangan kerja 12 Volt dan kebutuhan tegangan per sel elektrolisis sebesar 2 Volt.
7. Jarak antar pelat elektroda ditetapkan sebesar 1,5 mm, sebagai jarak optimal untuk meminimalkan resistansi larutan dan memaksimalkan efisiensi pembentukan gas.
8. Luas pelat elektroda dibatasi sebesar 10 cm $\times$ 10 cm, disesuaikan dengan densitas arus ideal (0,3 A/cm²) dan kapasitas maksimal arus sistem sebesar 33 Ampere.
9. Elektrolit yang digunakan adalah larutan Kalium Hidroksida (KOH) dengan konsentrasi tertentu (misalnya 0,5 g/L), dan tidak dilakukan variasi jenis atau konsentrasi elektrolit dalam penelitian ini.
10. Efisiensi yang dianalisis terbatas pada konversi energi listrik menjadi energi gas (HHO), tanpa membahas lebih lanjut aplikasi pembakaran gas HHO atau efisiensi mesin pembakaran internal.

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan penulisan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan merealisasikan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang mampu menyuplai energi listrik secara mandiri untuk mengoperasikan generator HHO tipe wet cell. Secara khusus, tujuan dari penelitian ini dapat dirinci sebagai berikut:

1. Merancang sistem PLTS off-grid yang terdiri dari panel surya, MPPT, dan baterai, yang mampu menghasilkan daya listrik sebesar ± 400 Watt untuk mendukung proses elektrolisis air.
2. Menghitung dan menentukan kebutuhan daya aktual dari generator HHO berdasarkan data tegangan dan arus yang diperoleh selama pengujian, guna memastikan kesesuaian dengan kapasitas PLTS.
3. Mengukur laju produksi gas HHO yang dihasilkan selama proses elektrolisis berjalan dengan suplai dari PLTS secara langsung maupun dari PLTS yang disertai baterai.
4. Menganalisis efisiensi sistem elektrolisis dengan membandingkan energi listrik yang digunakan terhadap energi kimia (kalor) yang terkandung dalam gas HHO yang dihasilkan.
5. Membandingkan kinerja sistem antara suplai langsung dari PLTS dengan sistem PLTS yang dibantu oleh baterai, ditinjau dari segi kestabilan daya dan volume produksi gas.

1.5 Manfaat Tugas Akhir

Adapun manfaat yang diharapkan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendayagunakan energi alternatif yangt efektif, efisien dan berdaya guna, yaitu pemanfaatan air dengan cara eletrolisis untuk menghasilkan bahan bakar hydrogen
2. Memberikan sumbangan pemikiran bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan memberikan informasi seluas-luasnya kepada masyarakat tentang gas HHO
3. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang energi terbarukan, khususnya pada sistem kombinasi antara PLTS dan teknologi elektrolisis air.

4. Bagi peneliti dapat mengetahui manfaat daya Listrik (PLTS) bagi mahasiswa Sebagai acuan untuk penelitian selanjutnya terkait proses elektrolisis air untuk menghasilkan gas hidrogen.

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam sistematika penulisan laporan penelitian ini dapat menggunakan sistematika untuk memperjelas pemahaman terhadap materi yang dijadikan objek pelaksanaan penelitian ini. Adapun sistematika penulisannya sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab I ini berisikan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan tugas akhir, manfaat dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab II ini berisikan tentang tinjauan pustaka mengenai penelitian yang telah dilakukan, serta teori mengenai komponen-komponen yang terkait dengan penyusunan panel surya dan juga generator HHO (hydrogen oksigen).

BAB III METODE PENELITIAN

Bab III ini berisikan Objek Penelitian, Data Penelitian, Alat dan Bahan, Langkah-Langkah Penelitian dan Flowchart

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab IV ini berisi tentang hasil yang didapatkan setelah melakukan penelitian ini dan data yang didapat dari pengujian dari penelitian ini.

BAB V PENUTUP

Bab V ini berisi tentang kesimpulan akhir yang didapatkan setelah melakukan penelitian dan saran untuk pengembangan dari penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa tinjauan penelitian yang menyangkut tentang studi Perancangan Plts Untuk Menyuplai Daya Pada Proses Elektrolisis Dalam Kebutuhan Hidrogen telah dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu, antara lain:

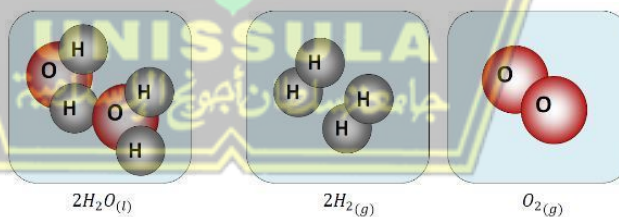
1. Rancangan Panel Surya sebagai Sumber Energi Listrik pada Gedung Fakultas Sains dan Teknologi Unisnu Jepara[1]. Dalam hal ini penelitian difokuskan pada menghitung daya listrik saat beban puncak dan menghitung total daya keseluruhan dalam waktu 24 untuk merancang PLTS pada gedung Saintek Unisnu Jepara. Setelah dilakukan perhitungan maka diketahui bahwa konsumsi energi listrik harian gedung saintek unisnu sebesar 383,294 kWh, sedangkan PLTS mampu membangkitkan energi listrik rata-rata harian 418,59 kWh. Produksi energi listrik PV Array kurang dari kebutuhan beban pada bulan desember 352,13 kWh (-31,164 kWh), Januari 322,34 kWh (-60,954 kWh) Februari 346,02 kWh (-37,094 kWh)
2. Pemanfaatan Energi Matahari sebagai Sumber Energi Alternatif pada Proses Produksi Hidrogen pada Hidrofill.[2] pada penelitiannya yang berjudul menurut penelitiannya pengujian yang dilakukan dengan menggunakan kontrol PID dan tanpa menggunakan kontrol PID maka didapatkan hasil bahwa dengan menggunakan kontrol PID dapat menghemat konsumsi energi listrik. Ketika tidak menggunakan kontrol PID konsumsi energi listrik mencapai 5,594 per m³H₂ sedangkan jika menggunakan kontrol PID maka dapat dilakukan penghematan sebesar 194 per m³H₂ dengan energi listrik yang dikonsumsi sebesar 5,400 per m³H₂.
3. Mesin Inhalasi Hydroxy Kapasitas 24-36 Watt Berbasis Solar Cell[3]. Berdasarkan hasil percobaan pada alat dengan daya maksimum 36 watt dan kadar NaOH 10% sebagai katalis terhadap seluruh volume air yang digunakan, rata-rata kenaikan volume gas hidrogen untuk setiap kenaikan arus 0,1 A selama 30 menit adalah 15,21 ml dan gas oksigen sebesar 33,6 ml. Sedangkan

rata-rata kenaikan volume gas hidrogen berdasarkan kenaikan suhu 1°K dan kenaikan arus 0,1 A adalah 0,77 ml dan kenaikan oksigen sebesar 1,5 ml.

4. Pengaruh Penggunaan Frekuensi Listrik terhadap Performa Generator HHO dan Unjuk Kerja Engine Honda Kharisma 125 cc.[4] Pengujian dilakukan secara eksperimen menggunakan Generator HHO pada mesin Honda Kharisma 125cc. Generator HHO menggunakan elektroda pipa Stainless steel AISI 316L dengan ukuran $\varnothing 21\text{mm} \times 101\text{mm}$, $\varnothing 34\text{mm} \times 101\text{mm}$, $\varnothing 48\text{mm} \times 101\text{mm}$ dan $\varnothing 61\text{mm} \times 101\text{mm}$ dengan ketebalan 3 mm, larutan elektrolit aquades 2 liter dan KOH 1,4. Variasi yang diberikan pada generator HHO adalah besar frekuensi listrik. Untuk pengujian, perubahan kecepatan dilakukan dengan full open throttle menggunakan chassis water brake dynamometer. Pengujian dilakukan pada putaran mesin kelipatan 500 rpm, mulai dari 3500 rpm sampai dengan 8500 rpm. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah frekuensi untuk generator dengan efisiensi termal terbaik berada pada 10Hz sebesar 20,06%. Dengan daya generator 118,74 Watt, debit 13,13 L/jam, kenaikan suhu $0,7^{\circ}\text{C}/\text{menit}$.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Gas Brown



Gambar 2. 1 Skema Pemecahan Molekul Air

Gas HHO merupakan gas hasil dari proses pemecahan molekul air murni (H_2O) dengan proses elektrolisis. Gas yang dihasilkan dari proses elektrolisis air tersebut adalah gas Hidrogen dan Oksigen, dengan komposisi 2 Hidrogen dan 1 Oksigen. Pada tahun 1974 Ilmuwan asal Bulgaria, yakni “Yull Brown” menemukan metode yang tepat dalam elektrolisis air untuk menghasilkan gas HHO Kemudian dipatenkan untuk disebut "*gas brown*." Brown gas terdiri dari gas hidrogen dan oksigen, pada komponen utama pembakaran.

2.2.2 Generator HHO (Hydroxy H₂O)

Properties gas HHO yang terdiri dari atom-atom hydrogen mempunyai properties seperti pada tabel:

Table 2. 1 Properti Gas Hidrogen

Reference temperature	68 °F/528 °R	293 K
Standard pressure (1 atm) psia	14.69 psia	101.325 kPa (abs)
Density (at 528 °R and 1 atm)	0.00523 lb/ft ³	83.7 g/m ³
Specific volume (at 528 °R and 1 atm)	191.4 ft ³ /lb	0.0119 m ³ /g
Specific heat	Cp = 3.425 Btu/lb-R Cv = 2.419 Btu/lb-R	Cp = 14.33 J/g-k Cv = 10.12 J/g-k
Velocity of sound	4246 ft/sec Low = 51596 Btu/lb	1294 m/sec Low = 119.93 kJ/g
Heat of combustion	High = 61031 Btu/lb	High = 141.86 kJ/g
Flammability limits		
Hydrogen-air mixture	Lower = 4.0 vol%	Upper = 75 vol%
Hydrogen-oxygen mixture	Lower = 4.0 vol%	Upper = 95 vol%
Explosive limits		
Hydrogen-air mixture	Lower = 18.3 vol%	Upper = 59 vol%
Hydrogen-oxygen mixture	Lower = 15.0 vol%	Upper = 90 vol%
Minimum spark ignition energy at 1 atm		
In air	1.9×10 ⁻⁸ Btu	0.02 mJ
In Oxygen	6.6×10 ⁻⁹ Btu	0.007 mJ

Sumber: Nasa Glenn Research Center Glenn Safety Manual (Chapter 6, 2010)

Gas HHO terdiri atas gas Hidrogen dan Oksigen dengan perbandingan mol sebesar 2:1. Perbandingan ini merupakan rasio stoikiometri yang ideal untuk mendukung reaksi pembakaran (oksidasi) antara gas Hidrogen dan Oksigen. Pada dasarnya, reaksi pembakaran gas HHO adalah proses pengikatan kembali Hidrogen dengan Oksigen yang menghasilkan molekul air.

Gas hidrogen memiliki sejumlah sifat khas, antara lain tidak berwarna, sangat ringan, mudah terbakar, serta sangat reaktif terhadap berbagai zat kimia lain. Meskipun demikian, gas HHO pada kondisi normal tidak akan mengalami pembakaran secara spontan tanpa adanya sumber panas eksternal, seperti api. Karakteristik reaktivitas tinggi ini menjadikan hidrogen rentan berinteraksi dengan unsur atau senyawa lain, namun tetap memerlukan pemicu energi agar proses pembakaran dapat berlangsung.

Table 2. 2 Properti Gas Hidrogen

Reference temperature	68 °F/528 °R	293 K
Standard pressure (1 atm) psia	14.69 psia	101.325 kPa (abs)
Density (at 528 °R and 1 atm)	0.00523 lb/ft ³	83.7 g/m ³
Specific volume (at 528 °R and 1 atm)	191.4 ft ³ /lb	0.0119 m ³ /g
Specific heat	Cp = 3.425 Btu/lb-R Cv = 2.419 Btu/lb-R	Cp = 14.33 J/g-k Cv = 10.12 J/g-k
Velocity of sound	4246 ft/sec Low = 51596 Btu/lb High = 61031 Btu/lb	1294 m/sec Low = 119.93 kJ/g High = 141.86 kJ/g
Heat of combustion		
Flammability limits		
Hydrogen-air mixture	Lower = 4.0 vol%	Upper = 75 vol%
Hydrogen-oxygen mixture	Lower = 4.0 vol%	Upper = 95 vol%
Explosive limits		
Hydrogen-air mixture	Lower = 18.3 vol%	Upper = 59 vol%
Hydrogen-oxygen mixture	Lower = 15.0 vol%	Upper = 90 vol%
Minimum spark ignition energy at 1 atm		
In air	1.9×10 ⁻⁸ Btu	0.02 mJ
In Oxygen	6.6×10 ⁻⁹ Btu	0.007 mJ

Sumber: *Nasa Glenn Research Center Glenn Safety Manual (Chapter 6, 2010)*

2.2.3 Prinsip Kerja Generator HHO

Terdiri atas dua elemen utama, yakni unit pencatu daya dan tabung generator HHO, secara umum sistem produksi gas HHO dirancang. Biasanya, elektroda berbahan stainless steel dan titanium digunakan secara berpasangan pada tabung generator HHO, bersamaan dengan larutan elektrolit sebagai media elektrolisis, sedangkan tabungnya sendiri berfungsi sebagai wadah reaksi. Arus listrik yang diperlukan untuk menguraikan molekul air menjadi gas hidrogen dan oksigen, disuplai oleh pencatu daya, dengan sumber energi yang tersimpan di dalam baterai.

Berdasarkan prinsip kerjanya, generator gas HHO mengandalkan proses elektrolisis air guna menghasilkan gas hidrogen dan oksigen. Seiring waktu, gelembung-gelembung gas hidrogen dan oksigen yang terbentuk pada elektroda akan meningkat volumenya, mengapung ke atas, lalu menuju permukaan larutan. Disebutkan dalam beberapa penelitian, gas hasil proses ini diduga berikatan dan membentuk senyawa yang dikenal sebagai gas HHO. Berbeda dengan struktur H₂O yang melibatkan dua ion H⁺ berikatan dengan satu ion O²⁻ melalui ikatan kovalen, gas HHO diyakini tersusun atas dua ion H⁺ yang secara magnetis berikatan dan mengikat satu ion O²⁻. Namun demikian, di komunitas ilmiah pendapat tersebut masih hangat diperdebatkan, sebab hingga saat ini belum tersedia metode atau instrumen empiris yang mampu membuktikan struktur ikatan sebagaimana diklaim. Oleh karena tidak terdapat bukti empiris terkait ikatan antargasnya, maka penelitian

ini mengasumsikan bahwa gas Hidrogen dan Oksigen yang dihasilkan tidak saling berikatan, dan campurannya tetap disebut sebagai gas HHO.

2.2.4 Produksi Gas HHO

Proses elektrolisis air memungkinkan produksi gas HHO, di mana dari setiap 1 liter air dapat dihasilkan sekitar 1.750 liter gas tersebut. Oleh karena itu, air dapat dianggap sebagai sumber bahan bakar alternatif dalam bentuk gas yang dihasilkan secara langsung sesuai kebutuhan (*on-demand*), tanpa memerlukan penyimpanan dalam tabung bertekanan besar. Pendekatan ini juga meminimalkan potensi kebocoran gas yang dapat menyebabkan risiko ledakan.

Standar produksi gas HHO yang umum dijadikan acuan merujuk pada hasil penelitian oleh Faraday, yang menyatakan bahwa untuk menghasilkan 1 liter gas HHO per jam dibutuhkan suplai daya sebesar 2,36 watt. Hal ini setara dengan laju produksi sekitar 1/60 liter per menit (16,6 cc/menit). Nilai ini kemudian digunakan sebagai tolok ukur untuk menyatakan tingkat produktivitas gas HHO sebesar 100%

Luas permukaan pelat elektrolisis yang mampu beroperasi secara optimal ditentukan berdasarkan kebutuhan arus listrik, di mana setiap 1 cm² permukaan pelat memerlukan arus sebesar 0,24 ampere. Dengan demikian, 1 ampere arus listrik setara dengan luas pelat sekitar 4 cm². Berdasarkan perhitungan tersebut, dimensi pelat dapat dirancang sesuai dengan besar arus listrik yang akan dialirkan ke dalam sistem elektrolisis.

Setiap sel elektrolisis, yang terdiri dari satu elektroda positif dan satu elektroda negatif, memerlukan tegangan minimum sebesar 1,23 volt untuk memulai proses pemisahan molekul air. Namun, akibat adanya kehilangan efisiensi dalam sistem, tegangan operasional maksimum yang disarankan adalah sebesar 2 volt. Pemberian tegangan melebihi 2 volt cenderung menghasilkan panas berlebih yang dapat mengurangi efisiensi dan menurunkan kinerja sistem elektrolisis.

2.2.5 Generator HHO berbentuk pelat

Pada penelitian-penelitian sebelumnya, elektroda berbentuk spiral lebih banyak digunakan pada generator HHO. Namun, akhir-akhir ini, telah mulai dikembangkan jenis elektroda berbentuk pelat, sebagaimana diperlihatkan pada gambar 1.3 generator HHO. Penggunaan elektroda dalam bentuk pelat ini dianggap

sebagai inovasi baru dalam perkembangan generator HHO generasi selanjutnya. Inovasi tersebut dinilai memiliki keunggulan dibandingkan elektroda spiral, sebab konfigurasi pelat mampu menyediakan luas permukaan yang lebih besar, sehingga dapat meningkatkan efisiensi proses elektrolisis..



Gambar 2. 2 generator HHO dengan Elektroda Berbentuk Susunan Pelat

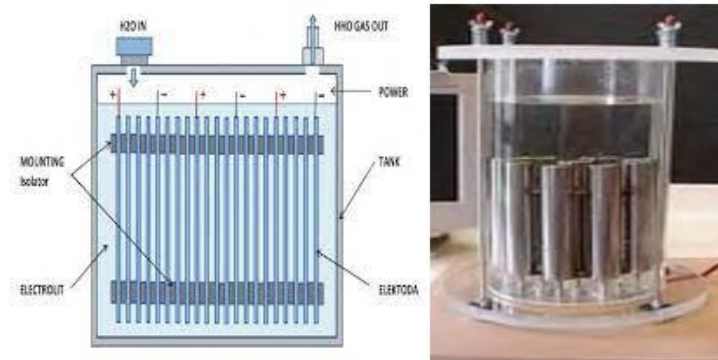
2.2.6 Klasifikasi Generator HHO

Generator HHO diklasifikasikan ke dalam dua jenis utama, yaitu tipe basah (*wet cell*) dan tipe kering (*dry cell*).

2.2.6.1 Generator HHO Tipe Basah (*Wet Cell*)

Pada generator tipe basah, elektroda secara keseluruhan tercelup dalam cairan elektrolit yang ditempatkan dalam sebuah bejana air—seperti terlihat pada gambar 2.3. Beberapa keunggulan dapat ditemukan pada tipe basah (*wet cell*) ini, antara lain sebagai berikut:

1. Volume gas yang dihasilkan, umumnya lebih melimpah dan stabil.
2. Lebih mudah dilakukan, perawatan generator jenis ini.
3. Lebih sederhana, proses perancangan dan pembuatan generator HHO tipe basah dibandingkan tipe lain.



Gambar 2. 3 Bentuk Generator HHO Tipe Basah (Wet Cell)

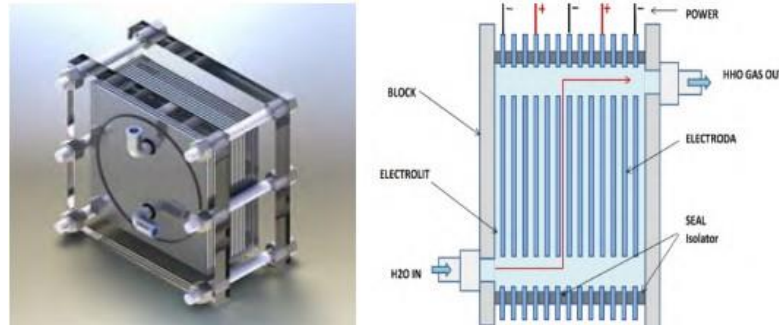
2.2.6.2 Generator HHO Tipe Kering (Dry Cell)

Tipe kering (dry cell) merupakan jenis generator HHO di mana elektroda tidak seluruhnya terendam dalam larutan elektrolit, melainkan hanya bagian celah di antara elektroda yang diisi oleh elektrolit, dengan pembatas berupa gasket karet. Bentuk fisik dari generator HHO tipe dry cell dapat dilihat pada Gambar 2.4, yang menggambarkan konfigurasi khas dari sistem ini.

Beberapa keunggulan dari generator HHO tipe dry cell antara lain:

1. Volume udara yang mengalami elektrolisis relatif sedikit, yaitu hanya udara yang terperangkap di antara celah elektroda.
2. Panas yang dihasilkan selama proses elektrolisis relatif rendah karena adanya sirkulasi antara udara panas dan dingin di dalam reservoir, sehingga suhu cenderung stabil. Selain itu, panas dari elektroda dapat diminimalkan melalui pendinginan alami oleh udara bebas.
3. Penggunaan arus listrik (ampere) yang lebih rendah juga terkait dengan terbatasnya area permukaan elektroda yang tersedia untuk elektrolisis, sehingga hanya sedikit energi yang terbuang sebagai panas.
4. Ruang gerak arus listrik dari elektroda dibatasi oleh volume air yang berada di antara pelat elektroda, sehingga pemanfaatan arus listrik dalam proses elektrolisis dapat berlangsung secara lebih optimal.
5. Kecilnya arus listrik (ampere) yang dibutuhkan pada sistem ini merupakan akibat dari berkurangnya konversi daya menjadi panas. Faktor lain yang

turut mempengaruhi adalah luas permukaan elektroda yang relatif sempit, sehingga turut menentukan efektivitas proses elektrolisis.



Gambar 2. 4 Bentuk Generator HHO Tipe kering (Dry Cell)

Secara garis besar, dua komponen utama diperlukan dalam proses elektrolisis untuk menghasilkan gas HHO, yaitu tabung generator HHO (HHO Cell) dan sumber daya listrik. Ketika sistem ini akan diintegrasikan pada mesin tertentu, sejumlah komponen pendukung tambahan juga harus disediakan agar dapat berfungsi secara optimal. Oleh karena itu, keseluruhan sistem generator HHO dapat dibagi ke dalam beberapa bagian utama sesuai dengan kebutuhan aplikasinya, antara lain:

2.2.6.3 Reservoir

Reservoir berfungsi sebagai wadah penampungan awal larutan elektrolit sebelum dialirkan ke HHO Cell. Komponen ini memiliki beberapa fungsi penting, antara lain:

1. Sebagai tempat pengisian awal larutan elektrolit ke dalam sistem.
2. Memungkinkan pemantauan ketinggian atau volume larutan elektrolit yang tersisa.
3. Bertindak sebagai perangkap air (water trap), khususnya pada sistem HHO tipe kering, dengan mengarahkan aliran gas HHO ke reservoir terlebih dahulu sebelum dialirkan ke mesin.
4. Apabila dilengkapi dengan skala pengukur, reservoir juga dapat digunakan untuk mengukur laju konsumsi elektrolit dalam satuan waktu tertentu.

2.2.6.4 HHO Cell

Komponen HHO Cell berfungsi sebagai tempat terjadinya proses elektrolisis air, di mana air diuraikan menjadi gas hidrogen dan oksigen melalui aliran arus listrik yang melewati elektroda sebagai mediator. Secara umum, HHO Cell terbagi menjadi dua jenis, yaitu tipe dry cell dan wet cell sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.4 dan 2.5. Pada tipe dry cell, elektroda umumnya terbuat dari pelat stainless steel yang dirangkai berlapis-lapis dengan tambahan gasket atau o-ring di antara pelat, agar larutan elektrolit hanya mengalir di area reaksi yang diinginkan.

Sementara pada tipe wet cell, seluruh bagian elektroda dicelupkan langsung ke dalam wadah yang berisi elektrolit. Beragam variasi pada bentuk, jumlah, dimensi, dan jarak antar elektroda akan memberikan pengaruh signifikan terhadap besarnya konsumsi arus listrik maupun volume gas HHO yang dihasilkan selama proses elektrolisis berlangsung.

2.2.6.5 Selang Gas HHO

Saluran gas berperan sebagai media penghantar gas hidrogen dan oksigen yang dihasilkan dari proses elektrolisis menuju mesin yang akan menerima suplai gas HHO. Umumnya, saluran ini menggunakan selang berdiameter kecil yang tahan terhadap suhu tinggi dan memiliki ketahanan terhadap kebocoran. Untuk mencegah terjadinya aliran balik gas yang dapat membahayakan sistem, biasanya dipasang katup satu arah (check valve) pada bagian saluran ini.

2.2.6.6 Pemilihan Elektroda Generator HHO

Dalam proses elektrolisis air, elektroda memegang peranan kunci sebagai penghantar arus listrik dari sumber tegangan menuju air yang akan dielektrolisis, sehingga reaksi redoks dapat berlangsung. Pada bagian anoda (kutub positif) terjadi reaksi oksidasi, sedangkan di katoda (kutub negatif) berlangsung reaksi reduksi. Dengan demikian, pemilihan material elektroda perlu memperhatikan aspek konduktivitas listrik yang optimal dan ketahanan terhadap korosi, guna menjamin efisiensi serta daya tahan sistem secara keseluruhan.

Table 2. 3 *Spesifikasi Stainless Steel*

Designation	Type	Composition weight-%						Others
		Cr	Ni	Mo	C	Mn	Si	
AISI 300 Series:								
AISI 304	Austenitic	18–20	8–10.5	—	<0.08	2	1	Ti = 5 × wt-% C Nb = 10 × wt-% C
AISI 304L	Austenitic	18–20	8–12	—	<0.03	2	1	
AISI 321	Austenitic	18–20	8–10.5	—	<0.08	2	1	
AISI 347	Austenitic	18–20	8–10.5	—	<0.08	2	1	
AISI 316	Austenitic	16–18	10–14	2.0–3.0	<0.08	2	1	
AISI 316L	Austenitic	16–18	10–14	2.0–3.0	<0.02	2	1	
AISI 317	Austenitic	18–20	11–15	3.0–4.0	<0.08	2	1	
AISI 317L	Austenitic	18–20	11–15	3.0–4.0	<0.03	2	1	
AISI 310	Austenitic	24–26	19–22	—	<0.25	2	1.5	—
AISI 330	Austenitic	17–20	34–37	—	<0.08	2	1.5	—
AISI 200 Series:								
AISI 201	Austenitic	16–18	3.5–5.5	—	0.15	5.5–7.5	1	+ 0.25 N
AISI 202	Austenitic	17–19	4–6	—	0.15	7.5–10	1	+ 0.25 N
AISI 400 Series:								
AISI 409	Ferritic	10.5–11.7	<1	—	<0.08	1	1	—
AISI 430	Ferritic	16–18	<1	—	<0.08	1	1	—
AISI 434	Ferritic	16–18	<1	0.8–1.2	<0.08	1	1	—
AISI 410	Martensitic	11.5–13.5	<1	—	0.15	1	1	—
AISI 431	Martensitic	15–17	1.2–2.5	—	0.20	1	1	—
Duplex Steels:								
Steel 1	Duplex	25	6.0	3.0	<0.08	—	—	1.5 Cu + 0.25 N
Steel 2	Duplex	25	5.5	3.0	<0.08	—	—	
Precipitation-Hardening Steels:								
Steel 1	Precipitation	16	4.2	—	0.04	0.5	0.5	3.5 Cu
Steel 2	Precipitation	15	4.5	—	0.04	0.3	0.4	3.5 Cu + Nb

Sumber : *Corrosion Science and Technology* (David Tabolt, 1998)

Pada dasarnya, stainless steel merupakan jenis baja hasil perpaduan antara logam besi (Fe) dengan beberapa unsur utama, seperti karbon (C), nikel (Ni), dan kromium (Cr). Logam paduan ini dikenal memiliki konduktivitas listrik yang cukup baik serta daya tahan terhadap korosi yang lebih unggul dibandingkan kebanyakan logam murni maupun paduan logam lainnya. Selain itu, stainless steel juga menawarkan keunggulan dalam hal biaya produksi yang lebih ekonomis. Secara umum, stainless steel dapat dibedakan ke dalam lima kelompok utama yaitu Austenitic Stainless Steel, Ferritic Stainless Steel, Martensitic Stainless Steel, Duplex Stainless Steel, Precipitation Hardening Stainless Steel.

Setiap jenis stainless steel dikategorikan lebih lanjut menjadi beberapa tipe, yang masing-masing memiliki proporsi serta kandungan unsur paduan yang beragam. Variasi komposisi ini memengaruhi sifat konduktivitas listrik dan ketahanan terhadap korosi dari masing-masing tipe. Salah satu jenis yang banyak dijumpai di pasaran adalah stainless steel tipe SS 316L, yang dikenal memiliki konduktivitas listrik dan ketahanan korosi yang cukup baik. Berdasarkan karakteristik tersebut, SS 316L dipilih sebagai material elektroda dalam penelitian ini.

2.2.6.7 Larutan Elektrolit sebagai Katalis Generator HHO

Pada proses elektrolisis air, larutan elektrolit memainkan peranan sebagai katalis yang memfasilitasi terjadinya reaksi elektrokimia. Elektrolit sendiri merupakan penghantar listrik di mana arus listrik dialirkan melalui perpindahan ion-ion dalam larutan. Dengan menambahkan elektrolit ke dalam air, konduktivitas listrik larutan akan meningkat secara signifikan. Oleh sebab itu, pemilihan jenis dan konsentrasi elektrolit merupakan aspek krusial yang menentukan tingkat efisiensi proses elektrolisis.

Penambahan elektrolit ini berfungsi untuk menurunkan energi yang diperlukan dalam proses elektrolisis air sehingga pemecahan molekul air dapat berlangsung dengan laju yang lebih cepat. Semakin tinggi jumlah elektrolit yang dilarutkan ke dalam air, maka semakin besar pula peningkatan konduktivitas listrik larutan, yang secara langsung meningkatkan laju produksi gas HHO. Namun, apabila konsentrasi elektrolit terlalu tinggi hingga larutan menjadi jenuh, energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan gas HHO justru akan meningkat, karena pergerakan ion-ion dalam larutan mengalami hambatan.

Beragam jenis katalis dapat dimanfaatkan dalam proses elektrolisis, baik yang bersifat asam maupun basa. Katalis golongan asam meliputi kalium klorida (KCl), natrium klorida (NaCl), serta natrium karbonat (Na_2CO_3), sedangkan katalis basa mencakup natrium hidroksida (NaOH), kalium hidroksida (KOH), dan natrium bikarbonat (NaHCO_3). Pada penelitian ini, katalis yang digunakan adalah kalium hidroksida (KOH) dengan konsentrasi 9,5 gram per liter air (H_2O).

2.2.6.8 Parameter Performa Generator HHO

Penentuan daya yang dibutuhkan oleh generator HHO beserta pengaruhnya terhadap performa mesin yang akan digunakan merupakan salah satu aspek krusial dalam instalasi sistem HHO. Optimalisasi kedua faktor ini secara simultan diperlukan agar kinerja generator dan mesin dapat mencapai standar yang diharapkan sesuai dengan kondisi operasional yang berlaku. Beberapa parameter kinerja generator HHO yang akan dibahas meliputi:

2.2.6.9 Daya Generator HHO

Proses elektrolisis air untuk menghasilkan gas HHO memerlukan pasokan energi listrik sebagai sumber daya. Pada penelitian ini, energi listrik diperoleh langsung dari panel surya. Besarnya daya yang dibutuhkan oleh generator HHO dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P = V \times I \quad (2.1)$$

Energi yang disuplai pada generator HHO

$$E = V.I.T \quad (2.2)$$

I = Aruslistrik(ampere)

V = Tegangan(Volt)

T = Waktu(hours)

E = Energi yang digunakan (watt-hours)

2.2.6.10 Laju Produksi Gas HHO

Hasil utama proses elektrolisis air menggunakan generator HHO adalah gas HHO itu sendiri. Oleh karena itu, untuk mengevaluasi kinerja dari generator HHO, diperlukan data mengenai laju produksi gas HHO yang dihasilkan selama proses elektrolisis berlangsung.

Untuk menghitung *mass flowmeter* gas HHO (m_{HHO}) dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut

$$m_{HHO} = Q \times P \quad (2.3)$$

m_{HHO} : laju produksi gas HHO (kg/s)

Debit (Q) : debit produksi gas HHO (m^3/s)

ρ : Masa jenis (HHO) (kg/m^3)

Dengan menghitung persamaan debit gas HHO:

$$Q = \frac{Volume}{t_{prod}} \quad (2.4)$$

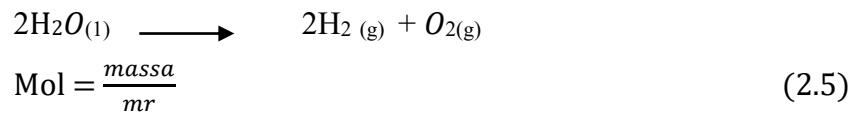
Dimana :

Volume : volume gas HHO terukur (m^3)

t_{prod} : waktu produksi gas HHO (s)

Persamaan reaksi kimia elektrolisis air berdasarkan reaksi kimia elektrolisis air (H_2O), dapat dihitung kandungan massa gas hidrogen (H_2) dalam gas HHO. Jika

air yang mengalami elektrolisis memiliki massa sebesar 1 kg, maka total massa gas hasil reaksi, yaitu hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2), juga sebesar 1 kg. Dengan memperhatikan massa molekul relatif (Mr) dari $H_2O = 18$, $H_2 = 2$, dan $O_2 = 32$, maka jumlah mol hidrogen (H_2) yang dihasilkan persamaanya sebagai berikut:



Diketahui bahwa dari 2 mol air akan dihasilkan 2 mol gas hidrogen (H_2) dan 1 mol gas oksigen (O_2). Dari persamaan tersebut, kita dapat menentukan proporsi massa gas H_2 dalam total 1 kg gas HHO yang dihasilkan. Untuk menghitungnya, dilakukan langkah-langkah berikut

$$\begin{aligned} M_{H_2} &= Mr H_2 \times Mol H_2O = 2 \times 1/18 = 1/9 \text{ kg} = 0,112 \text{ kg} \\ n_{H_2O} &= \frac{m_{H_2O}}{Mr H_2O} = \frac{1 \text{ kg}}{18} = 0,056 \text{ mol} \\ n_{H_2} &= \frac{m_{H_2}}{mr_{H_2}} = \frac{0,112 \text{ kg}}{2} = 0,056 \text{ mol} \end{aligned}$$

Pada kondisi standar temperatur dan tekanan (STP), massa jenis gas hidrogen (H_2) adalah 0,08235 gram/liter, sedangkan massa jenis gas oksigen (O_2) adalah 1,3088 gram/liter. Untuk menghitung massa jenis campuran gas HHO, digunakan pendekatan berdasarkan rasio volume masing-masing komponen gas dalam campuran tersebut.

Gas HHO merupakan campuran dari dua bagian volume H_2 dan satu bagian volume O_2 , sehingga totalnya adalah tiga bagian volume. Dengan demikian, massa jenis HHO (ρ_{HHO}) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \rho_{HHO} &= \frac{m_{HHO}}{V_{HHO}} = \frac{(m_{HHO} + m_{O_2})}{V_{HHO}} \\ &= \frac{(\rho_{H_2} \cdot V_{HHO} + m_{H_2} + m_{O_2})}{V_{HHO}} \\ &= \frac{(\rho_{H_2} \cdot \frac{2}{3} V_{HHO} + \rho_{O_2} \cdot \frac{1}{3} V_{HHO})}{V_{HHO}} = \frac{2}{3} \rho_{H_2} + \frac{1}{3} \rho_{O_2} \\ \rho_{HHO} &= (2/3 \times 0,08235 \text{ gr/liter} + 1/3 \times 1,3088 \text{ gr/liter}) \\ &= 0,491167 \text{ gr/liter} \end{aligned}$$

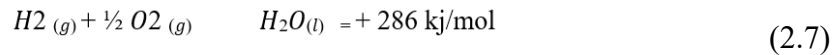
2.2.6.11 Efisiensi generator

Efisiensi dapat diartikan sebagai rasio antara energi output yang dapat dimanfaatkan dengan total energi input yang diterima oleh suatu sistem. Tingkat efisiensi pada perangkat konversi energi menjadi indikator utama yang merefleksikan seberapa efektif alat tersebut dalam menjalankan fungsinya secara optimal.

$$\eta = \frac{\text{Energi yang berguna (output)}}{\text{Energi yang diberikan (input)}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Produk utama yang dihasilkan dari proses elektrolisis air menggunakan generator HHO adalah gas HHO, yang terdiri atas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Gas HHO ini memiliki nilai kalor yang sangat tinggi, sehingga kandungan energinya dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi proses pembakaran pada mesin berbasis pembakaran dalam. Karakteristik gas HHO secara umum mirip dengan sifat-sifat gas hidrogennya sebagai komponen penyusunnya.

Perubahan entalpi pembakaran standar merupakan total perubahan entalpi dalam suatu reaksi kimia, di mana reaktan dan produk diperlakukan sebagai bagian integral dari sistem termodinamika. Perubahan ini terjadi apabila satu mol senyawa bereaksi sempurna dengan oksigen pada suhu 298 K dan tekanan 1 atm. Biasanya, nilai entalpi pembakaran dinyatakan dalam satuan joule atau kilojoule per mol reaktan yang sepenuhnya bereaksi dengan oksigen. Energi yang dimiliki oleh suatu zat, baik potensi yang berkaitan dengan keadaan, volume, dan tekanan, maupun energi kinetik yang berasal dari gerakan acak partikel di dalamnya, secara keseluruhan disebut sebagai entalpi (H). Selama tidak ada energi yang keluar ataupun masuk dari sistem, entalpi akan tetap konstan. Sebagai contoh, entalpi air dalam fase cair dapat dituliskan sebagai $H_2O_{(l)}$, sedangkan pada fase padat sebagai $H_2O_{(s)}$. Total energi yang dimiliki oleh suatu zat menentukan besaran entalpinya, walaupun nilai absolut dari energi tersebut tidak dapat diukur secara langsung. Setiap perubahan energi selama proses penyerapan atau pelepasan kalor akan mengakibatkan perubahan entalpi (ΔH), yang dapat diamati pada proses termodinamika. Perubahan kalor ini, atau perubahan entalpi, diwakili oleh simbol Δh , seperti yang dapat ditunjukkan pada persamaan reaksi kimia berikut[5]:



Persamaan reaksi kimia tersebut sesungguhnya merupakan kebalikan dari reaksi elektrolisis air. Reaksi ini bersifat endoterm, di mana terjadi penyerapan energi sehingga nilai perubahan entalpi yang dihasilkan adalah positif (+). Besarnya energi entalpi yang dibutuhkan, yaitu $\Delta h_f = +286 \text{ kJ/mol}$, menunjukkan bahwa agar molekul air dapat diuraikan melalui proses elektrolisis, energi harus disuplai ke dalam sistem. Sebaliknya, pada reaksi oksidasi hidrogen, sejumlah energi akan dilepaskan ke lingkungan karena reaksi tersebut bersifat eksoterm.

Energi ikatan yang diperlukan dapat ditentukan melalui penurunan persamaan gas ideal pada kondisi standar temperatur dan tekanan (STP), yang dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$PV = \frac{n}{R} \cdot T \quad (2.8)$$

P	: Tekanan gas ideal	(atm)
V	: Volume gas terukur	(liter)
n	: Molaritas senyawa	(mol)
R	: Konstanta gas ideal	(liter.atm/mol.K)
T	: Temperatur	(K)

Massa H_2 dalam gas HHO hanya sebesar $1/9$ masa total gas HHO, maka NKB gas HHO adalah $1/9$ kali NKB gas H_2 yaitu: $1/9 \times 119,93 \text{ kJ/g} = 13,325 \text{ kJ/g}$ atau $3812,754 \text{ kkal/kg}$. Jika pada STP massa jenis H_2 diketahui sebesar: $0,08235 \text{ gr/liter}$ dan O_2 sebesar: $1,3088 \text{ gr/liter}$, maka efisiensi generator HHO dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$\eta = \Delta h_f \cdot n \cdot t \cdot V \cdot I \cdot t \times 100\% \quad (2.9)$$

keterangan:

η : efisiensi(%)

Δh_f : (+286 kJ/mol)

n : molaritas senyawa per waktu(mol/s)

V : Tegangan Listrik(Volt)

I : Arus Listrik(Ampere)

T : waktu operasi(sekon)

2.2.7 Sumber Energi Listrik dengan Menggunakan PLTS

2.2.7.1 Energi Surya (*Photovoltaic*)

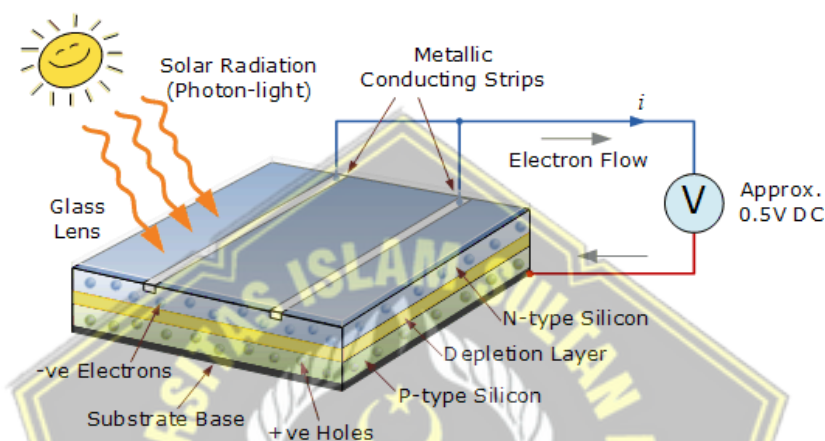
Energi dalam kehidupan manusia pada dasarnya merupakan perpindahan energi yang dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan. Salah satu sumber energi yang sangat penting adalah energi matahari, yang diperlukan oleh banyak makhluk hidup. Selain berperan sebagai sumber energi panas, energi matahari juga menyediakan energi cahaya. Energi surya ini dapat langsung dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik. Secara umum, energi surya merupakan perpaduan antara panas dan sinar yang dipancarkan oleh matahari. Pemanfaatannya dapat dilakukan melalui berbagai teknologi, seperti pemanas surya, pembangkit listrik tenaga panas surya, panel fotovoltaik, fotosintesis buatan, serta desain arsitektur berbasis surya. Dalam praktiknya, pemanfaatan energi surya dapat dibedakan menjadi tiga metode utama. Pertama, pemanasan langsung, di mana sinar matahari secara langsung memanaskan objek atau medium tertentu, contohnya seperti menjemur pakaian. Kedua, penggunaan kolektor surya untuk memanaskan suatu medium dengan bantuan sinar matahari. Ketiga, konversi energi matahari menjadi energi listrik melalui penggunaan sel surya (*solar cell*)[6].

2.2.7.2 Prinsip kerja Photovoltaic

Ketika sinar matahari mengenai bahan semikonduktor seperti silikon, bahan tersebut akan melepaskan sejumlah kecil listrik yang dikenal sebagai efek fotolistrik. Efek fotolistrik sendiri merupakan fenomena fisik di mana elektron dilepaskan dari permukaan logam akibat penumbukan cahaya. Proses ini merupakan dasar fisis utama dalam teknologi fotovoltaik yang mengonversi energi cahaya menjadi energi listrik.

Cahaya matahari terdiri dari partikel-partikel kecil yang disebut foton, di mana masing-masing foton membawa energi tertentu yang bergantung pada panjang gelombang dalam spektrum cahaya. Saat foton mengenai permukaan sel surya, sebagian dari cahaya tersebut dapat dipantulkan, diserap, atau diteruskan. Energi yang dihasilkan berasal dari cahaya yang berhasil diserap oleh material sel surya, yang kemudian digunakan untuk membangkitkan listrik.

Energi dari foton yang bertumbukan dengan material semikonduktor pada sel surya akan ditransfer ke elektron dalam atom semikonduktor tersebut. Energi yang diterima oleh elektron memungkinkan mereka untuk melepaskan diri dari ikatan atom semikonduktor, sehingga menghasilkan arus listrik. Pelepasan elektron ini juga menciptakan kekosongan atau hole pada struktur ikatan atom, yang kemudian berfungsi dalam pembentukan aliran muatan listrik.



Gambar 2. 5 Konversi Cahaya Matahari[7]

2.2.7.3 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Sinar matahari merupakan sumber energi utama yang dipancarkan ke bumi dan dimanfaatkan sebagai energi primer, bersama dengan energi hidro, angin, radiasi matahari, dan biomassa. Oleh sebab itu, untuk mengubah energi dari sinar matahari menjadi listrik diperlukan sebuah sistem pembangkit yang dikenal dengan sebutan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). PLTS merupakan jenis pembangkit listrik yang dalam proses kerjanya memanfaatkan energi matahari sebagai sumber utamanya.

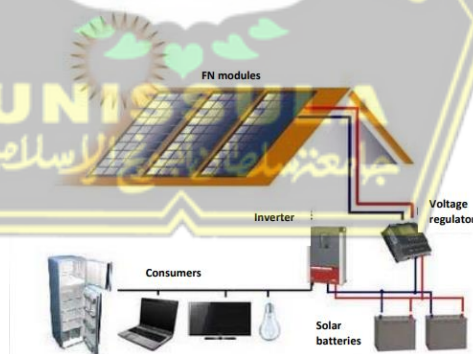
Energi listrik dapat dihasilkan melalui proses konversi energi foton dari sinar matahari menjadi energi listrik. Proses ini terjadi di dalam modul fotovoltaik (Photovoltaic Module) yang terdiri dari beberapa sel surya. Sel surya tersebut tersusun dari lapisan-lapisan tipis silikon (Si) murni serta material semikonduktor lainnya. Ketika material ini menyerap energi foton, elektron dalam ikatan atom akan tereksitasi dan menjadi bergerak bebas, sehingga menghasilkan tegangan listrik dengan arus searah (DC).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki berbagai sistem yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna. Secara umum, terdapat tiga jenis sistem PLTS yang paling umum digunakan, yaitu:

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) biasanya diklasifikasikan berdasarkan konfigurasi komponennya. Secara umum, terdapat dua tipe utama sistem PLTS, yakni sistem yang terhubung dengan jaringan listrik PLN (Grid-Connected PLTS) dan sistem yang beroperasi secara mandiri tanpa keterhubungan dengan jaringan listrik (Stand-Alone PLTS)[8].

1. PLTS off-Grid Connected

Sistem Off-Grid, yang juga dikenal sebagai sistem terisolasi, merupakan jenis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang digunakan di daerah terpencil yang belum terjangkau oleh jaringan listrik utama. Sistem ini beroperasi secara mandiri dan biasanya hanya terhubung dengan baterai sebagai media penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya. Pemanfaatan sistem Off-Grid umumnya ditujukan untuk memenuhi kebutuhan dasar kelistrikan di wilayah terpencil, seperti penyediaan listrik bagi beberapa rumah atau fasilitas komunitas skala kecil[9].

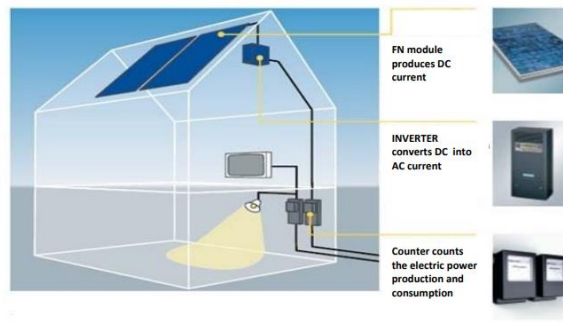


Gambar 2. 6 PLTS Sistem Off-Grid

2. PLTS On-Grid Connected

Sistem On-Grid adalah sistem pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung secara langsung dengan jaringan listrik utama dari pemerintah, sehingga masih mengandalkan pasokan listrik dari jaringan tersebut. Sistem ini umumnya dimanfaatkan untuk menekan biaya listrik serta sebagai cadangan

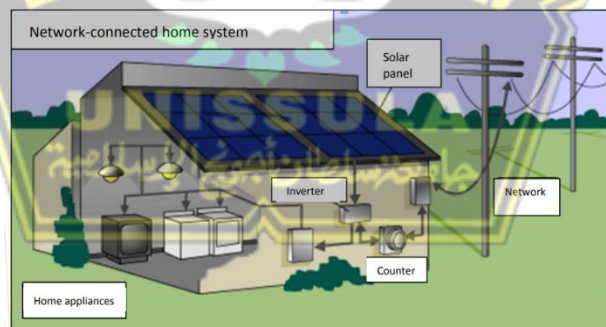
energi ketika terjadi pemadaman pada jaringan listrik utama. Skema sistem PLTS On-Grid dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 PLTS Sistem On-grid

3. PLTS *Hybrid (Network connected)*.

Sistem Hybrid (terkoneksi jaringan) adalah sistem pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung dengan jaringan listrik utama milik pemerintah. Berbeda dengan sistem On-Grid konvensional, sistem ini tidak hanya memungkinkan pemanfaatan listrik dari modul surya untuk kebutuhan internal, tetapi juga memungkinkan penyaluran serta penjualan energi listrik yang dihasilkan ke jaringan listrik utama. Sistem hybrid dapat beroperasi secara paralel dengan sistem distribusi jaringan utama karena terhubung melalui instalasi lokal[10].

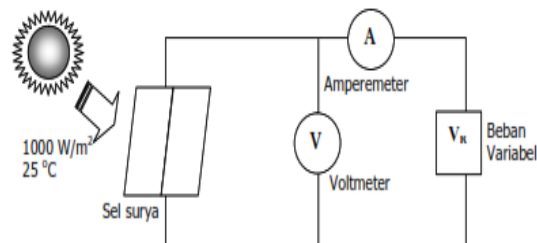


Gambar 2. 8 PLTS sistem hybrid

2.2.7.4 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

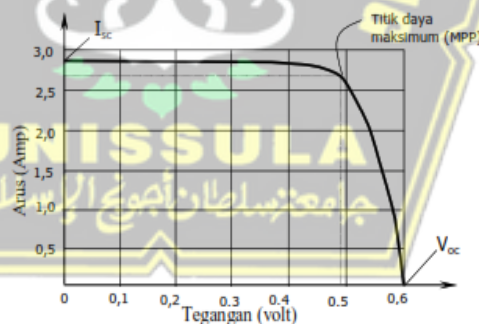
Sel surya menunjukkan sifat mirip dioda ketika berada dalam kondisi tanpa cahaya. Namun, saat sel surya terkena paparan cahaya, arus konstan mengalir berlawanan arah dengan arus pada dioda. Untuk menentukan karakteristik arus-tegangan dari sel surya, diperlukan penghubungan sel tersebut ke beban listrik yang dapat disesuaikan. Selain itu, pemasangan alat pengukur tegangan secara tepat

sangatlah penting. Pengujian sel surya sebaiknya dilakukan pada kondisi standar, yaitu dengan intensitas cahaya sebesar 1000 W/m^2 dan suhu lingkungan 25°C .



Gambar 2. 9 Rangkaian pengetesan sel surya.

Saat Dalam keadaan tanpa beban atau ketika beban terputus, tegangan terbuka V_{oc} diukur. Ini adalah tegangan maksimum yang dihasilkan oleh sel surya ketika arus (I) sama dengan nol. Sebaliknya, jika beban ditingkatkan hingga mencapai kondisi arus pendek, tegangan sel surya menjadi nol, dan arus yang mengalir adalah arus maksimum I_{sc} yang juga dikenal sebagai arus arus pendek. Dengan mengubah beban, kombinasi nilai arus dan tegangan yang dihasilkan dapat digambarkan secara grafis dalam bentuk kurva karakteristik I-V.



Gambar 2. 10 Grafik Karakteristik I-V Sel Surya

Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa sel surya menghasilkan daya maksimum pada suatu titik tertentu dalam grafik. Daya yang dihasilkan sel surya bernilai nol pada kondisi beban nol maupun saat terjadi hubung singkat. Pada grafik tersebut, titik daya maksimum (Maximum Power Point/MPP) diperoleh dari kombinasi tegangan (V_{max}) dan arus (I_{max}) yang tepat.

$$P_{max} = V_{max} \times i_{max} \quad (2.10)$$

Dalam penerapannya, penggunaan beban hendaknya selalu mengacu pada titik Maximum Power Point (MPP). Fill factor didefinisikan sebagai rasio antara hasil perkalian arus maksimum (I_{max}) dengan tegangan maksimum (V_{max}) pada titik daya maksimum (MPP) terhadap hasil perkalian arus hubung singkat (I_{sc}) dan tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}).

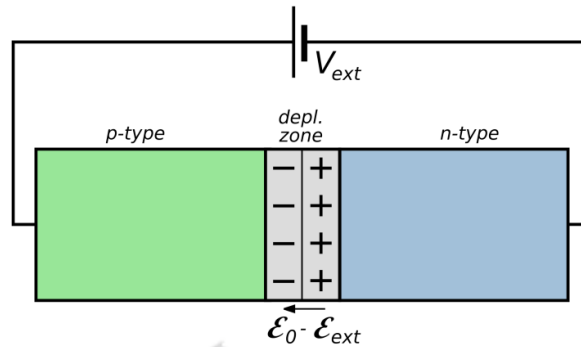
$$FF = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.11)$$

Pada tingkat radiasi matahari yang lebih rendah, area di bawah kurva grafik mengalami penurunan dan titik Maximum Power Point (MPP) bergeser ke arah kiri, meskipun bentuk kurva I-V secara umum tetap serupa. Karena intensitas radiasi matahari berubah-ubah sepanjang waktu dalam kondisi operasional nyata, diperlukan perangkat elektronik bernama Maximum Power Tracking. Perangkat ini berfungsi secara otomatis untuk mengatur variasi beban yang dikenakan pada sel surya, sehingga aliran energi yang dihasilkan menjadi optimal dengan memastikan sel surya beroperasi selalu pada titik MPP. Umumnya, sel surya memiliki tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) sekitar 0,5–0,6 Volt dan arus hubung singkat (I_{sc}) sebesar 3 Ampere untuk luas permukaan sel sekitar 100 cm²[11].

2.2.7.5 Modul Panel Surya

Prinsip kerja semikonduktor sebagai panel surya mirip dengan dioda yang memiliki sambungan p-n, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. PN-junction merupakan hasil penggabungan atau penyatuan lapisan semikonduktor tipe P dan tipe N, yang diperoleh melalui proses doping pada silikon murni. Pada semikonduktor tipe P, hole atau pembawa muatan positif lebih dominan dibandingkan elektron, sehingga hole berperan sebagai pembawa muatan mayoritas, sedangkan elektron menjadi pembawa muatan minoritas. Kondisi serupa juga berlaku pada semikonduktor tipe N. Jika bagian P dari sambungan pn dihubungkan ke kutub negatif baterai, arus listrik dapat mengalir melalui sambungan tersebut; kondisi ini disebut sebagai panjar maju (forward bias). Sebaliknya, jika sambungan dilakukan secara terbalik (panjar mundur), yaitu sisi N dihubungkan ke kutub positif dan sisi P ke kutub negatif baterai, maka arus listrik tidak akan mengalir melalui pn-junction. Meski demikian, masih terdapat arus

sangat kecil, umumnya berukuran mikroampere, yang dikenal sebagai arus bocor dan tetap dapat mengalir[12].



Gambar 2. 11 P-N Junction (Panjar-Mundur)

Setiap jenis panel surya memiliki kelebihan dan kekurangan yang unik, oleh karena itu pemilihan panel surya harus mempertimbangkan kebutuhan serta kondisi lingkungan yang spesifik[2].

Keuntungan penggunaan panel surya sangat beragam, meliputi beberapa aspek berikut:

1. Dari segi finansial, energi surya memberikan dua manfaat utama, yaitu mengurangi ketergantungan pada pembelian listrik dari perusahaan penyedia, serta menyediakan sumber energi gratis karena panel surya tidak memerlukan biaya operasional selama proses pembangkitan listrik.
2. Panel surya merupakan sumber energi terbarukan yang tidak akan habis digunakan, karena matahari secara konstan memancarkan energi yang dapat dimanfaatkan tanpa risiko kehabisan.
3. Pemasangan panel surya juga dapat meningkatkan nilai properti, mengingat berbagai manfaat dan kemudahan yang diperoleh pemilik bangunan dari penggunaan teknologi ini.
4. Sebagai teknologi yang ramah lingkungan, panel surya menghasilkan energi bersih tanpa emisi karbon, sehingga tidak berkontribusi pada polusi udara atau emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil.
5. Dengan kemajuan teknologi, sistem panel surya kini dilengkapi fitur canggih seperti pemantauan energi secara real-time, yang

memungkinkan penyesuaian pola konsumsi listrik sehingga meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem.

6. Biaya pemeliharaan panel surya relatif rendah karena kemudahan perawatan, serta adanya sistem otomatisasi yang mengurangi kebutuhan inspeksi rutin secara berkala.
7. Secara finansial, meskipun investasi awal instalasi panel surya cukup besar, penghematan biaya listrik bulanan dapat mempercepat periode pengembalian modal.
8. Selain itu, kelebihan energi listrik yang dihasilkan dapat dijual kembali ke jaringan listrik utama, sehingga memberikan nilai tambah ekonomi bagi pemilik instalasi.
9. Penggunaan energi surya sebagai sumber energi terbarukan yang terus tersedia dari sinar matahari menjamin pasokan listrik yang berkelanjutan tanpa risiko kekurangan sumber daya energi[13].

Berdasarkan manfaat yang dimiliki panel surya, terdapat pula sejumlah kelemahan yang perlu diperhatikan, antara lain:

1. Investasi awal untuk pemasangan panel surya tergolong cukup tinggi, sehingga tidak semua kalangan mampu menanggung biaya tersebut. Meski demikian, harga panel surya diperkirakan akan mengalami penurunan seiring waktu.
2. Luas area instalasi sangat memengaruhi jumlah dan ukuran panel surya yang dapat dipasang. Ketersediaan ruang menjadi faktor krusial dalam pemasangan; apabila atap atau lahan tidak memadai, pengguna harus mempertimbangkan pengurangan kapasitas sistem atau bahkan membatalkan rencana pemasangan. Salah satu keterbatasan panel surya adalah ukurannya yang relatif besar dan sulit dipasang di area yang sempit.
3. Panel surya membutuhkan intensitas sinar matahari yang cukup untuk dapat menghasilkan energi listrik. Energi hanya dapat dikonversi saat permukaan panel terpapar cahaya matahari; oleh karena itu, ketika tidak ada sinar matahari, produksi energi akan berhenti.

4. Meskipun panel surya menghasilkan energi bersih, proses manufakturnya dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Produksi massal panel surya berpotensi menghasilkan limbah bahan bakar fosil dan sampah plastik yang merugikan ekosistem.
5. Efisiensi konversi energi pada panel surya masih tergolong rendah, dimana panel terbaik hanya mampu mengubah 20-25% energi matahari menjadi listrik. Hal ini menjadi tantangan bagi pengembang untuk meningkatkan performa dan efisiensi panel dalam memaksimalkan pemanfaatan energi matahari.
6. Penggunaan panel surya tidak efektif pada malam hari karena ketiadaan cahaya matahari menyebabkan panel tidak dapat menghasilkan energi listrik.
7. Pembuangan panel surya yang sudah usang atau rusak dapat menimbulkan kerusakan lingkungan. Komponen kimiawi yang terkandung dalam panel tersebut berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik saat dibuang.

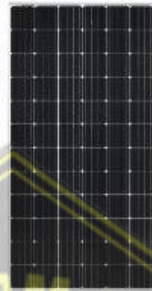
2.2.7.6 Jenis - Jenis Modul Surya

Panel surya tersusun dari berbagai jenis sel surya yang masing-masing memengaruhi output daya serta harga akhir modul tersebut. Material utama yang digunakan dalam pembuatan sel surya adalah silikon, dimana perbedaan utama antar jenis sel surya umumnya terletak pada tingkat kemurnian silikon yang digunakan. Semakin tinggi kemurnian silikon, semakin optimal pula kemampuan sel surya dalam mengonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Jenis sel surya yang beragam ini memberikan variasi dalam performa dan biaya modul surya secara keseluruhan[14].

1. Monokristal (Mono-crystalline)

Panel surya monokristalin merupakan tipe panel dengan efisiensi tertinggi dibandingkan berbagai teknologi panel surya yang ada saat ini. Dengan teknologi produksi yang maju, panel ini mampu menghasilkan daya listrik terbesar per satuan luas permukaan. Biasanya, panel monokristalin diaplikasikan di daerah dengan kebutuhan energi yang tinggi, terutama pada wilayah dengan

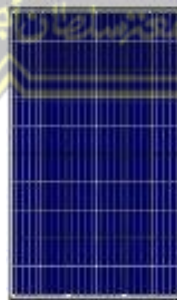
iklim ekstrem atau kondisi lingkungan yang sulit. Efisiensi panel ini dapat mencapai hingga 15-20%. Meskipun demikian, panel monokristalin memiliki kelemahan berupa sensitivitas terhadap intensitas cahaya; performanya akan menurun secara signifikan jika digunakan di lokasi dengan paparan sinar matahari yang minim, seperti area teduh atau pada kondisi cuaca berawan[15].



Gambar 2. 12 Panel Surya monokristal (Mono-crystalline)

2. Polikristal (Poly-Crystalline)

Panel surya polikristalin merupakan jenis panel surya yang tersusun dari kristal-kristal yang tidak beraturan, yang dihasilkan melalui proses pengecoran. Untuk dapat menghasilkan daya listrik, panel tipe ini membutuhkan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan panel monokristalin. Efisiensi panel surya polikristalin cenderung lebih rendah daripada panel monokristalin, sehingga harganya umumnya lebih ekonomis dan terjangkau[16].



Gambar 2. 13 Poly-Crystalline PV Cell

3. Thin Film Photo Voltaic

Panel surya film tipis terdiri dari dua lapisan dengan struktur mikrokristalin-silikon dan amorfus yang sangat tipis. Meskipun efisiensi modulnya mencapai sekitar 8,5%, panel ini memerlukan area permukaan yang lebih luas untuk

menghasilkan daya listrik tertentu jika dibandingkan dengan panel monokristalin dan polikristalin. Salah satu inovasi terbaru dalam teknologi fotovoltaik adalah panel surya tipe Thin Film Triple Junction, yang memiliki tiga lapisan material aktif. Teknologi ini dirancang agar tetap efisien bahkan dalam kondisi pencahayaan rendah, seperti saat cuaca sangat berawan. Panel tersebut memiliki keunggulan performa dengan kemampuan menghasilkan daya listrik hingga 45% lebih tinggi dibandingkan panel surya konvensional lainnya. Dengan daya yang sebanding, panel ini menjadi pilihan menarik terutama untuk daerah yang memiliki intensitas cahaya matahari kurang optimal.



Gambar 2. 14 Thin Film Photo Voltaic PV Cell

2.2.7.7 Konfigurasi Modul Surya

Panel surya merupakan kumpulan dari sel surya yang dirancang untuk menyerap sinar matahari secara efektif. Sel surya sendiri berperan sebagai komponen utama dalam penyerapan cahaya matahari dan terdiri dari berbagai elemen fotovoltaik. Secara umum, sel surya adalah perangkat yang berfungsi mengonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Struktur dasar sel surya terdiri dari beberapa lapisan, meliputi lapisan silikon semikonduktor sebagai inti utama, lapisan logam sebagai konduktor, lapisan antireflektif yang berfungsi untuk mengurangi pantulan cahaya, serta strip logam konduktor yang bertugas menyalurkan arus listrik yang dihasilkan[11].

Jumlah sel surya yang tersusun dalam sebuah panel berbanding lurus dengan energi listrik yang dapat dihasilkan; semakin banyak sel yang digunakan, maka semakin besar pula energi yang dihasilkan. Prinsip kerja sel surya dimulai dari partikel cahaya yang dikenal sebagai “foton,” yaitu partikel kecil yang berasal dari sinar matahari. Ketika foton tersebut mengenai atom semikonduktor dalam sel

surya, energi yang dibawanya digunakan untuk melepaskan elektron dari struktur atom tersebut. Elektron bermuatan negatif yang terlepas kemudian bergerak bebas di pita konduksi material semikonduktor, sementara atom yang kehilangan elektron tersebut membentuk kekosongan bermuatan positif yang disebut “hole.”

Dalam merancang sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), sangat penting untuk memperhitungkan besarnya energi yang akan dihasilkan oleh sistem tersebut. Selain itu, agar instalasi modul surya dapat disesuaikan dengan karakteristik lokasi yang dipilih, perlu dilakukan penentuan terhadap luas area array modul surya yang akan dipasang. Luas array modul surya ini dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut[17]:

$$P_{saat\ t\ naik} = 0,5 \% \times P_{mpp} \times \text{kenaikan suhu} \quad (2.12)$$

$$P_{mpp\ o_c} = P_{mpp} - P_{o_c} \quad (2.13)$$

$$TCF = \frac{P_{mpp} \times t}{Gsr \times TCF \times \eta_{PV} \times \eta_{ef}} \quad (2.14)$$

$$PV\ Area = \frac{EL}{Gsr \times TCF \times \eta_{PV} \times \eta_{ef}} \quad (2.15)$$

Keterangan:

P_{mpp} = Daya keluaran maksimal dari panel surya

P_{o_c} = Daya pada saat naik dari suhu standar

TCF = Temperature Correction Faktor

EL = Energi yang dibangkitkan [kWh/hari]

$PV\ Area$ = Luas permukaan panel surya [m²]

Gsr = Intensitas matahari harian [kW/m²/hari]

η_{pv} = Efisiensi panel surya [%]

η_{ef} = Efisiensi keluaran [%]

Setelah luas array modul surya ditentukan, langkah berikutnya adalah menghitung daya yang akan dihasilkan oleh modul surya berdasarkan luas array yang telah dirancang. Besarnya daya ini dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.9)

$$P_{wp} = PV\ Area \times PSI \times \eta_{PV} \quad (2.16)$$

Keterangan :

$P_{wattpeak}$	= Besar daya yang akan terbangkitkan (W)
$PV Area$	= Luas total permukaan panel surya (m^2)
PSI	= Peak solar insolation ($1000 W/m^2$)
η_{PV}	= Efisiensi Panel surya (%)

Setelah mengetahui besarnya daya yang akan dihasilkan oleh modul surya, langkah selanjutnya adalah menentukan jumlah panel yang dibutuhkan untuk mencapai daya yang telah direncanakan. Jumlah panel yang diperlukan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.10)

$$Jumlah\ Panel = \frac{wattpeak}{P_{max}} \quad (2.17)$$

Keterangan :

$Wattpeak$	= Daya yang akan dibangkitkan PLTS (W)
P_{max}	= Kapasitas daya maksimal panel surya (W)

Efisiensi maksimum modul surya dicapai apabila modul terpapar sinar matahari dengan sudut kemiringan 90° . karena iridiasi matahari berbeda berdasar garis lintang bumi selama setahun. Sudut kemiringan rotasi matahari terhadap bumi diperkirakan sekitar $23,45^\circ$ terhadap bidang bumi yang yang mengorbit mengelilingi matahari, pada bidang tertentu dan ketinggian tertentu matahari menyinari permukaan bumi dengan sudut 90° terhadap permukaan bumi. Persamaan untuk mengetahui ketinggian maksimum dari modul (dalam derajat) ketika matahari mencapai langit (α) dapat ditentukan dengan persamaan (2.11).

$$\alpha = 90^\circ - lat + \delta \quad (2.18)$$

Dimana:

$lat (^\circ)$ = Garis lintang (*lattice*) lokasi instalasi modul surya terpasang

δ = sudut deklinasi matahari ($23,45^\circ$)

α = Ketinggian matahari mencapai permukaan bumi ($^\circ$)

sedangkan sudut yang harus terapkan pada modul surya terhadap permukaan bumi (β), dapat diperoleh dengan:

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (2.19)$$

2.2.7.8 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) sistem elektronik yang berfungsi mengatur operasi panel surya agar dapat bekerja pada titik daya maksimum. Sistem MPPT ini bukanlah mekanisme pelacakan secara mekanis, melainkan merupakan kontrol elektronik yang berfokus pada karakteristik tegangan dan arus panel surya untuk mengoptimalkan output daya.



Gambar 2. 15 Modul Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Berbagai faktor dapat memengaruhi kinerja panel surya, seperti temperatur yang berdampak pada nilai tegangan serta intensitas cahaya yang memengaruhi titik kerja arus yang dihasilkan, dan faktor lainnya. Oleh karena itu, sistem MPPT memungkinkan pelacakan daya maksimum dihasilkan pada kondisi variabel tersebut secara real time sesuai dengan waktu dan keadaan tertentu.

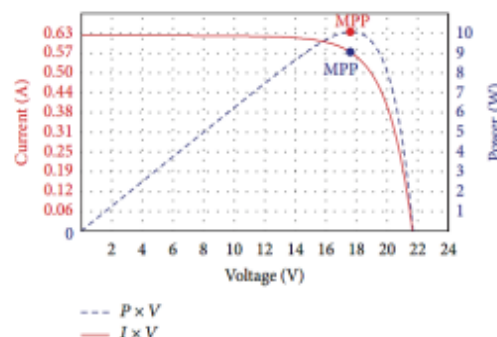
Sistem panel surya dapat beroperasi secara mandiri (otonom) maupun terhubung dengan jaringan listrik lokal (grid). Oleh karena itu, pelacakan titik daya maksimum (MPPT) memiliki peranan penting untuk mengidentifikasi dan mempertahankan sistem panel surya agar selalu bekerja pada titik daya maksimum (MPP) di berbagai kondisi lingkungan. MPPT merupakan komponen krusial dalam sistem panel surya. Berbagai metode MPPT telah dikembangkan dan dibahas secara luas dalam literatur ilmiah.

Penggunaan teknologi Maximum Power Point Tracking (MPPT) dalam sistem pengatur pengisian baterai surya maupun inverter berperan penting dalam memastikan bahwa panel surya bekerja pada titik daya maksimum (Maximum Power Point/MPP), guna mengoptimalkan produksi energi. Sistem MPPT secara

kontinu memantau serta menyesuaikan parameter operasional dari panel surya demi menjaga kinerja yang optimal.

Kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal, di antaranya suhu yang memengaruhi nilai tegangan dan intensitas cahaya yang berdampak pada titik kerja arus listrik. Oleh sebab itu, kehadiran teknologi Maximum Power Point Tracking (MPPT) menjadi sangat penting untuk menyesuaikan dan melacak titik daya maksimum yang berubah-ubah tergantung pada kondisi lingkungan dan waktu operasi. Pada prinsipnya, sistem MPPT memanfaatkan konverter DC-DC untuk mengatur titik kerja panel surya agar selaras dengan titik daya maksimum. Dengan memaksa panel surya beroperasi pada titik dayanya yang optimal, sistem ini memungkinkan daya yang disalurkan ke beban menjadi sebesar mungkin. Konsep ini memastikan efisiensi energi yang lebih tinggi.

Besarnya daya yang diperoleh modul surya bergantung pada dua variabel utama, yaitu suhu sekitar dan *intensitas radiasi* matahari. Hubungan antara arus (I) dan tegangan (V), serta daya (P) terhadap tegangan (V), dapat digambarkan melalui kurva karakteristik yang ditampilkan pada Gambar 10, untuk kondisi suhu dan tingkat radiasi tertentu. Pada grafik tersebut, arus maksimum yang terjadi saat tegangan bernilai nol disebut sebagai kondisi hubung singkat (*short circuit current*), sedangkan tegangan maksimum yang dicapai ketika arus bernilai nol dikenal sebagai tegangan rangkaian terbuka (*open circuit voltage*). Kurva ini menjadi dasar dalam analisis performa panel surya terhadap perubahan kondisi lingkungan.



Gambar 2. 16 Kurva I-V dan P-V kurva karakteristik modul

Dalam lembar spesifikasi panel surya, terdapat parameter tambahan berupa titik Daya Maksimum (Maximum Power Point/Mpp), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.8. Titik ini merepresentasikan daya listrik maksimum yang dapat dicapai, dihitung dari hasil perkalian antara arus maksimum (I_m) dan tegangan maksimum (V_m). Nilai-nilai tersebut diperoleh dari kurva I-V pada titik tertentu yang menunjukkan performa ideal panel surya. Namun, dalam kondisi operasional nyata, tegangan dan arus kerja tidak selalu berada pada titik ideal V_m dan I_m . Oleh karena itu, diperlukan suatu mekanisme untuk memastikan perangkat selalu beroperasi mendekati titik daya maksimum panel surya.

Untuk menentukan kapasitas dari *solar charge controller* perlu memperhatikan persamaan (2.20) untuk menghitung *short circuit* dari modul surya, arus minimum dari *solar charge controller* serta *safety factor* yang bernilai 1.2 – 1.3.[18]

$$\text{Charge controller size} = \frac{\text{Demand Watt} \times \text{safety factor}}{\text{system voltage}} \quad (2.20)$$

Keterangan:

Demand Watt = Permintaan daya output modul (W)

Safety Factor = faktor keamanan

System Voltage = Tegangan pada sistem (V)

2.2.7.9 Baterai

Baterai berfungsi sebagai komponen penyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya, sehingga energi tersebut tetap dapat digunakan meskipun kondisi pencahayaan tidak mencukupi, seperti pada malam hari atau ketika langit tertutup awan. Dengan demikian, baterai memungkinkan kontinuitas pasokan energi secara lebih stabil. Umumnya, kapasitas penyimpanan energi listrik pada baterai diukur dalam satuan watt-jam (Wh), yang menunjukkan jumlah energi yang dapat disimpan dan digunakan dalam jangka waktu tertentu. Jumlah energi yang dapat disimpan oleh baterai dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain kapasitas nominal baterai itu sendiri, kebutuhan konsumsi energi listrik dari beban, Selain itu, besarnya energi yang dihasilkan oleh panel surya juga menentukan

efisiensi dalam proses pengisian ulang baterai. Oleh karena itu, perencanaan sistem penyimpanan energi harus mempertimbangkan kesesuaian antara kapasitas baterai dan kebutuhan energi harian agar kinerja sistem tenaga surya tetap optimal.



Gambar 2. 17 Baterai panel surya

Secara umum, baterai diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer adalah jenis baterai yang tidak dapat diisi ulang karena reaksi kimia yang berlangsung di dalamnya bersifat satu arah. Oleh sebab itu, penggunaannya pada sistem hibrida sangat terbatas karena tidak memungkinkan untuk pengisian ulang energi. Sebaliknya, baterai sekunder memiliki reaksi kimia yang reversible, yang memungkinkan energi disimpan selama proses pengisian dan dilepaskan kembali saat digunakan. Dalam menentukan jenis baterai yang sesuai untuk suatu sistem, parameter utama yang perlu diperhatikan adalah kapasitas baterai, yang harus disesuaikan dengan kebutuhan energi perangkat. Selain itu, dua faktor penting lainnya yang turut memengaruhi performa kapasitas baterai adalah energi spesifik (dalam satuan kW/kg), yang menunjukkan jumlah energi per satuan massa, serta kerapatan energi (dalam satuan kW/L), yang menunjukkan jumlah energi per satuan volume.

Perkembangan teknologi baterai saat ini tengah menjadi fokus utama berbagai penelitian, mengingat perannya yang sangat krusial dalam sistem penyimpanan energi listrik. Peningkatan efisiensi dan kapabilitas baterai menjadi prioritas, khususnya dalam menghasilkan desain yang lebih ringan dan berukuran kompak tanpa mengorbankan kapasitas penyimpanan energinya. Kemajuan dalam teknologi ini memiliki kontribusi besar terhadap berbagai sektor, terutama pada

aplikasi yang menuntut efisiensi ruang dan bobot, seperti kendaraan listrik, sistem energi terbarukan, dan perangkat portabel. Dengan demikian, riset mengenai baterai diarahkan untuk mencapai keseimbangan antara kapasitas energi yang tinggi, dimensi yang minimal, dan bobot yang ringan. Terdapat berbagai jenis baterai yang tersedia secara komersial di pasaran, antara lain:

1. Baterai *Lead Acid*

Lead Acid adalah baterai yang memiliki umur yang paling tua diantara baterai yang lain. Baterai ini populer digunakan dalam penggunaan kendaraan dikarenakan kemurahan biaya dengan memiliki kemampuan melepaskan daya yang tinggi dan kemampuan untuk melepaskan arus secara besar. Arus yang tinggi harus perlu dibatasi agar dapat memperpanjang umur baterai. Pada nilai arus yang rendah, pelepasan energi pada baterai memiliki nilai yang cukup bagus pada pengisian daya kurang bagus. Kondisi muatan baterai atau *State of Charge* (SOC) dapat ditentukan melalui pengukuran nilai berat jenis (*specific gravity*) dari larutan elektrolit di dalam baterai.

Baterai jenis *lead-acid* dikenal memiliki umur pakai yang relatif singkat serta laju *self-discharge* yang rendah, yang dalam jangka waktu tertentu dapat menyebabkan baterai menjadi tidak aktif. Umumnya, laju *self-discharge* baterai ini berkisar antara 3% hingga 20% per bulan. Selain itu, proses pengisian dayanya sangat dipengaruhi oleh suhu kerja baterai. Secara umum, nilai energi spesifik baterai ini berada pada rentang 25 hingga 35 Wh/kg, sementara daya spesifiknya dapat mencapai hingga 500 W/kg.

2. Baterai *Nikel Metal Hibrida*

Baterai *nickel-metal hydride* (NiMH) menggunakan anoda berbahan logam hibrida dan katoda berbasis nikel. Jenis baterai ini menawarkan performa daya dan energi yang cukup memadai, terutama untuk aplikasi kendaraan listrik. Energi spesifik yang dimiliki baterai ini berkisar sekitar 70 Wh/kg, dengan daya spesifik mencapai 200 W/kg. Umur pakainya dapat mencapai hingga 600 siklus pengisian dengan efisiensi pelepasan energi sebesar 80%. Untuk mengisi ulang daya hingga 80%, baterai ini memerlukan

waktu sekitar 35 menit. Namun, kekurangan utama dari baterai NiMH adalah harganya yang relatif lebih tinggi dibandingkan jenis baterai lainnya.

3. Baterai *Lithium Ion*

Baterai Lithium-Ion (Li-Ion) merupakan salah satu jenis baterai isi ulang yang berkembang pesat dan telah menarik banyak perhatian dalam beberapa dekade terakhir. Baterai ini banyak digunakan, terutama pada perangkat elektronik portabel seperti ponsel pintar. Dibandingkan dengan baterai isi ulang komersial lainnya, baterai Li-Ion menawarkan keunggulan signifikan dalam hal kepadatan energi baik secara gravimetri maupun volumetrik.[19]

baterai *li-ion* terkonstruksi terhubung dengan *li-ion* cell dalam paralel untuk meningkatkan arus, pada hubungan seri untuk meningkatkan tegangan atau konfigurasi kombinasi antara paralel dan seri. Elektrode terisolasi dengan elektroda lainnya dengan *separator (microporous polymer membrane)*, Desain dasar baterai lithium-ion (Li-ion) saat ini masih mengikuti konsep sel komersial yang diperkenalkan Sony sekitar dua dekade lalu, meskipun berbagai material elektroda, elektrolit, dan separator telah dieksplorasi lebih lanjut. Pada kondisi discharge, lithium pada anoda terionisasi dan kemudian bermigrasi ke elektrolit, sementara elektron yang terlepas dari anoda mengalir sebagai arus listrik ke beban eksternal. Fungsi kritis separator adalah memfasilitasi pertukaran ion lithium antar elektroda tanpa mengizinkan perpindahan elektron. Selama proses pengisian (charging), ion lithium bergerak kembali dari katoda (lithium metal oxide) menuju anoda melalui separator. Mekanisme reversibel inilah yang memungkinkan baterai Li-ion dapat diisi ulang secara berulang

4. Baterai *Lithium Metal Polymer*

Baterai Lithium Metal Polymer (Li-Po) menggunakan elektrolit berbasis polimer padat kering yang berbentuk lapisan film tipis menyerupai plastik, berbeda dengan baterai Li-Ion yang memanfaatkan elektrolit cair. Meskipun memiliki kemiripan dengan Li-Ion, desain Li-Po memungkinkan fleksibilitas dalam bentuk dan ukuran berkat struktur berlapis antara anoda dan katoda yang memfasilitasi pertukaran ion. Namun, keunggulan ini diimbangi oleh

kelemahan utama, yaitu penurunan efisiensi pertukaran ion melalui elektrolit polimer kering, yang berdampak pada berkurangnya *rating* daya saat pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*). Salah satu solusi potensial adalah pemanasan baterai untuk meningkatkan laju perpindahan ion, meskipun metode ini tidak praktis untuk aplikasi sehari-hari karena pertimbangan keamanan dan efisiensi energi[20].

Menentukan ukuran baterai untuk kebutuhan sistem penyimpanan (*storage system*) untuk pembangkit listrik tenaga surya dapat diketahui dengan persamaan (2.14).

$$C = \frac{EL \times N}{Vs \times DoD \times \eta} \quad (2.21)$$

Keterangan:

- C = Kapasitas yang diperlukan (Ah)
- Ah = Kapasitas baterai yang digunakan (Ah)
- N = Jumlah hari otonomi
- EL = Energi yang dibangkitkan (kWh)
- Vs = Tegangan (V)
- DoD = *Depth of Discharge* (%)
- η = Efisiensi baterai x efisiensi inverter (%)

konfigurasi seri digunakan untuk meningkatkan tegangan sistem dengan menghubungkan panel surya atau baterai secara berurutan. Ini bermanfaat untuk aplikasi yang memerlukan tegangan tinggi, seperti penyumbangan energi ke jaringan listrik utama. Sementara itu, konfigurasi paralel meningkatkan kapasitas penyimpanan energi dengan menghubungkan beberapa panel surya atau baterai secara paralel. Ini berguna untuk menghadapi fluktuasi produksi energi surya. Dalam praktiknya, penggunaan kombinasi dari kedua konfigurasi ini dapat memenuhi kebutuhan tegangan dan kapasitas penyimpanan energi yang sesuai dengan aplikasi PLTS. Untuk menentukan konfigurasi rangkaian seri dan paralel baterai dapat dilakukan dengan persamaan berikut :

$$Baterai \text{ Parallel} = \frac{\text{Kapasitas yang dibutuhkan sistem}}{\text{Kapasitas Baterai}} \quad (2.22)$$

$$Baterai\ Seri = \frac{Tegangan\ Sistem\ yang\ dibutuhkan}{Tegangan\ Baterai} \quad (2.23)$$

2.2.8 Modul surya

Modul surya merupakan komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang terdiri dari sejumlah sel surya. Sel-sel ini dirangkai secara seri dan/atau paralel untuk menghasilkan tegangan dan arus listrik sesuai dengan kebutuhan desain.

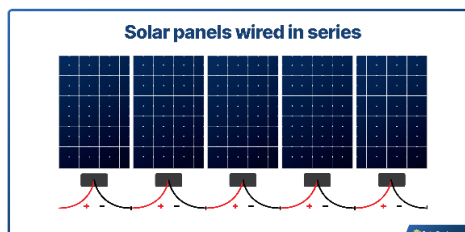
- Rangkaian seri digunakan untuk meningkatkan tegangan keluaran dari modul.
- Rangkaian paralel digunakan untuk meningkatkan arus.

Sel-sel tersebut disusun dalam satu bingkai (frame) dan dilindungi dengan proses laminasi atau pelapisan khusus, agar tahan terhadap pengaruh lingkungan seperti hujan, panas, dan debu. Besarnya arus yang dihasilkan juga dipengaruhi oleh luas permukaan sel, sehingga pemilihan ukuran dan jumlah sel menjadi bagian penting dalam perancangan modul.

2.2.8.1 Rangkaian Seri Modul Surya

Rangkaian seri pada panel surya menghubungkan kutub negatif dari satu modul ke kutub positif modul lainnya, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18. Dalam konfigurasi ini, tegangan total merupakan hasil penjumlahan tegangan dari masing-masing modul, sedangkan arus yang mengalir tetap sama seperti pada satu modul yang sama.[21]

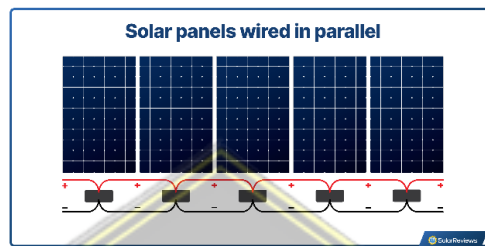
$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5$$



Gambar 2. 18 Rangkaian Seri Modul Surya
(<https://www.solarreviews.com/>)

2.2.8.2 Rangkain Paralel Modul Surya

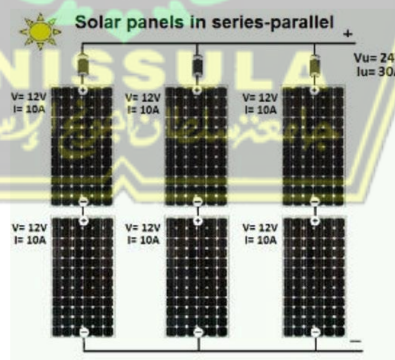
Rangkaian paralel Dalam sistem panel surya, konfigurasi paralel dicirikan oleh penyambungan terminal-terminal yang sejenis, dimana terminal positif terhubung dengan positif dan terminal negatif dengan negatif, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.19. Karakteristik utama dari rangkaian ini mempertahankan nilai tegangan yang setara dengan satu modul tunggal, sementara menghasilkan akumulasi arus listrik dari seluruh modul yang terhubung



Gambar 2. 19 Rangkaian Paralel Modul Surya
(<https://www.solarreviews.com/>)

2.2.8.3 Rangkain Seri Paralel Modul Surya

Rangkaian seri-paralel pada modul surya diperoleh dengan menggabungkan konfigurasi seri dan paralel secara bersamaan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.20. Dalam susunan ini, arus total merupakan hasil penjumlahan arus dari tiap rangkaian paralel, sedangkan tegangan total berasal dari penjumlahan tegangan tiap rangkaian seri.

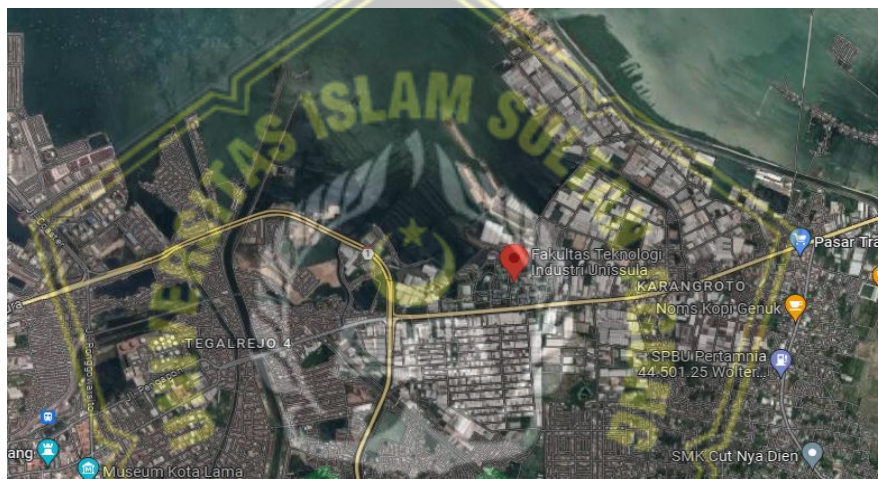


Gambar 2. 20 Rangkaian Seri-Paralel Modul Surya
(Sumber: Alternative energy tutorial)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan di Laboratorium Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang berlokasi di Jl. Kaligawe Raya No.Km.4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112. Gambar 3.1 memperlihatkan kondisi aktual lokasi penelitian beserta fasilitas pendukung yang tersedia di kampus tersebut..

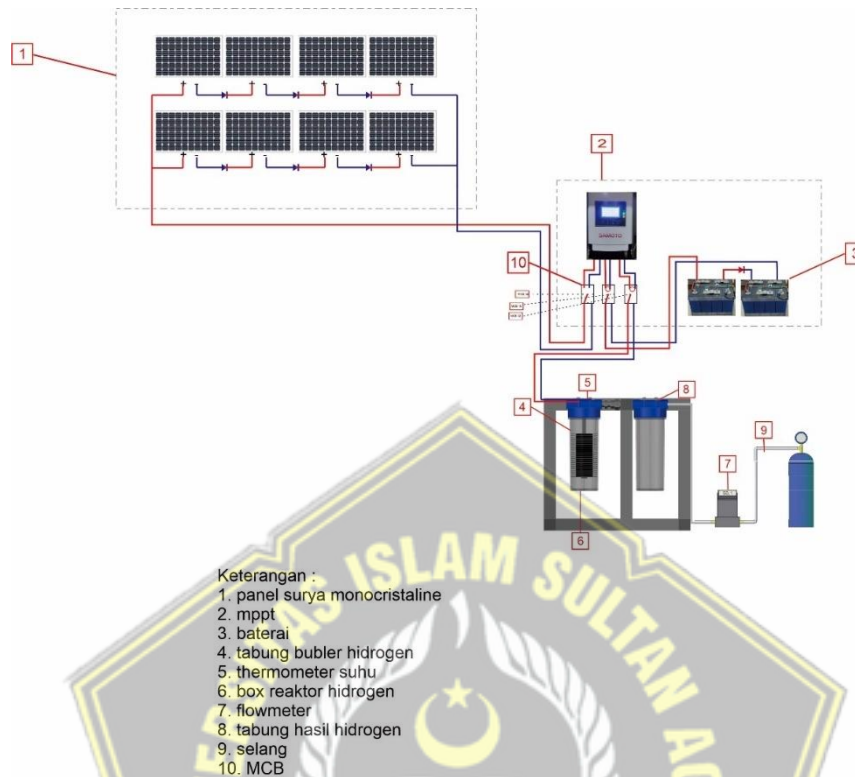


Gambar 3. 1 Lokasi penelitian

3.2 Model Perancangan PLTS Untuk Menyuplai Daya Pada Generator HHO

Model perancangan PLTS 400 watt menggunakan beberapa komponen yaitu panel Surya Sebanyak 8 unit dengan dipasang secara seri dan paralel. Gambar tersebut menunjukkan sistem pembangkitan energi berbasis panel surya monokristalin yang terintegrasi dengan generator HHO, di mana energi listrik dari panel disalurkan melalui MPPT untuk mengisi baterai dan menggerakkan reaktor elektrolisis air yang terdiri dari tabung bubbler, thermometer suhu, dan box reaktor hidrogen, guna memisahkan air menjadi gas hidrogen dan oksigen, yang kemudian dialirkan melalui flowmeter ke tabung penyimpanan hidrogen menggunakan selang, dengan sistem keseluruhan

dilindungi oleh MCB untuk menjaga keamanan dan kestabilan operasi.



Gambar 3. 2 Perancangan PLTS Untuk Menyuplai Daya Pada Generator HHO

3.3 Alat dan Bahan

Sehubung dengan penelitian ini, berikut adalah alat dan komponen elektronika yang digunakan:

3.3.1 Alat

Berikut ini adalah Alat yang digunakan untuk mendukung penyusunan penelitian tugas akhir.

- Panel Surya *Monocrstaline*
- Maximum Power Point Tracking (MPPT)
- baterai
- Klem buaya dan kabel
- Voltmeter dan amperemeter
- MCB
- Lux meter
- Thermometer

3.3.2 Bahan

Berikut ini adalah bahan yang digunakan untuk mendukung penyusunan penelitian Tugas Akhir ini.

a. Modul panel surya *Monocrystalline*

Panel *Monocrystalline* dibuat dengan Kristal silikon tunggal yang menghasilkan efisiensi yang tinggi, dengan demikian panel surya monocrystalline dapat menghasilkan daya yang lebih besar walaupun dengan ukuran yang lebih kecil. Berikut adalah spesifikasi panel surya yang digunakan dalam penelitian ini.



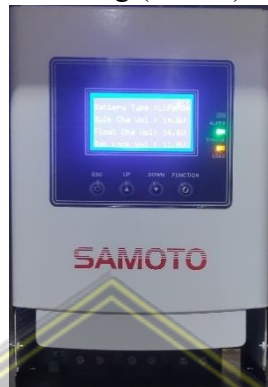
Gambar 3. 3 Modul PV Monocrystalline

Table 3. 1 Spesifikasi Modul PV

Karakteristik panel surya	
Model	Green cell SM100-18p
P max	100 WP
Voc	21,8 V
Isc	6,05 A
Vmp	17,8 V
Peak Power (Pmax)	100 w
Imp	5,62 A
Max System Voltage	1000 V
Dimension	L 68CM, T 91CM, Tebal 3CM

Irradiance	1000W/m ²
------------	----------------------

b. Maximum Power Point Tracking (MPPT)



Gambar 3. 4 MPPT Solar Controller For Models
Table 3. 2 Spesifikasi MPPT

Model	samoto
Max. Charger Current	60A
Aplikasi	Pengendalian pengisian daya Pengendalian Sistem Tenaga Surya Pengendalian Tenaga Pemrosesan data tenaga surya
System Voltage	12V/24V/48V
Max. PV Voltage	150 Vdc
Carton Dimension	340 x 255 x 160 mm
Product Dimension	260 x 220 x 110 mm
Operation Temperatur	-25°C sampai +60°C
Solar Operation Voltage	20-150Vdc@12V 36-150Vdc@24V 64-150Vdc@48V
PV Input Power	12V : 800W 24V : 1600W 48V : 3200W

c. Kabel Penghubung



Gambar 3. 5 Kabel penghubung

Merek : *Federal*
Jenis kabel : NYMHY 60227 IEC 53
Panjang : 6 m
Tahanan : $0,114\Omega$
Diameter : $2 \times 1,5$ mm
Tegangan : 300/500 Volt

d. Komponen-komponen Generator HHO

Table 3. 3 Spesifikasi Generator HHO

Spesifikasi	jumlah	Fungsi
• Jumlah sel = 22 • Luas penampang 55 x 70 mm • <i>Stainless steel</i>	1	Sebagai penghasil gas HHO
305 L (plat) • Tabung <i>filter RO</i> diameter 100mm • Baut 3 mm • Ring plastik 3 mm dan 6 m		

e. Flowmeter

Flowmeter gas adalah alat ukur yang digunakan untuk menentukan laju aliran (flowrate) dari gas yang mengalir melalui suatu sistem atau saluran. Flowmeter bekerja dengan mengukur jumlah volume atau massa gas yang melewati sensor

dalam satuan waktu tertentu. Dalam konteks penelitian ini, flowmeter digunakan untuk mengukur laju aliran produksi gas HHO (Hydroxy Gas) yang dihasilkan dari proses elektrolisis air. Satuan alat ukur ini biasanya dinyatakan dalam

1. Liter per menit (L/min) – untuk volume gas
2. m^3/s – untuk volume besar atau dalam sistem industri
3. Standard Liter per Minute (SLPM) – mengacu pada kondisi standar suhu dan tekanan (STP)



Gambar 3. 6 Alat ukur flowmeter

Tabel 3. 4 Spesifikasi alat ukur flowmeter

Spesifikasi	mlah	Fungsi
Kapasitas volume aliran 0,1 – 0,8NL/menit	1	Alat ukur volume aliran gas HHO yang dihasilkan

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian pada tugas akhir ini bertujuan untuk memaparkan langkah-langkah yang akan dilakukan pada saat melakukan penelitian.

3.4.1 Pengambilan Data

Data yang dibutuhkan pada penelitian ini yaitu ada 2 data, primer dan sekunder data primer akan diambil secara langsung di lokasi penelitian yaitu di Fakultas Tekonologi Industri dan data sekunder akan diambil di berbagai platform, yang mendukung penelitian ini.

Proses penelitian meliputi tahapan studi literature untuk penentuan jenis, tipe, dan analisis kapasitas (Panel Surya, MPPT, MCB, Baterai, watt meter DC dan Generator HHO).

Setelah dilakukan tahapan sudi literature tersebut, langkah selanjutnya adalah perancangan untuk membuat jaringan listrik off-grid dengan daya output 400watt menggunakan panel surya dengan kapasitas 100 watt-peak (WP) yang bekerja selama 6 jam. Secara umum, panel surya paling efektif menyerap sinar matahari pada jam antara 09:00 hingga 15:00. Pada waktu ini, matahari berada di posisi yang lebih tinggi di langit, dan intensitas sinar matahari mencapai puncaknya[22]. Adapun komponen-komponen yang dibutuhkan dalam perancangan PLTS untuk menyuplai daya pada proses elektrolisis dalam kebutuhan hydrogen.

Selanjutnya dalam menentukan jumlah komponen apa saja yang harus dibeli, untuk mendapatkan penyuplaian beban yang diinginkan meliputi: daya, tegangan dan arus yang sesuai dengan apa yang sudah direncanakan tersebut.

Kemudian setelah menentukan jumlah daya, tegangan dan arus pada PLTS kemudian komponen yang sudah tersedia dirancang sesuai desain PLTS pada tempat yang sudah ditentukan.

Pengujian yang dilakukan pada tahap uji kinerja modul di laboratorium adalah untuk mengetahui bagaimana performa peralatan modul yang telah dibuat, yaitu pengukuran panel surya seperti daya input, tegangan, dan arus panel surya. Tujuannya adalah untuk menentukan apakah spesifikasi panel surya pada nameplate sesuai atau mendekati hasil pengukuran yang diperoleh dari beban Generator HHO.

Uji dilakukan pada *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk memverifikasi bahwa kontroler berfungsi dengan baik sebagai pengatur tegangan dan arus . Beberapa parameter yang diperhatikan dalam pengujian meliputi uji kerja sistem, uji kapasitas penyimpanan hydrogen, efisiensi generator, dan lain sebagainya.

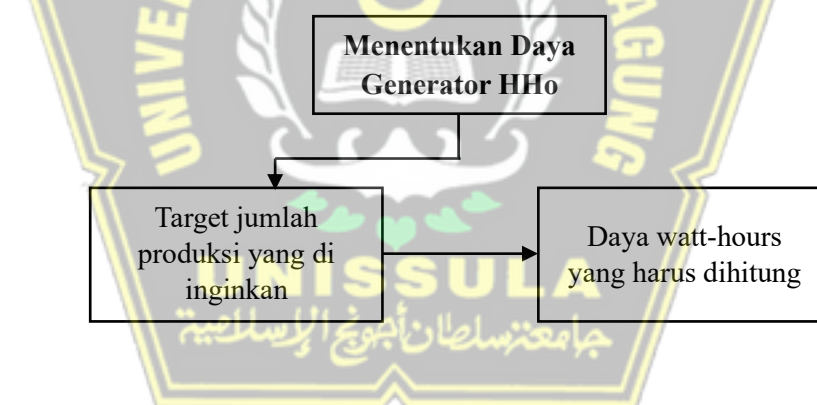
Uji selanjutnya yaitu generator HHO seperti daya input , tegangan, arus dan debit produksi gasnya menggunakan flowmeter. Tujuannya untuk menentukan

apakah karakteristik dan spesifikasi pada generator HHO yang sudah dibuat apakah sudah sesuai atau mendekati hasilnya.

Tahap pengujian yaitu di laboratorium dengan menghubungkan PLTS ke beban generator HHO dan pengukuran akan dilakukan setiap perjamnya diambil 2 menit sampai tercapai kesetabilan produksinya, parameter yang diukur antara lain tegangan awal, tegangan akhir, arus awal, arus akhir. Dari parameter tersebut menghasilkan kebutuhan daya pada proses elektrolisis, dapat diketahui debit gas disetiap waktunya.

3.4.2 Menentukan Daya Yang Dibutuhkan Generator HHO

Dalam proses elektrolisis air untuk menghasilkan gas HHO, salah satu parameter penting yang perlu diperhatikan adalah daya listrik yang dibutuhkan oleh generator HHO. Penentuan daya ini sangat krusial karena berkaitan langsung dengan kebutuhan energi dari sistem PLTS yang dirancang untuk menyuplai proses elektrolisis tersebut.



Gambar 3. 7 Diagram alir mengenai cara menentukan generator HHO

Perhitungan daya dilakukan dengan menggunakan rumus dasar dalam kelistrikan menggunakan persamaan 2.1. Dalam penelitian ini, sistem elektrolisis yang digunakan dirancang untuk bekerja pada tegangan 12 Volt DC, yang sesuai dengan sistem tegangan dari baterai dan MPPT pada PLTS. Arus listrik yang digunakan dalam proses elektrolisis ditentukan berdasarkan karakteristik dari generator HHO tipe basah (*wett cell*) yang digunakan.

3.4.3 Perancangan PLTS Dengan Waktu Operasional 6 jam

Untuk merancang PLTS dengan waktu operasional yang sesuai dengan kebutuhan daya output 400 watt menggunakan panel surya berkapasitas 100 watt-peak (WP), memerlukan beberapa komponen dan perhitungan tambahan.

Beban total dalam Wh ini adalah jumlah energi yang harus disuplai oleh sistem PLTS setiap 6 jam dari mulai jam 09.00 s.d 15.00. Hal ini akan menjadi dasar dalam menentukan kapasitas panel surya. Perlu dilakukan perhitungan menggunakan persamaan 2.10. 2.21.[23]

3.4.4 Menentukan Kebutuhan Baterai Pada Panel Surya

Pada penelitian ini baterai digunakan sebagai penyimpan energi listrik untuk cadangan ketika malam hari ataupun kondisi cuaca tidak mendukung untuk menghasilkan energi listrik dari paparan sinar matahari. Oleh karena itu baterai dibutuhkan untuk menyuplai beban ketika sinar matahari tidak mencukupi. Untuk menentukan kapasitas baterai untuk kebutuhan sistem penyimpanan dapat dilakukan dengan perhitungan menggunakan persamaan (2.21) sehingga menghasilkan kapasitas baterai yang diperlukan untuk sistem.

Sebelum menentukan jenis baterai yang akan digunakan, dalam menentukan suatu baterai perlu dilakukan perhitungan total arus terlebih dahulu.

Perlu diperhatikan dalam pengosongan DoD (*Depth of Discharger Controller*) sesuai dengan rekomendasi pabrikan dari baterai yang digunakan. Secara umum, untuk baterai *VRLA*, rekomendasikan DoD berkisar antara 30% hingga 70%, sementara untuk baterai jenis *LiFePO4*, rekomendasikan DoD berkisar antara 80% hingga 100%.[24]

Kedalaman Pengosongan (DoD) adalah batas maksimum kedalaman pengosongan baterai agar baterai tetap awet. Jika pemakaian melebihi batas DoD, baterai dapat mengalami kerusakan yang cepat, mengurangi masa pakai, dan mengalami penurunan kapasitas yang signifikan.

3.4.5 Menentukan Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Controller Panel Surya

Dalam memilih dan menentukan MPPT (Maximum Power Point Tracking) controller yang tepat untuk panel surya dalam sistem PLTS, perlu memperhatikan beberapa aspek, seperti tegangan dan arus panel surya, kapasitas baterai, serta daya total sistem. MPPT adalah alat yang mengoptimalkan pengisian baterai dengan menyesuaikan tegangan panel surya untuk mendekati titik daya maksimum hal itu dapat dihitung dengan persamaan 2.20.

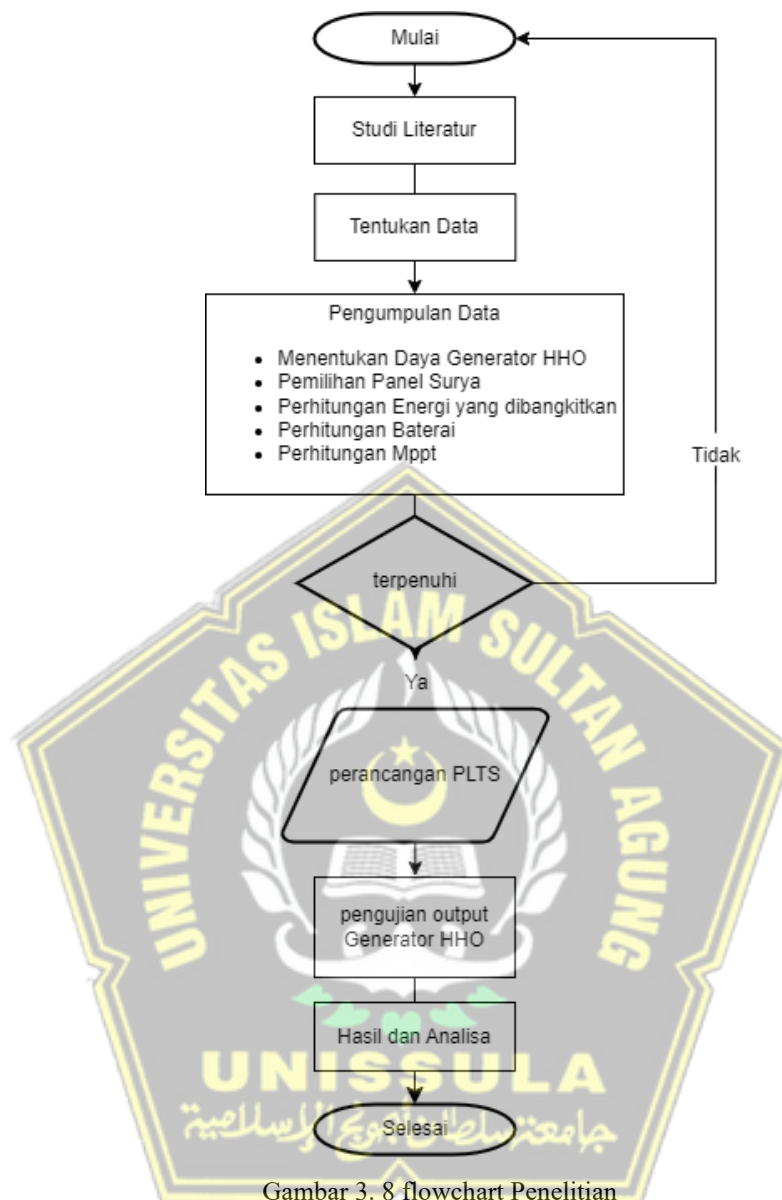
3.4.6 Parameter Pengujian Output

Tahap persiapan merupakan langkah awal yang dilakukan dalam penelitian ini. Adapun beberapa persiapan yang dilakukan meliputi: mengukur tegangan, daya dan arus pada anoda dan katoda dengan menggunakan voltmeter dan ampere meter. Untuk menghitung daya, tegangan dan arus generator HHO dapat dilihat persamaan (2.1)

Yang kedua untuk mengetahui efisiensi generator dapat dilihat persamaan (2.2) untuk mengukur produksi gas H₂O dengan menggunakan flowmeter yang ditempatkan pada tengah tengah alat yang sudah dirancang sedemikian rupa agar debit produksi gas bisa tercantum dalam alat tersebut, siapkan perangkat lain seperti stopwatch sebagai pengukur waktu, gas HHO yang dihasilkan pada setiap 2 menit yang dilakukan sampai tercapai kesetabilan produksinya, dengan mencampurkan air demineral dengan Kristal KOH.

3.5 Flowchart Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yang disusun secara sistematis dengan tujuan untuk memperoleh data yang akurat serta hasil perencanaan yang optimal. Secara garis besar diagram alir ditunjukan pada gambar



Gambar 3. 8 flowchart Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Iradiasi Matahari

Iradiasi matahari merupakan salah satu faktor utama dalam pembangkitan listrik tenaga surya. Oleh karena itu, data iradiasi menjadi sangat penting untuk memperkirakan potensi daya keluaran dari modul fotovoltaik yang akan dirancang. Tabel 4.1 menyajikan data iradiasi yang diperoleh melalui platform RETScreen Expert, yang menggunakan data satelit dari NASA sebagai sumber referensinya.

Table 4. 1 Data Iradiasi Matahari Di Fakultas Teknologi Industri

no	Bulan	Iradiasi (kWh/m ² /d)	Suhu Bumi (C)
1	Januari	4,22	26,20
2	Februari	4,53	26,10
3	Maret	5,43	26,50
4	April	5,52	26,90
5	Mei	5,50	27,00
6	Juni	5,27	26,60
7	Juli	5,73	26,30
8	Agustus	6,41	26,60
9	September	6,80	27,40
10	Oktober	6,40	27,70
11	November	5,33	27,40
12	Desember	4,61	26,70
Rata-rata		5,48	26,78
Sumber		NASA	NASA

Tabel 4.1 menunjukkan variasi suhu setiap bulannya. Berdasarkan data tersebut, intensitas radiasi matahari di Fakultas Teknologi Industri UNISSULA diketahui memiliki rata-rata tahunan sebesar 5,48 kWh/m²/hari. Data ini diambil pada bulan September 2024.

4.2 Menentukan Daya Yang Dibutuhkan Generator HHO

Untuk memenuhi spesifikasi desain yang diinginkan yaitu 400watt maka jika digunakan sesuai rumus daya persamaan 2.1 diperlukan tegangan sebesar 12

V dan arus 33 A maka peneliti membuat rancangan generator gas hho dengan plat yang mampu menahan reaksi oksidasi yang akan terjadi pada kutub positif (anoda) dan reaksi reduksi yang akan terjadi pada kutub negatif (katoda). Maka plat stainless steel yang cocok dan mudah ditemukan di pasaran yaitu stainless steel 304. Yang masing masing berjumlah 12 dengan anoda (+) berjumlah 12 dan katoda (-) berjumlah 12, jumlah keseluruhan 24. menurut teori pada subbab dasar teori 2.2.4.

Tegangan ini dibagi secara merata ke dalam 12 katoda dan anoda 12 jadi total 24 sel elektrolisis aktif, sehingga setiap sel menerima tegangan sekitar 2 Volt, yang sesuai dengan kebutuhan praktis elektrolisis. Digunakan pelat elektroda berbahan stainless steel tipe 304 dengan luas efektif 100 cm^2 dan jarak antar pelat sebesar 1,5 mm. Dengan densitas arus sekitar $0,3 \text{ A/cm}^2$, arus total sistem berada di kisaran 30–33 Ampere.

Pada biasanya menentukan daya generator hho itu menggunakan sumber Listrik dari PLN 220 V dengan mengkonversi 220 V ke pencatu daya 12 v untuk menyesuaikan generator yang sudah dibuat. Namun pada penelitian ini peneliti sudah menentukan Spesifikasi PLTS dengan mengatur tegangan pada MPPT sebesar 13 V dan jenis plat stainless steel 304 s serta jarak antar plat sebesar 1,5 cm densitas arusnya sekitar $0,3 \text{ A/cm}^2$. Arus total sistem berada dikisaran 30-33 ampere. Dengan menggunakan persamaan 2.1, daya yang didapatkan dapat diharapkan mendekati 400 watt.

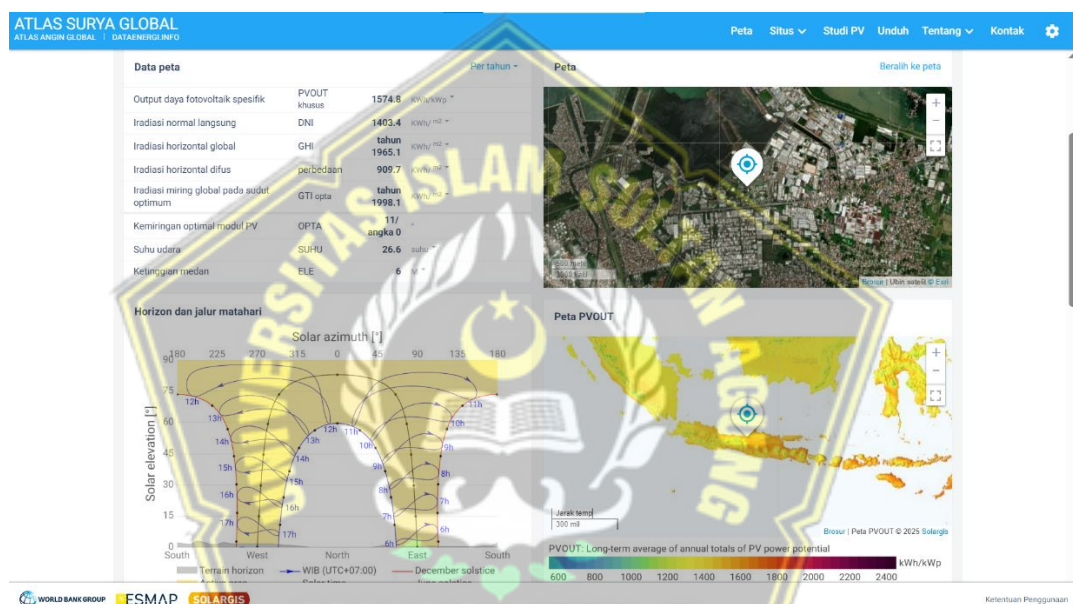
Pada laporan penelitian ini perancangan PLTS dirancang sedemikian rupa untuk mencapai manajemen energi. PLTS akan mengambil peran utama pada jaringan listrik. Setelah melakukan proses implementasi sistem dari perancangan gambar 3.2.

Setelah proses perancangan panel surya dan keseluruhan sistem selesai serta seluruh komponen telah terintegrasi, tahap selanjutnya adalah melakukan pengujian terhadap setiap perangkat yang digunakan. Tujuannya adalah memastikan bahwa sistem dapat berfungsi sesuai dengan rencana, khususnya pada komponen-komponen elektronik, panel surya, *solar charge controller* (SCC), baterai, dan beban output dari generator HHO. Pengujian dimulai dengan menentukan posisi terbaik sinar matahari agar panel surya menerima intensitas cahaya matahari secara

optimal sepanjang hari. Penentuan ini dilakukan dengan mengumpulkan data iradiasi menggunakan aplikasi seperti Reactscreen Expert dan HOMER. Setelah itu, dilakukan pengambilan data hasil pengukuran dari masing-masing perangkat dalam sistem PLTS yang sedang diuji.

4.3 Konfigurasi Kemiringan Modul Pv

Kemiringan modul PV pada penelitian ini didapatkan dari web Global Surya Atlas. Didapatkan kemiringan optimal modul PV 11° untuk Lokasi Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang.



Gambar 4. 1 kemiringan optimal modul PV

Dengan kemiringan 11° dan panjang sisi miring 90 cm, panjang sisi tinggi dan sisi alas dapat diketahui sebagai berikut:

1. Tinggi:

$$\sin(\theta) = \frac{\text{tinggi}}{\text{miring}}$$

$$\sin(11^{\circ}) = \frac{\text{tinggi}}{90}$$

$$\text{tinggi} = 90 \times \sin(11^{\circ})$$

$$\text{tinggi} = 90 \times 0.19$$

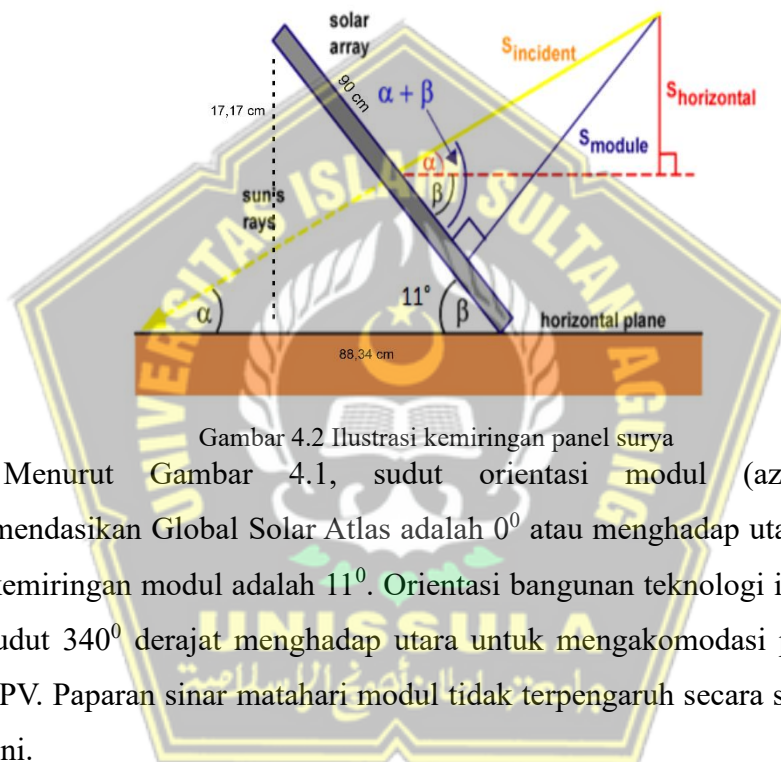
$$= 17.17 \text{ cm}$$

2. Alas:

$$\cos(\theta) = \frac{\text{alas}}{\text{miring}}$$

$$\begin{aligned}\cos(11^\circ) &= \frac{\text{alas}}{90} \\ \text{alas} &= 90 \times \cos(11^\circ) \\ \text{alas} &= 90 \times 0.98 \\ &= 88.34 \text{ cm}\end{aligned}$$

Didapatkan panjang tinggi 17.17 cm dan alas 88.34 cm, maka posisi panel surya dapat diilustrasikan seperti gambar 4.2



Gambar 4.2 Ilustrasi kemiringan panel surya

Menurut Gambar 4.1, sudut orientasi modul (azimuth) yang direkomendasikan Global Solar Atlas adalah 0° atau menghadap utara, sedangkan sudut kemiringan modul adalah 11° . Orientasi bangunan teknologi industri berada pada sudut 340° derajat menghadap utara untuk mengakomodasi posisi aplikasi modul PV. Paparan sinar matahari modul tidak terpengaruh secara signifikan oleh angka ini.

4.4 Perancangan Teknis Sistem PLTS dan beban Generator HHO

Pada perancangan sistem PLTS ini dilakukan secara sistematis agar bisa mendukung kebutuhan daya pada proses elektrolisis air menggunakan generator HHO. Perencanaan diawali dengan menentukan besarnya beban listrik yang perlu disuplai oleh sistem PLTS. Berdasarkan spesifikasi dan kebutuhan operasional dari generator HHO yang digunakan, diperoleh nilai beban daya sebesar 400 watt.

Setelah kebutuhan daya ditetapkan, selanjutnya merancang dan membangun unit generator HHO, yang berfungsi sebagai konversi energi listrik menjadi gas hydrogen dan oksigen melalui proses elektrolisis. Dalam merancang generator

HHO, perlu memperhatikan jumlah sel, luas penampang elektroda, jarak antar elektroda serta jenis material elektroda untuk memastikan efisiensi proses elektrolisis.

Selanjutnya, melakukan penyusunan sistem PLTS yang terdiri dari komponen utama berupa modul panel surya *monocrystalline*, pengendali MPPT dan sistem penyimpanan energi (baterai). Sistem PLTS ini dirancang untuk mampu menghasilkan dan menyuplai daya sebesar 400Watt secara kontinyu sesuai dengan kebutuhan generator HHO. Perancangan sistem juga mempertimbangkan nilai iradiasi matahari rata-rata di lokasi penelitian, efisiensi panel surya, serta faktor-faktor seperti suhu dan waktu operasional yang optimal.

Dengan memperhitungkan seluruh parameter teknis tersebut, sistem PLTS yang dibangun diharapkan dapat bekerja secara efisien dan mampu mendukung proses elektrolisis untuk menghasilkan gas HHO secara berkelanjutan dalam berbagai scenario waktu operasional. sedangkan untuk mengantisipasi kinerja komponen PLTS, energi dicadangkan sebesar 30% dari total energi yang dibangkitkan. Total dari perhitungan beban generator HHO sebesar 397 W.

Table 4. 2 Total Kebutuhan Beban

No	kebutuhan Beban	Total Daya Beban (Wh)
1.	Generator HHO x 6 jam	397
UNISSULA جامعة سلطان أبوبوع الإسلامية		
Total A		2382
	Cadangan Energi = 30% x total A	714
	Total = Total A + Cadangan total Energi	3096

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total energi yang harus disediakan oleh sistem PLTS mencapai 3096 Wh, yang juga mencakup kebutuhan energi untuk beban generator HHO. Dalam merancang komponen PLTS secara akurat, diperlukan data mengenai iradiasi matahari serta sudut kemiringan panel surya yang ideal di wilayah Fakultas Teknologi Industri. Data ini diperoleh melalui aplikasi Global Solar Atlas, yang mencatat nilai iradiasi rata-rata harian sebesar 5,48

kWh/m² per hari. Angka tersebut menjadi dasar penting dalam menentukan ukuran dan konfigurasi panel surya agar dapat memenuhi kebutuhan energi yang direncanakan.

4.5 Menghitung Area (PV Area)

Untuk menghitung nilai dari perhitungan PV area, peneliti menggunakan persamaan 2.12 .

$$\begin{aligned}
 P_{\text{saat } t \text{ naik}} &= 0,5 \% \times P_{\text{mpp}} \times \text{kenaikan suhu} \\
 &= 0,5 \% \times 100 \times 8,5^{\circ}\text{C} \\
 &= 0,0425 \times 100 \\
 &= 4,25 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Daya keluaran maksimum panel surya pada kondisi normal sebesar 25 °C pada saat temperaturnya naik menjadi 33,5 °C maka kenaikan sebesar 8,5 °C diperhitungkan dengan persamaan 2.13

$$\begin{aligned}
 P_{\text{saat } t \text{ naik}} &= 100 \text{ wp} - 4,25 \text{ W} \\
 &= 95,75 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya menghitung TCF (*Temperature Correction Factor*) menggunakan persamaan 2.14.

$$\begin{aligned}
 TCF &= \frac{95,75 \text{ W}}{100} \\
 &= 0,95
 \end{aligned}$$

Efisiensi keluaran (η_{out}) ditentukan berdasarkan efisiensi komponen-komponen yang melengkapi PLTS. Nilai EL Sebesar 3.531 Wh, per hari, diubah menjadi 0.35 kWh per hari, nilai Gav sebesar 5,48 Kw/m² per hari, nilai TCF sebesar 0,95, Parameter lain yang digunakan untuk menentukan luas array efektif modul antara lain efisiensi panel surya sebesar 20,4%, efisiensi pengontrol pengisian daya (*solar charge controller*), dan inverter yang diperkirakan masing-masing sebesar 95%, serta energi yang direncanakan untuk dibangkitkan diarea efektif sebesar 30,68 m². Di hitung menggunakan persamaan 2.15.

$$PV \text{ Area} = \frac{3,096}{5,48 \times 20,4 \% \times 95 \% \times 0,95}$$

$$= 3,068 \text{ m}^2$$

4.6 Menghitung Daya Yang Di Bangkitkan PLTS

Dengan luas area array sebesar 3,068 m² dan intensitas radiasi matahari (PSI) sebesar 1000 W/m², daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh PLTS (Watt Peak) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.16.

$$\begin{aligned} P_{\text{wattpeak}} &= 3,068 \times 1000 \times 20,4 \% \\ &= 625,872 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Untuk menentukan perhitungan tersebut, yang didapat hasil estimasi total kebutuhan energi harian di teknologi industri sebesar 3096 Wh perhari atau 0.35 kwh dengan daya yang dibangkitkan sebesar 625,872 wattpeak.

4.7 Menghitung Jumlah Panel Surya

Panel surya yang digunakan sebagai referensi adalah panel yang terpasang pada sistem PLTS. Setiap panel memiliki spesifikasi daya maksimum pada titik daya maksimum (PMPP) sebesar 100 Wp. Untuk menentukan jumlah panel surya yang dibutuhkan menggunakan persamaan 2.17.

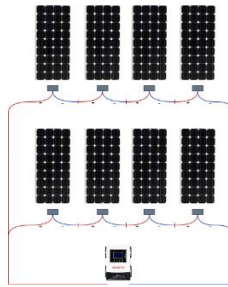
$$\begin{aligned} \text{Jumlah Panel} &= \frac{625,872}{100} \\ &= 6,25 \end{aligned}$$

$$\text{pembulatan} = 7 \text{ unit}$$

Dari hasil perhitungan jumlah panel surya didapat 7 unit.

4.8 Penyusunan Array Modul PLTS

Untuk menyesuaikan gedung di Fakultas Teknologi Industri, modul PV dirancang sedemikian rupa untuk menyesuaikan atap di fakultas teknologi industri yang akan direncanakan, karena luas array efektif merupakan luas keseluruhan permukaan panel yang belum termasuk kemudahan instalasi dan perawatan modul. Dengan demikian, berikut adalah konfigurasi rangkaian seri dan paralel modul surya untuk mengetahui nilai arus, tegangan, serta daya dari susunan modul yang direncanakan.



Gambar 4. 2 Array Modul PV

Jumlah array yang direncanakan di Fakultas Teknologi Industri terdiri dari masing-masing 8 panel surya. Setiap array yang dirancang akan menghasilkan nilai V_{mpp} dan I_{mpp} sebagai berikut:

$$V_{mpp \text{ array}} = V_{mpp \text{ Modul}} * \text{Jumlah Seri Modul}$$

$$= 17,8 \text{ V} * 4$$

$$= 71,2 \text{ V}$$

$$= 71,2 \text{ V}$$

$$I_{mpp \text{ array}} = I_{mpp \text{ Modul}} * \text{Jumlah Paralell}$$

$$= 5,62 * 2$$

$$= 11,62 \text{ A}$$

$$P_{mpp \text{ array}} = V_{mpp \text{ array}} * I_{mpp \text{ array}}$$

$$= 71,2 \text{ V} * 11,62 \text{ A}$$

$$= 827,344 \text{ W}$$

Berdasarkan hasil perhitungan arus, tegangan, dan daya, direncanakan satu buah array panel surya di Gedung Fakultas Teknologi Industri dengan kapasitas sebesar 827,344 Watt. Dengan demikian, total daya yang dihasilkan oleh array tersebut adalah 827,344 Wattpeak atau setara dengan 0,830 kWp. Setiap array memiliki tegangan maksimum sebesar 71,2 Volt dan arus maksimum sebesar 11,2 Ampere.

4.9 Menentukan kapasitas *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)

Untuk melakukan perhitungan dalam menentukan kapasitas *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) menggunakan persamaan 2.20 dengan hasil perhitungan sebagai berikut.

$$C_{scc} = \frac{827 \times 1,25}{71,2}$$

= 14,51 dibulatkan menjadi 15 A

Dari hasil perhitungan diatas didapat nilai *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) sebesar 14,51 dibulatkan menjadi 15 A, karena untuk mendapatkan MPPT yang maksimal maka membeli yang 60 A.

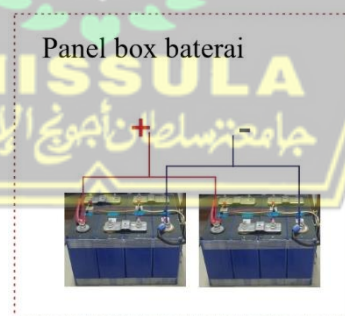
4.10 Penentuan Kapasitas Baterai

Dalam menentukan kapasitas baterai pada sistem off-grid, penting untuk mempertimbangkan jangka waktu penggunaannya agar tidak terjadi pemborosan biaya akibat kelebihan kapasitas baterai. Hal ini dikarenakan sistem off-grid tidak mendapatkan suplai listrik dari jaringan utama PLN. Oleh karena itu, kapasitas baterai disesuaikan dengan beban Generator HHO selama proses elektrolisis sesuai kebutuhan. Dalam penelitian ini, kapasitas baterai direncanakan dengan mempertimbangkan hari otonomi selama 2 hari.

Untuk menentukan kapasitas baterai yang akan diterapkan pada sistem PLTS untuk menyuplai tegangan pada beban, yang ditentukan dengan persamaan (2.21) berikut:

$$C = \frac{625,872 \times 2}{12 \times 80\% \times 95\%}$$

$$= 79,27 \text{ Ah dibulatkan menjadi } 100 \text{ Ah}$$



Gambar 4. 3 Rangkaian seri pada baterai PLTS

Maka jumlah baterai yang dibutuhkan adalah jumlah baterai yang dihubungkan secara seri = 2 buah karena yang ada dipasaran 100 Ah,

4.11 Pengujian PLTS dalam menyuplai Generator HHO

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem PLTS dalam menyuplai daya yang dibutuhkan oleh generator HHO. Pengujian dilakukan dengan melihat performa sistem saat beroperasi. Dengan memastikan bahwa energi yang

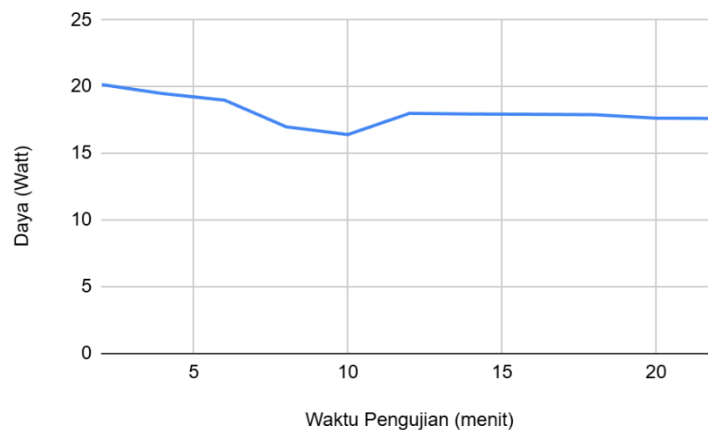
dihasilkan oleh panel surya mencukupi untuk menyuplai operasional generator HHO selama proses pengujian berlangsung

Pengujian PLTS dilakukan secara periodik dimulai dari jam 09:00:00 – 15:00:00 untuk menganalisis kestabilan pasokan daya, laju aliran produksi dan kemampuan sistem dalam mempertahankan operasi generator HHO secara berkelanjutan dibawah variasi kondisi intensitas cahaya matahari.

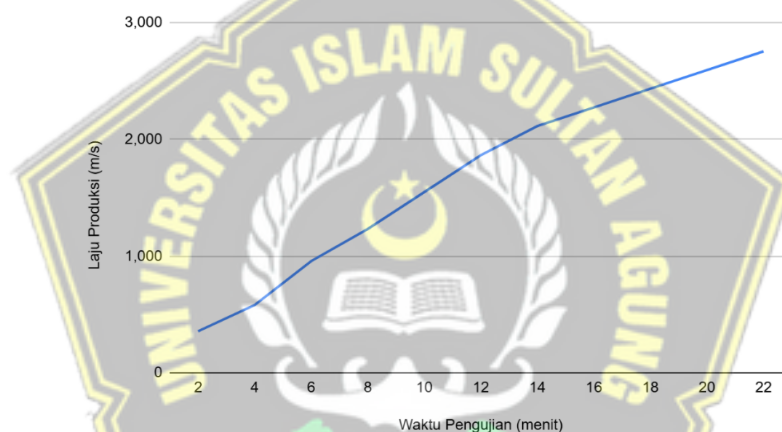
Berikut adalah hasil dari pengujian yang dilakukan pada sistem PLTS menggunakan baterai dan PLTS pada pengujian generator HHO pada jam 09:00 WIB selama 22 menit:

Table 4. 3 Data Hasil Pengujian dengan menggunakan Baterai dan PLTS

no	Waktu Pengujian (menit ke-)	Tegangan Rata-rata Watt-peak (Wp)	Tegangan masuk generator (Volt)			Arus masuk generator (Ampere)			Daya (watt)	lajur aliran L/menit
			Tegangan awal	Tegangan akhir	Tegangan Rata-rata	Arus masuk	Arus akhir	Arus Rata-rata		
1	2	11,18	2,550	2,528	2,385	7,70	7,90	7,80	20,15	0,356
2	4	11,02	2,528	2,497	2,513	7,90	7,70	7,80	19,47	0,581
3	6	10,88	2,497	2,482	2,490	7,70	7,60	7,65	18,98	0,957
4	8	10,77	2,294	2,247	2,271	7,60	7,40	7,50	16,98	1,232
5	10	10,71	2,247	2,465	2,356	7,40	7,30	7,35	16,40	1,548
6	12	10,66	2,465	2,458	2,462	7,30	7,30	7,30	17,99	1,864
7	14	10,66	2,458	2,455	2,457	7,30	7,30	7,30	17,94	2,114
8	16	10,62	2,455	2,451	2,453	7,30	7,30	7,30	17,92	2,274
9	18	10,61	2,451	2,448	2,450	7,30	7,30	7,30	17,89	2,434
10	20	10,59	2,448	2,446	2,447	7,30	7,20	7,25	17,63	2,594
11	22	10,58	2,446	2,445	2,446	7,20	7,20	7,20	17,61	2,754



Gambar 4. 4 Grafik Lajur aliran gas HHO terhadap waktu pengujian



Gambar 4. 5 Grafik Daya yang Dihasilkan PLTS dan Baterai terhadap waktu pengujian.

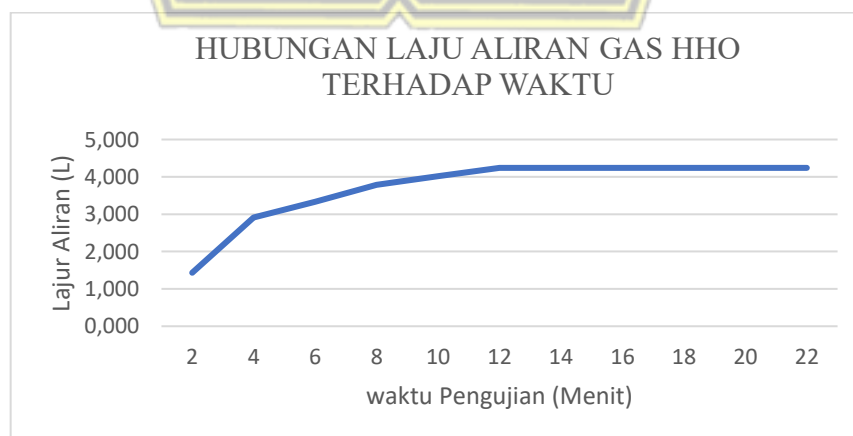
Pada hasil pengujian yang dilakukan terhadap sistem PLTS dan generator HHO yang dilakukan mulai pukul 09.00 pagi, dimana intensitas cahaya matahari masih mengalami fluktuasi. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa laju aliran gas HHO mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu pengujian. Hal ini mengindikasikan bahwa suplai daya dari PLTS secara umum masih mampu mendukung proses elektrolisis secara berkelanjutan. Akan tetapi, terjadi sedikit penurunan pada daya listrik yang dihasilkan oleh PLTS, yang diduga disebabkan oleh perubahan kondisi cuaca, seperti tertutupnya matahari oleh awan. Penurunan daya ini terjadi tidak secara signifikan dan tidak mempengaruhi secara langsung kestabilan operasi generator HHO pada interval waktu pengujian tersebut.

Table 4. 4 Data Hasil Pengujian dengan menggunakan PLTS

no	Waktu Pengujian (menit ke-)	Tegangan PLTS Watt-peak (Wp)	Tegangan masuk generator (Volt)			Arus masuk generator (Ampere)			Daya (watt)	lajur aliran L/menit
			Tegangan awal	Tegangan akhir	Tegangan Rata-rata	Arus masuk	Arus akhir	Arus Rata-rata		
1	2	12,87	3,324	3,279	3,302	19,20	19,20	19,20	62,96	1,433
2	4	12,18	3,279	3,292	3,286	19,20	19,30	19,25	63,54	2,913
3	6	12,18	3,292	3,268	3,280	18,30	18,90	18,60	61,77	3,332
4	8	12,18	3,268	3,242	3,255	18,90	19,10	19,00	61,92	3,786
5	10	12,18	3,242	3,277	3,260	19,10	19,70	19,40	64,56	4,014
6	12	12,18	3,277	3,313	3,295	19,70	20,10	19,90	66,59	4,241
7	14	12,18	3,313	3,297	3,305	20,10	20,60	20,35	67,92	4,241
8	16	12,18	3,297	3,386	3,342	20,60	21,60	21,10	73,14	4,241
9	18	12,18	3,386	3,446	3,416	21,60	22,80	22,20	78,57	4,241



Gambar 4. 6 Grafik daya gas HHO terhadap waktu pengujian



Gambar 4. 7 Grafik Laju aliran gas HHO terhadap waktu pengujian

Terlihat pada gambar 4.6 bahwa daya yang dihasilkan cenderung konstant

Jam Pengujian (jam)	Pengujian Menggunakan PLTS				
	Tegangan rata-rata Wp (V)	Tegangan rata-rata generator (V)	Arus rata-rata generator (A)	Daya rata-rata (Watt)	Rata-rata lajur aliran produksi Gas HHO (L)/22 menit
9	12,26	3,30	19,89	66,77	64,88
10	11,88	3,38	22,95	78,37	66,48
11	12,20	3,20	20,59	65,76	64,95
12	15,35	3,05	18,63	56,42	61,72
13	12,00	3,18	19,13	61,01	65,64
14	12,00	3,28	22,55	75,30	62,74

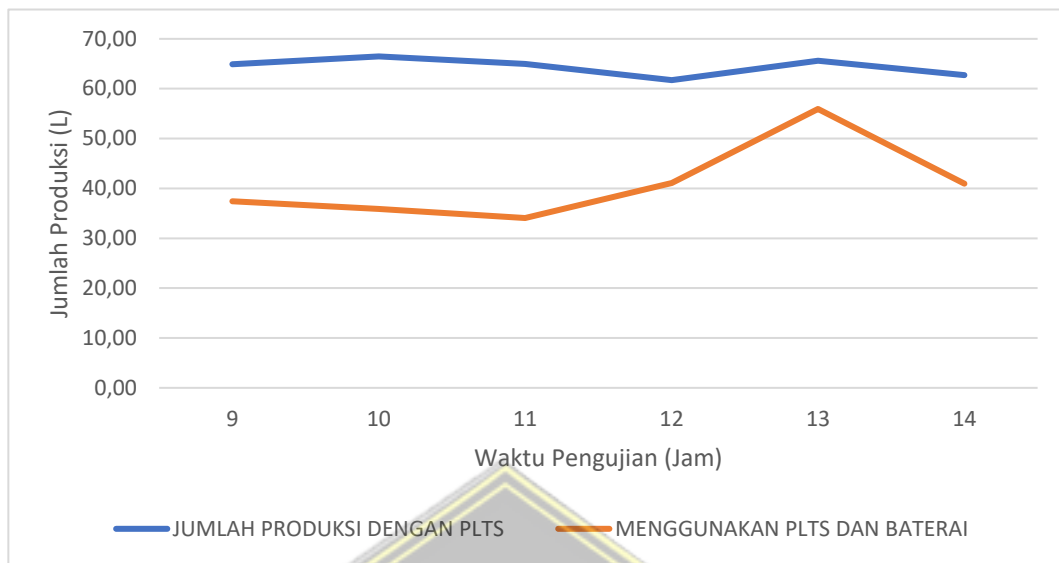
seiring dengan lamanya waktu pengujian lebih optimal dalam memproduksi gas HHO dibandingkan PLTS yang ditambah Baterai, penggunaan baterai menyebabkan ketidakstabilan dan rata-rata produksi gas lebih rendah. Daya Listrik yang lebih besar secara langsung berkorelasi dengan peningkatan produksi gas HHO serta penambahan baterai hanya efektif sesaat namun tidak berkelanjutan.

4.12 Hasil Pengujian Produksi Generator HHO Menggunakan Sumber PLTS + Baterai dan Sumber PLTS

Table 4. 4 Data Hasil Pengujian Produksi Generator HHO menggunakan PLTS dan Baterai

Table 4. 5 Data Hasil Pengujian Produksi Generator HHO menggunakan PLTS

Jam Pengujian (jam)	Pengujian Menggunakan PLTS dan Baterai				
	Tegangan rata-rata WP (V)	Tegangan rata-rata generator (V)	Arus rata-rata generator (A)	Daya rata-rata (Watt)	Rata-rata lajur aliran produksi Gas HHO (L)/22 menit
9	10,75	2,44	7,45	18,09	37,42
10	10,69	2,44	7,38	18,28	35,88
11	10,94	2,30	6,51	14,93	34,06
12	10,56	2,35	6,80	15,93	41,09
13	10,82	2,32	6,78	15,75	55,94
14	10,69	2,31	6,75	15,59	40,93



Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Jumlah Prouksi yang dihasilkan Generator HHO Menggunakan PLTS + Baterai dengan PLTS

Dari gambar grafik diatas, dapat diambil Analisa bahwa Generator HHO yang menggunakan sumber PLTS saja lebih konsisten dan lebih optimal dalam memproduksi gas HHO dibandingkan PLTS yang ditambah Baterai, penggunaan baterai menyebabkan ketidakstabilan dan rata-rata produksi gas lebih rendah. Daya Listrik yang lebih besar secara langsung berkolerasi dengan peningkatan produksi gas HHO serta penambahan baterai hanya efektif sesaat namun tidak berkelanjutan.

Penyebab terjadinya penurunan produksi ketika ditambahkan baterai adalah karena baterai menjadi komponen konversi dan resistansi internal, sehingga tegangan atau arus suplai ke sel elektrolisis turun dan fluktuatif. Walaupun dibeberapa kondisi terjadi lonjakan, secara keseluruhan system PLTS saja masih lebih stabil dan memberikan daya lebih besar langsung ke sel, menghasilkan produksi gas HHO yang lebih konsisten dan tinggi.

Dari hasil secara keseluruhan didapatkan hasil data pada tabel 4.4 dan 4.5. data pada tabel 4.4 merupakan pengujian menggunakan PLTS didapatkan jumlah daya sebesar 403,62 watt. Data pada tabel 4.5 merupakan pengujian menggunakan PLTS dan Baterai didapatkan Jumlah daya sebesar 98,58 watt.

4.13 Laju Aliran Produksi

Laju aliran massa gas HHO (m_{HHO}) menggunakan sumber PLTS dapat dihitung dengan persamaan 2.3 Debit (Q) = 1,85 Liter/menit

Massa Jenis (ρ HHO) = 0.491167 gr/liter

Laju produksi (flowrate) gas HHO

$$\begin{aligned} M_{\text{HHO}} &= Q \times \rho \\ &= 1,85 \text{ L/m} \times 0.491167 \text{ gr/liter} \\ &= 0,908 \text{ gr/menit} \end{aligned}$$

Debit laju aliran yang diketahui sebesar 0,108 gram per menit. Nilai ini diperoleh dari hasil perkalian antara debit gas HHO sebesar 0,22 liter/menit dan massa jenis gas HHO sebesar 0,491167 gram/liter. Dengan mengetahui laju produksi massa ini, dapat dilakukan analisis lebih lanjut terkait kebutuhan energi dan efisiensi sistem elektrolisis yang digunakan.

Laju aliran produksi gas HHO menggunakan sumber PLTS dan baterai dapat dihitung dengan persamaan 2.3 sebagai berikut:

Debit (Q) : 0.22 Liter/menit

Masa jenis (HHO) : 0.491167 gr/liter (*sub bab 2.7.2*)

Laju aliran produksi (flowrate) gas HHO dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} m_{\text{HHO}} &= Q \times \rho \\ &= 0.22 \text{ Liter/menit} \times 0.491167 \text{ gr/liter} \\ &= 0.108 \text{ gr/menit} \end{aligned}$$

4.14 Efisiensi Generator HHO

Untuk menghitung efisiensi produksi HHO yang dihasilkan oleh PLTS untuk menyuplai generator menggunakan persamaan 2.4. Jika menggunakan PLTS dan Baterai

Tegangan	= 12 V
Arus	= 7,41 A
Debit gas/ detik	= 1,85 Liter/menit
Tekanan gas ideal (P)	= 1 atm
Konstanta gas ideal (R)	= 8.314472 Joule/mol.K
Temperatur Ambient	= 30 °C (303 K)

Efisiensi generator HHO dapat di hitung dengan persamaan 2.4. Daya generator HHO selama 6 percobaan dapat dihitung dengan persamaan 2.1 sebagai berikut:

$$P = V \times I \times t$$

$$= 12 \times 7,41 \times 7920$$

$$= 704,2 \text{ kJ}$$

Molaritas senyawa persatuan waktu dapat dihitung:

$$P\dot{V} = \dot{n} \cdot \bar{R} \cdot T$$

$$\dot{n} = \frac{P\dot{V}}{\bar{R}T}$$

$$= \frac{1 \text{ atm} \times 0,03 \text{ L/s}}{8,314472 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times 303 \text{ K}}$$

$$= 1,190 \times 10^{-5}$$

Maka perbandingan energi yang diberikan dan yang digunakan selama 6 jam operasional dapat dihitung dengan persamaan 2.4 sebagai berikut:

$$H_2(g) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow H_2O(l) \quad \Delta H_f^\circ = -286 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{Rasio (R)} = \frac{\Delta h_f \times n \times t}{V \times I \times t}$$

$$= V \times I \times t \text{ (input energi)} : \Delta h_f \times n \times t \text{ (output energi)}$$

$$= (12 \text{ V} \times 7,41 \text{ s} \times 7920 \text{ s}) : (286 \text{ kJ/mol} \times 1,190 \times 10^{-5} \text{ mol/s} \times 7920)$$

$$= 704,2 \text{ kJ} : 26,95 \text{ kJ}$$

Jadi perbandingan energi yang berguna dibanding energi yang diberikan selama 6 jam operasi adalah 1 : 26,11 (26,11%).

Untuk generator HHO dengan suplai langsung dari PLTS dengan arus rata rata 20,41 A dan flowrate 3,71 L/menit, selama 6 percobaan perbandingan energi yang berguna dibanding energi yang diberikan adalah 1939 kJ : 54,83 kJ atau 1 : 35,57 (35,57 %)

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian perancangan PLTS untuk menyuplai daya pada proses elektrolisis dalam kebutuhan hidrogen dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

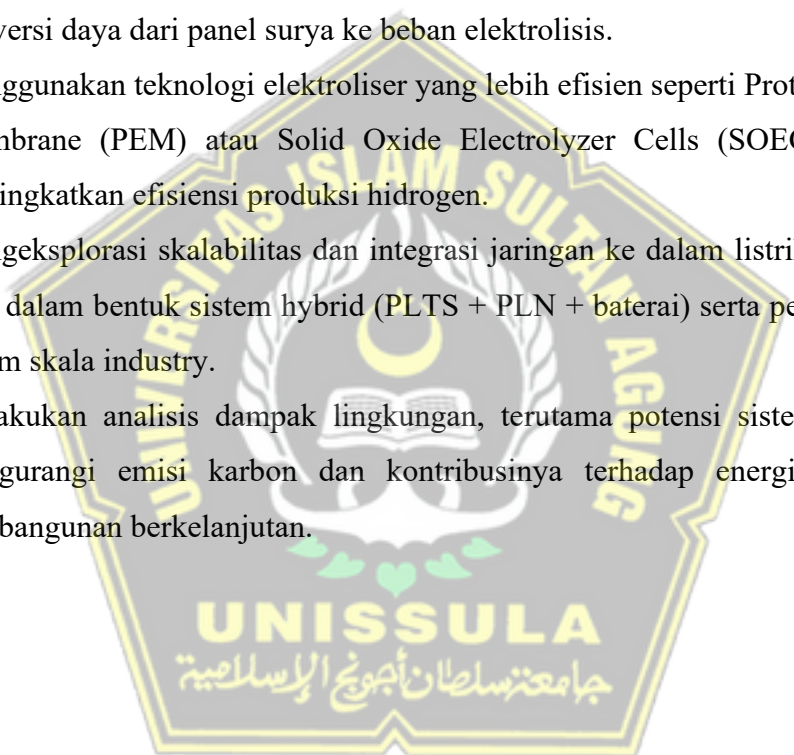
1. Perancangan generator HHO dirancang dan dioperasikan menggunakan daya kurang lebih sebesar 400 watt yang dipasang dari sistem PLTS dengan tegangan 13 volt dan arus 30–33 ampere, yang Dimana pada proses elektrolisis membutuhkan stainless stel sebanyak 24 pelat stainless steel tipe 304 sebagai elektroda dengan jarak 1,5 mm dan luas efektif 100 cm², serta dikendalikan melalui sistem MPPT untuk memastikan proses elektrolisis berjalan optimal tanpa bergantung pada listrik PLN.
2. Sistem PLTS yang dirancang mampu menghasilkan daya listrik rata-rata sebesar 827,344 Wattpeak, yang terbukti dapat mencukupi kebutuhan operasional generator HHO dengan beban daya 397 watt.
3. Kinerja sistem PLTS menunjukkan stabilitas daya keluaran walaupun terdapat fluktuasi intensitas cahaya akibat kondisi cuaca. Hal ini dapat dilihat dari grafik pengujian yang menunjukkan bahwa meskipun daya PLTS sedikit menurun, laju produksi gas HHO tetap meningkat secara konsisten seiring bertambahnya waktu. Generator HHO mampu menghasilkan laju produksi gas yang meningkat dari 0,356 m/s hingga 2,754 m/s dalam 22 menit pengujian, dengan tegangan dan arus yang terjaga dalam batas kerja yang telah direncanakan. Ini mengindikasikan bahwa sistem mampu mempertahankan efisiensi elektrolisis meskipun terjadi perubahan daya keluaran dari panel surya.
4. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi produksi gas HHO dari sistem PLTS dan baterai selama 6 jam operasi mencapai sekitar 3,83% (rasio 1 : 26,11), sedangkan dari suplai langsung PLTS hanya sekitar 2,81% (rasio 1 : 35,57). Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan baterai dapat meningkatkan efisiensi proses elektrolisis, meskipun secara keseluruhan efisiensi konversi energi listrik

menjadi energi kimia dalam bentuk gas HHO masih tergolong rendah, sehingga diperlukan pengembangan teknologi lebih lanjut untuk meningkatkan efektivitas sistem.

5.2 Saran

Untuk pengembangan penelitian ke depan, berikut beberapa saran yang dapat dipertimbangkan:

1. Mengembangkan sistem control MPPT dengan algoritma cerdas seperti fuzzy logic atau metode kecerdasan buatan lainnya untuk meningkatkan efisiensi konversi daya dari panel surya ke beban elektrolisis.
2. Menggunakan teknologi elektroliser yang lebih efisien seperti Proton Exchange Membrane (PEM) atau Solid Oxide Electrolyzer Cells (SOEC) agar bisa meningkatkan efisiensi produksi hidrogen.
3. Mengeksplorasi skalabilitas dan integrasi jaringan ke dalam listrik skala besar atau dalam bentuk sistem hybrid (PLTS + PLN + baterai) serta pengembangan dalam skala industry.
4. Melakukan analisis dampak lingkungan, terutama potensi sistem ini dalam mengurangi emisi karbon dan kontribusinya terhadap energi bersih dan pembangunan berkelanjutan.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Safrizal, “Rancangan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Listrik Jurnal Disprotek,” *Journal Disprotek*, vol. 8, no. 2, pp. 75–81, 2017, [Online]. Available: <https://ejournal.unisnu.ac.id/JDPT/article/download/544/861>
- [2] B. H. Purwoto, J. Jatmiko, M. A. Fadilah, and I. F. Huda, “Efisiensi Penggunaan Panel Surya sebagai Sumber Energi Alternatif,” *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 18, no. 1, pp. 10–14, 2018, doi: 10.23917/emitor.v18i01.6251.
- [3] B. Yulianti, Y. Dewanto, M. Haryanti, and M. Awaludin, “Mesin Inhalasi Hydroxy Kapasitas 24-36Watt Berbasis Solar Cell,” *Jurnal Teknologi Industri*, vol. 11, no. 1, 2022.
- [4] R. A. Pratama and D. S. Kawano, “Pengaruh Penggunaan Frekuensi Listrik Terhadap Performa Generator HHO Dan Unjuk Kerja Engine Honda Kharisma 125CC,” *Jurnal Teknik Pomits*, vol. 2, no. 2, pp. B294–B298, 2013.
- [5] A. F. Nuh, “Eksperimental Energi Listrik Yang Dihasilkan Oleh Mekanisme Ocean Wave Energy Harvester Tipe Pelampung Bola Dengan Metode Cantilever Piezoelectric,” 2016.
- [6] A. Hakim and B. Sudarmanta, “Karakterisasi Unjuk Kerja Generator Gas HHO Tipe Dry Cell dengan Elektroda Titanium dan Penambahan PWM,” *PhD diss., Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 2016.
- [7] B. N. Mukashev, A. A. Betekbaev, D. A. Kalygulov, A. A. Pavlov, and D. M. Skakov, “Study of silicon production processes and development of solar-cell fabrication technologies,” *Semiconductors*, vol. 49, no. 10, pp. 1375–1382, 2015.
- [8] J. Bawalo, M. Rumbayan, and N. M. Tulung, “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Rumah Kebun Desa Ammat Kabupaten Kepulauan Talaud,” *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*, 2014.

- [9] V. Karthikeyan, S. Rajasekar, V. Das, P. Karuppanan, and A. K. Singh, "Grid-connected and off-grid solar photovoltaic system," *Smart energy grid design for island countries: Challenges and opportunities*, pp. 125–157, 2017.
- [10] A. K. Bhargava, H. P. Garg, and R. K. Agarwal, "Study of a hybrid solar system—solar air heater combined with solar cells," *Energy Convers Manag*, vol. 31, no. 5, pp. 471–479, 1991.
- [11] M. T. Darno, Yahonnes M. Simanjutak, "Studi Perencanaan Modul Praktikum Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts)," *Jurnal Untan*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2017.
- [12] M. A. Rahmanta, A. Syamsuddin, and F. Tanbar, "Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV) Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) Di Indonesia," *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 22–33, 2023.
- [13] B. Rudiyanto, R. E. Rachmanita, and A. Budiprasojo, *Dasar-Dasar Pemasangan Panel Surya*. unisma press, 2023.
- [14] M. Y. Puriza, W. Yandi, and A. Asmar, "Perbandingan Efisiensi Konversi Energi Panel Surya Tipe Polycrystalline dengan Panel Surya Monocrystalline Berbasis Arduino di Kota Pangkalpinang," *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, vol. 8, no. 1, pp. 47–52, 2021.
- [15] K. A. Munzer, K. T. Holdermann, R. E. Schlosser, and S. Sterk, "Thin monocrystalline silicon solar cells," *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 46, no. 10, pp. 2055–2061, 1999.
- [16] O. Ayadi, R. Shadid, A. Bani-Abdullah, M. Alrbai, M. Abu-Mualla, and N. Balah, "Experimental comparison between Monocrystalline, Polycrystalline, and Thin-film solar systems under sunny climatic conditions," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 218–230, 2022.

- [17] V. R. Kossi, “Perencanaan PLTS Terpusat (off-grid) di Dusun Tikalong Kabupaten Mempawah,” *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, vol. 6, no. 1, 2018.
- [18] A. Shrestha and A. Singh, “Manual for Solar Technician,” *2018 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering, ICE Cube*, no. November, pp. 57–64, 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.2161.0962.
- [19] Deng, D. (2015), “Li-ion batteries: basics, progress, and challenges,” pp. 3: 385-418., 2015.
- [20] Muhammad Thowil Afif and Ilham Ayu Putri Pratiwi, “Analisis Perbandingan Baterai Lithium-Ion, Lithium-Polymer, Lead Acid Dan Nickel-Metal Hydride Pada Penggunaan Mobil Listrik-Review,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 6, no. 2, pp. 95–99, 2015.
- [21] S. Sudaryatno, “Analisis Rangkaian Listrik Jilid-1,” *Pengenalan Pada Sistem 3 fasa*, vol. 1, pp. 1–361, 2012.
- [22] “Jam Paling Optimal Menyerap Sinar Matahari ke Panel Surya.” [Online]. Available: <https://www.solarkita.com/blog/jam-paling-optimal-menyerp-sinar-matahari-ke-panel-surya>
- [23] D. Darno, “Studi Perencanaan Modul Praktikum Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts),” *JTRAIN: Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*, vol. 1, no. 1, 2017.
- [24] H. R. Iskandar, C. B. Elysees, R. Ridwanulloh, A. Charisma, and H. Yuliana, “Analisis Performa Baterai Jenis Valve Regulated Lead Acid pada PLTS Off-grid 1 kWp,” *J Teknol*, vol. 13, no. 2, pp. 129–140, 2021.