

**ANALISIS KELAYAKAN INSTALASI PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) *OFF GRID* UNTUK PDAM
TIRTA DAROY MENGGUNAKAN *SOFTWARE RETSCREEN***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Oleh:
Ruhyal Afli
NIM. 190702052
Mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi
Program Studi Teknik Lingkungan**



**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI AR-RANIRY
BANDA ACEH
2026/1448 H**

LEMBAR PERSETUJUAN TUGAS AKHIR

ANALISIS KELAYAKAN INSTALASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) *OFF GRID* UNTUK PDAM TIRTA DAROY MENGGUNAKAN *SOFTWARE RETSCREEN*

TUGAS AKHIR

Diajukan Kepada Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri (UIN) Ar-Raniry Banda Aceh
Sebagai Salah Satu Beban Studi Memperoleh Gelar Sarjana (S1)
Dalam Ilmu Teknik Lingkungan

Oleh:

RUHYAL AFLI

190702052

Mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi
Program Studi Teknik Lingkungan

Disetujui untuk dimunaqasyahkan Oleh:

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Suardi Nur, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIDN. 2010108103



Dr. Hendri Ahmadian, S.Si., M.I.M
NIDN. 2004018303

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Lingkungan



Husnawati Yahya, M.Sc.
NIP. 198311092014032002

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

ANALISIS KELAYAKAN INSTALASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) *OFF GRID* UNTUK PDAM TIRTA DAROY MENGGUNAKAN *SOFTWARE RETSCREEN*

TUGAS AKHIR

Telah Diuji Oleh Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir Fakultas Sains dan
Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh dan Dinyatakan Lulus
Serta Diterima Sebagai Salah Satu Beban Studi Program Sarjana (S-1)
Dalam Ilmu Teknik Lingkungan

Pada Hari/Tanggal: Selasa/ 30 Juni 2026
Selasa/ 15 Muharram 1448 H
di Darussalam, Banda Aceh

Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir:

Ketua,

Suardi Nur, S.T., M.Sc., Ph.D.

NIDN. 2010108103

Penguji I,

Dr. Eng Nur Aida, M.Sc

NIDN. 2016067801

Sekretaris,

Dr. Hendri Ahmadian, S.Si., M.I.M.

NIDN. 2004018303

Penguji II,

Teuku Muhammad Ashari, M.Sc.

NIDN. 2002028301

Mengetahui:

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Ar-Raniry Banda Aceh,



Prof. Dr. Ir. Muhammad Dirhamsyah, M.T., IPU

NIP. 1962100219881111001

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Nama : Ruhyal Afli
Nim : 190702052
Program Studi : Teknik Lingkungan
Judul Tugas Akhir : Analisis Kelayakan Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off Grid* Untuk PDAM Tirta Daroy
Menggunakan *Software RETScreen*

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam penulisan skripsi ini, saya:

1. Mengerjakan sendiri karya ini dan mampu bertanggung jawab atas karya ini;
2. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun baik di Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh maupun di perguruan tinggi lainnya;
3. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan dosen pembimbing;
4. Tidak melakukan plagiasi terhadap naskah karya orang lain;
5. Tidak menggunakan karya orang lain tanpa menyebutkan sumber asli atau tanpa izin pemilik karya; dan
6. Tidak memanipulasi dan memalsukan data.

Bila di kemudian hari ada tuntutan dari pihak lain atas karya saya, dan telah melalui pembuktian yang dapat dipertanggungjawabkan dan ternyata memang benar ditemukan bukti bahwa saya telah melanggar pernyataan ini, maka saya siap dikenai sanksi berdasarkan aturan yang berlaku di Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh.

Banda Aceh, 30 Juni 2026



Ruhyal Afli

ABSTRAK

Nama : Ruhyal Afli
Nim : 190702052
Program Studi : Teknik Lingkungan
Judul : Analisis Kelayakan Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off Grid* Untuk PDAM Tirta Daroy
Menggunakan *Software RETScreen*
Tanggal Sidang : -
Jumlah Halaman : -
Pembimbing I : Suardi Nur, S.T., M.Sc., Ph.D.
Pembimbing II : Dr. Hendri Ahmadian, S.Si., M.I.M
Kata Kunci : PLTS, *RETScreen*, Kelayakan Investasi, Emisi GRK, PDAM Tirta Daroy

PDAM Tirta Daroy sebagai penyedia air bersih memiliki konsumsi energi listrik yang sangat besar untuk mengoperasikan pompa distribusi dan pompa intake. Ketergantungan pada energi fosil mendorong perlunya transisi ke energi terbarukan guna meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Penelitian ini bertujuan merancang sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), mengevaluasi kelayakan investasi, serta mengestimasi potensi pengurangan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) di PDAM Tirta Daroy. Metode yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif dengan simulasi menggunakan software *RETScreen Expert* dan analisis spasial luas atap melalui QGIS. Hasil penelitian menunjukkan total luas atap tersedia seluas 3.207,06 m², yang mampu menampung kapasitas PLTS riil sebesar 601,2 kWp. Dengan rata-rata iradiasi matahari harian 5,10 kWh/m²/hari, sistem diproyeksikan menghasilkan energi sebesar 923.236 MWh per tahun dan memberikan kontribusi (*solar fraction*) sebesar 16,59% terhadap total beban harian. Secara finansial, proyek ini dinyatakan tidak layak pada

struktur tarif saat ini, dengan nilai *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar $-0,31\%$ dan periode pengembalian sederhana (*simple payback*) selama 33 tahun akibat tingginya biaya investasi awal yang mencapai \$3.292.063. Namun, dari aspek lingkungan, penerapan PLTS mampu mereduksi emisi GRK secara signifikan, yaitu sebesar 983,1 tCO₂ per tahun. Penelitian ini menyimpulkan bahwa meskipun proyek memiliki manfaat ekologis yang tinggi, diperlukan strategi penekanan biaya investasi atau skema subsidi agar proyek dapat mencapai kelayakan ekonomi.



ABSTRACT

Name : Ruhyal Afli
Student ID : 190702052
Study Program : Environmental Engineering
Title : Feasibility Analysis Of Off Grid Solar Power Plant
Installation For PDAM Tirta Daroy Using RETScreen
Software
Thesis Defense Date : -
Total Pages : -
Supervisor I : Suardi Nur, S.T., M.Sc., Ph.D.
Supervisor II : Dr. Hendri Ahmadian, S.Si., M.I.M
Keywords : Solar Power Plant, RETScreen, Feasibility Study, GHG
Emissions, PDAM Tirta Daroy

PDAM Tirta Daroy, as a clean water provider, has a very high electrical energy consumption to operate its distribution and intake pumps. Dependence on fossil fuels necessitates a transition to renewable energy to improve operational efficiency and reduce greenhouse gas emissions. This study aims to design a Solar Power Plant (PLTS) system, evaluate its investment feasibility, and estimate the potential reduction in Greenhouse Gas (GHG) emissions at PDAM Tirta Daroy. The method employed is quantitative descriptive, utilizing RETScreen Expert software simulations and spatial roof area analysis through QGIS. The results show that the total available roof area is 3,207.06 m², which can accommodate a real PLTS capacity of 601.2 kWp. With an average daily solar irradiation of 5.10 kWh/m²/day, the system is projected to generate 923.236 MWh of energy annually, contributing a solar fraction of 16.59% to the total daily load. Financially, under the current tariff structure, this project is deemed unfeasible, showing an Internal Rate of Return (IRR) of -0,31% and a simple payback period of 33 years, primarily due to the high initial investment cost of \$3.292.063. However, from an

environmental perspective, the PLTS implementation significantly reduces GHG emissions by 983,1 tCO₂ per year. This study concludes that although the project has high ecological value, cost-reduction strategies or subsidy schemes are essential for it to achieve economic viability.



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji bagi Allah SWT, atas segala karunia yang tiada henti Allah SWT berikan kepada seluruh makhluknya yang tidak terhitung banyaknya. Shalawat beriring salam saya junjungkan kepada Nabi Muhammad saw. Tak lupa pula terima kasih sebesar-besarnya penulis ucapkan kepada ayahanda dan ibunda tercinta, Burhan Bentara dan As Ariaah atas doa, motivasi, nasihat dan segala bentuk bantuan yang telah di berikan kepada penulis. Penulis mengucapkan syukur kepada Allah SWT atas terselesainya proposal tugas akhir yang berjudul “Analisis Kelayakan Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off Grid Untuk PDAM Tirta Daroy Menggunakan *Software RETScreen*”.

Adapun maksud dan tujuan penulisan ini sebagai syarat untuk memenuhi salah satu Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh untuk meraih gelar Sarjana. Penulis mengungkapkan rasa terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan proposal tugas akhir ini. Untuk itu pada kesempatan ini terimakasih kepada:

1. Ibu Husnawati Yahya M.Sc. selaku Kepala Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry.
2. Bapak Aulia Rohendi, S.T., M.Sc selaku Sekertaris Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh.
3. Bapak Teuku Muhammad Ashari, M.Sc., selaku dosen pembimbing akademik yang selalu memberikan arahan dan masukan di setiap permasalahan kuliah yang penulis alami.
4. Bapak Suardi Nur, S.T., M.Sc, PhD selaku dosen pembimbing satu telah berkenan membimbing, mengarahkan dan memberikan tambahan ilmu serta solusi pada setiap permasalahan dan kesulitan dalam penulisan Tugas Akhir.
5. Bapak Dr. Hendri Ahmadian, S.Si., M.I.M. selaku dosen pembimbing kedua yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan

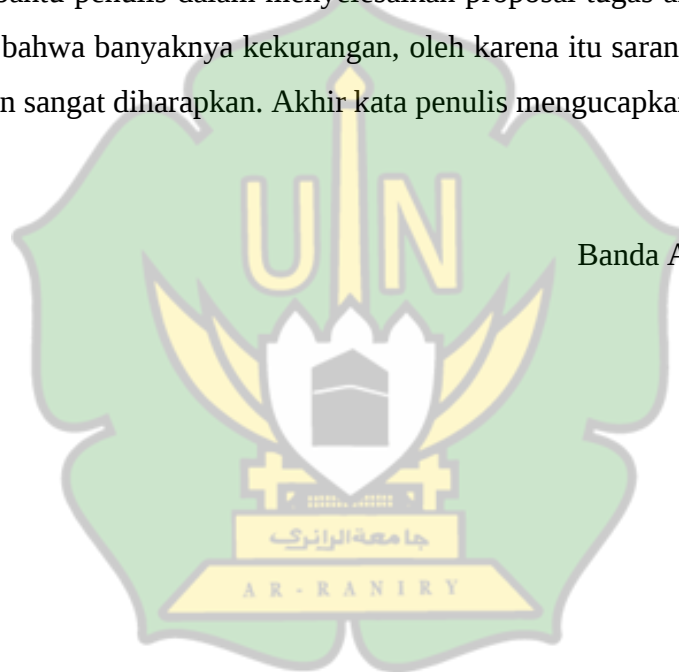
bimbingan, arahan, serta saran-saran yang sangat berharga selama proses penelitian hingga penyusunan tugas akhir ini. Setiap masukan, koreksi, dan dorongan yang diberikan telah memberikan kontribusi besar bagi peningkatan kualitas penulisan serta ketajaman analisis dalam penelitian ini.

6. Serta seluruh sahabat dan teman-teman yang telah membantu dalam keberlangsungan dan kelancaran dalam penelitian hingga penyusunan proposal tugas akhir.

Penulis berharap Allah SWT membalas segala kebaikan dari semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan proposal tugas akhir. Serta penulis menyadari bahwa banyaknya kekurangan, oleh karena itu saran dan kritikan yang membangun sangat diharapkan. Akhir kata penulis mengucapkan terimakasih.

Banda Aceh, 30 Juni 2026

Ruhyal Afli



DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN TUGAS AKHIR.....	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
1.5 Batasan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Energi Surya	6
2.2 Potensi Energi Surya	6
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya	9
2.4 Jenis - jenis sistem PLTS.....	10
2.4.1 PLTS <i>On – Grid</i>	10
2.4.2 PLTS <i>Off Grid</i>	12
2.4.3 PLTS <i>Hybrid</i>	13

2.5	Komponen Utama PLTS (Sistem <i>Off Grid</i>)	15
2.5.1	Panel Surya.....	15
2.5.2	<i>Solar Charge Controller</i> (SCC).....	18
2.5.3	Baterai	19
2.5.4	Inverter	20
2.5.5	Kabel	21
2.6	Perhitungan Teknis PLTS	22
2.6.1	Menentukan Kapasitas Sistem Pembangkit.....	22
2.6.2	Menghitung Jumlah Kebutuhan Modul Surya	22
2.6.3	Menghitung Luas Area <i>Array</i> (PV Area) dan Memilih Modul Surya ..	22
2.6.4	Menghitung kebutuhan energi harian.....	23
2.6.5	Menentukan kapasitas <i>Solar Charge Controller</i>	23
2.6.6	Menentukan Kapasitas Inverter.....	23
2.6.7	Menentukan Kapasitas Baterai.....	24
2.7	Metode Kelayakan Investasi	24
2.7.1	Metode Net Present Value (NPV).....	24
2.7.2	Metode Internal Rate of Return (IRR)	25
2.7.3	Metode <i>Break Even Point</i> (BEP)	25
2.8	<i>Software RETScreen</i>	26
2.8.1	Pengenalan <i>Software RETScreen</i>	26
2.8.2	Tahap – Tahap Simulasi <i>RETScreen</i>	27
2.9	Penelitian Terdahulu.....	29
BAB III METODE PENELITIAN		35
3.1	Jenis Penelitian	35
3.2	Lokasi Penelitian	35

3.3	Alat dan Bahan	36
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	37
3.4.1	Studi literatur.....	39
3.4.2	Pengumpulan Data	39
3.4.3	Perhitungan dan Hasil	39
3.4.4	Simulasi Data PLTS.....	42
3.4.5	Analisa Kelayakan PLTS	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		49
4.1	Beban Energi Listrik WTP	49
4.2	Luas Area Atap.....	51
4.3	Irradiasi Surya	54
4.4	Desain Konfigurasi Sistem PLTS Off-Grid	55
4.4.1	Jumlah Kapasitas Terpasang (kWp)	56
4.4.2	Hasil Pemodelan Energi.....	58
4.4.3	Hasil Pemodelan Biaya	61
4.4.4	Hasil Pemodelan Pengurangan Emisi GHG.....	63
4.4.5	Hasil Pemodelan Finansial/Keuangan.....	65
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		68
5.1	Kesimpulan	68
5.2	Saran	69
DAFTAR PUSTAKA.....		70
LAMPIRAN.....		74

DAFTAR GAMBAR

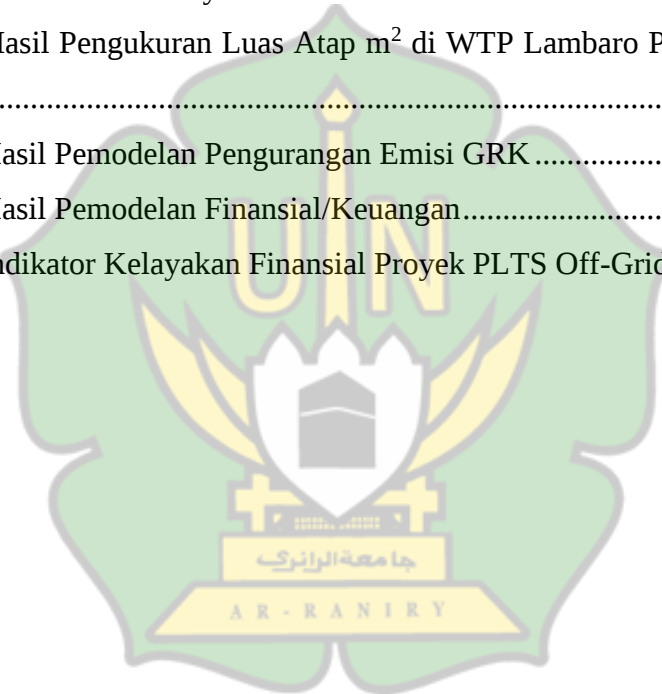
Gambar 2.1 Sebaran Iradiasi Horizontal Energi Surya di Indonesia.....	7
Gambar 2.2 Pasokan Energi Surya Tahun 2018 - 2022	8
Gambar 2.3 Diagram blok sistem PV On Grid.....	11
Gambar 2.4 Ilustrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Jenis On-Grid	11
Gambar 2.5 Diagram blok sistem PV Off Grid	12
Gambar 2.6 Ilustrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Jenis Off Grid.....	13
Gambar 2.7 Diagram blok sistem PV Hybrid	14
Gambar 2.8 Ilustrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Jenis Hybrid	14
Gambar 2.9 Monocrystalline Solar Sel	16
Gambar 2.10 Polycrystalline Solar Sel.....	17
Gambar 2.11 Thin film Solar Sel	18
Gambar 2.12 Solar Charge Controller.....	18
Gambar 2.13 Baterai.....	19
Gambar 2.14 Inverter.....	20
Gambar 2.15 Tampilan Awal <i>RETScreen</i>	27
Gambar 2.16 Tahapan Proses Simulasi <i>RETScreen</i>	28
Gambar 3.1 Peta Lokasi Perencanaan Pemasangan PLTS	36
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.....	38
Gambar 3.3 Tampilan Worksheet 'Location'	43
Gambar 3.4 Tampilan Worksheet 'Energy'.....	44
Gambar 3.5 Tampilan Worksheet 'Energy'.....	45
Gambar 3.6 Tampilan Worksheet 'Financial Analysis'	46
Gambar 3.7 Tampilan Worksheet 'Emission'	47
Gambar 4.1 Peta Identifikasi & Pengukuran Luas Atap WTP PDAM Tirta Daroy	52
Gambar 4.2 Radiasi Matahari Harian Dari <i>RETScreen</i>	54
Gambar 4.3 Lembar Pemodelan Pada Menu “Energi”	59
Gambar 4.4 Lembar Pemodelan Pada Menu “Biaya”	62
Gambar 4.5 Lembar Pemodelan Pada Menu “Emisi”	64

Gambar 4.6 Lembar Pemodelan Pada Menu “Finansial/Kuangan” 66



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Radiasi harian rata - rata pada beberapa lokasi di indonesia.....	9
Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu.....	29
Tabel 3.1 Spesifikasi Alat Penelitian.....	36
Tabel 4.1 Data Spesifikasi Teknis Pompa dan Elektromotor Running di WTP Lambaro PDAM Tirta Daroy	49
Tabel 4.2 Data Spesifikasi Teknis Pompa dan Elektromotor Standby di WTP Lambaro PDAM Tirta Daroy	50
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Luas Atap m ² di WTP Lambaro PDAM Tirta Daroy	53
Tabel 4.5 Hasil Pemodelan Pengurangan Emisi GRK	64
Tabel 4.6 Hasil Pemodelan Finansial/Keuangan.....	66
Tabel 4.7 Indikator Kelayakan Finansial Proyek PLTS Off-Grid.....	67



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia, sebagai negara di wilayah tropis, dianugerahi dengan kekayaan sumber daya alam yang melimpah, baik dari sumber energi tak terbarukan maupun yang terbarukan. Sumber energi tak terbarukan, yang dikenal sebagai energi fosil, berasal dari cadangan yang terbatas dan pembentukannya memerlukan jutaan tahun. Selain itu, penggunaannya menimbulkan dampak negatif signifikan terhadap lingkungan berupa emisi gas rumah kaca. Sebaliknya, energi terbarukan (EBT), yang berasal dari sumber-sumber alami seperti matahari, angin, dan air, memiliki potensi untuk terus diperbarui dan ramah lingkungan (Rumahorbo & Nursadi, 2023).

Mayoritas kebutuhan energi di Indonesia hingga saat ini masih bergantung secara dominan pada sumber energi berbasis fosil. Kondisi ini menunjukkan bahwa ketergantungan terhadap energi fosil berisiko menimbulkan permasalahan di masa mendatang, mengingat cadangan energi fosil bersifat terbatas dan hanya dapat terbentuk kembali melalui proses geologi yang berlangsung dalam jutaan tahun. Seiring dengan meningkatnya permintaan energi, harga minyak bumi cenderung mengalami kenaikan, sehingga berdampak pada ketidakstabilan ekonomi dan ketersediaan energi nasional. Struktur bauran energi Indonesia saat ini masih didominasi oleh energi fosil, dengan komposisi sekitar 50% berasal dari batubara, 29% dari gas alam, 7% dari minyak bumi, serta hanya 14% dari energi baru dan terbarukan (EBT). Melihat tren peningkatan kebutuhan energi domestik yang terus berlanjut, maka upaya pengembangan dan pemanfaatan sumber energi alternatif berbasis EBT menjadi sangat penting untuk mewujudkan ketahanan energi nasional yang berkelanjutan (Sidik et al., 2023).

Keterbatasan lahan, peningkatan polusi udara yang disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil, dan keterlibatan Indonesia dalam Gerakan mendukung energi terbarukan. Pemerintah memprioritaskan penggunaan energi

bersih untuk menghasilkan energi melalui pembangkit tenaga distribusi (*Distributed Generator*). Salah satu sumber energi baru dan terbarukan yang paling potensial dan paling diminati di Indonesia adalah energi matahari. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) mengubah energi matahari menjadi listrik. Selain itu, pesatnya perkembangan teknologi dalam sepuluh tahun terakhir mendorong penggunaan panel surya. Hal ini menghasilkan peningkatan tingkat efisiensi panel surya saat ini, bersama dengan penurunan tahunan harga panel surya, yang membuat alternatif sumber energi ini semakin populer saat ini. Peneliti di seluruh dunia berharap harga fotovoltaik (PV) akan turun lebih dari tiga kali lipat di masa mendatang. Banyak industri menengah hingga besar di Indonesia tertarik untuk menerapkan PLTS pada lahan usaha mereka. Meskipun energi yang dihasilkan oleh PLTS belum dapat dijual pada PLN, namun PLTS dapat menghemat banyak listrik (Ray et al., 2021).

Dalam Peraturan Menteri ESDM Nomor 26 Tahun 2021 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang terhubung pada jaringan tenaga listrik pemegang izin usaha penyediaan tenaga listrik untuk kepentingan umum. Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum yang selanjutnya disebut Pemegang IUPTLU adalah badan yang memiliki izin untuk melakukan usaha penyediaan tenaga listrik untuk kepentingan umum yang memiliki wilayah usaha ketenagalistrikan (Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2021).

PDAM Tirta Daroy merupakan salah satu instansi yang potensial untuk menerapkan PLTS Atap guna mendukung efisiensi energi. Namun, sebelum implementasi dilakukan, diperlukan analisis kelayakan investasi terlebih dahulu guna mengevaluasi kelayakan ekonomi dan teknis proyek tersebut. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi alternatif skenario investasi yang paling optimal dan menguntungkan dalam perencanaan penerapan PLTS Atap di lingkungan PDAM. Oleh karena itu analisa kelayakan investasi perlu dilakukan. Dalam proses produksinya PDAM Tirta Daroy menggunakan berbagai peralatan dalam menunjang operasional produksi seperti pompa *intake*, pompa distribusi, dan pompa dosing. Selain itu ada juga *Water Treatment Plan* (WTP), gas klor untuk

desinfektan, sehingga membutuhkan energi listrik yang besar. Pemanfaatan PLTS sebagai salah satu sumber energi sejalan dengan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030, di mana pemerintah berupaya memenuhi kebutuhan listrik melalui program 35 GW dan kebijakan pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT). Saat ini, PLTS menjadi jenis pembangkit yang terus berkembang, salah satunya adalah PLTS yang dipasang di atap bangunan atau dikenal sebagai PLTS *Rooftop*. Peraturan penggunaan PLTS *Rooftop* diatur melalui Peraturan Menteri ESDM No. 49 Tahun 2019 yang kemudian diubah melalui Peraturan Menteri ESDM No. 13 Tahun 2019. Dengan adanya peraturan tersebut, implementasi PLTS *Rooftop* diharapkan dapat mendukung pencapaian target pemanfaatan EBT sekitar 23% pada tahun 2025 (Nurjaman & Purnama, 2022).

Sebagai penyedia layanan air bersih utama, PDAM Tirta Daroy mengandalkan operasi fasilitas yang menyerap energi listrik dalam jumlah besar untuk proses produksi dan pendistribusiannya. Selama ini, sumber energi listrik tersebut masih didominasi oleh pembangkit berbahan bakar fosil, yang dikenal sebagai kontributor utama pelepasan emisi karbon dioksida (CO₂) dan gas rumah kaca. Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap dapat menjadi solusi, karena setiap kilowatt-hour (kWh) energi yang dihasilkannya setara dengan mencegah terlepasnya sekitar 0,8 hingga 1,0 kg emisi CO₂ yang biasanya dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga batu bara. Oleh karena itu, penerapan PLTS Atap di atap gedung operasional PDAM bukan hanya tentang penghematan biaya, tetapi telah bergeser menjadi sebuah langkah strategis dan nyata dalam mendukung pencapaian target bauran energi terbarukan dan net zero emission yang ditargetkan pemerintah.

Selain itu, Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menawarkan berbagai keunggulan, terutama dari aspek lingkungan. Selama operasionalnya, PLTS bersifat bebas polusi dan tidak memerlukan bahan bakar fosil. Selain itu, sumber energi surya memiliki potensi yang melimpah dan bersifat berkelanjutan. Namun demikian, terdapat beberapa tantangan, khususnya dari aspek ekonomi. Investasi awal PLTS cenderung lebih mahal dibandingkan dengan

sumber energi konvensional lain. Tingginya biaya tersebut disebabkan oleh tingginya biaya produksi sel surya dan perangkat pendukung yang esensial seperti baterai, inverter, dan infrastruktur instalasi. Dari sisi operasional, PLTS tidak dapat beroperasi pada malam hari dan kurang optimal dalam kondisi cuaca berawan, sehingga memerlukan sistem penyimpanan energi untuk menjamin pasokan yang stabil. Meskipun demikian, PLTS memiliki keunggulan berupa biaya operasional yang relatif rendah dibandingkan teknologi pembangkit listrik lainnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana rancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang optimal untuk mendukung kebutuhan energi listrik di PDAM Tirta Daroy ?
2. Bagaimana kelayakan investasi instalasi PLTS untuk kebutuhan energi listrik di PDAM Tirta Daroy ?
3. Bagaimana perkiraan pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) yang dapat dicapai dengan mengimplementasikan PLTS di PDAM Tirta Daroy ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :.

1. Merancang sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang sesuai untuk memenuhi kebutuhan beban di PDAM Tirta Daroy.
2. Mengevaluasi dan mengestimasi kelayakan investasi yang diperlukan untuk instalasi PLTS guna memenuhi kebutuhan energi listrik di PDAM Tirta Daroy.
3. Memperkirakan potensi pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) yang dapat dicapai melalui implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di PDAM Tirta Daroy.

1.4 Manfaat Penelitian

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

1. Penelitian ini dapat menjadi referensi bagi PDAM dalam membuat kebijakan terkait penggunaan energi terbarukan berupa PLTS untuk mendukung operasional PDAM Tirta Daroy.
2. Penelitian ini dapat menjadi acuan bagi PDAM Tirta Daroy dalam mengurangi biaya operasional.
3. Penelitian ini dapat mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil yang dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan berupa emisi gas rumah kaca (GRK).

1.5 Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penelitian ini hanya membahas mengenai:

1. Penelitian ini fokus pada evaluasi kelayakan investasi PLTS yang digunakan untuk mensuplai kebutuhan energi listrik di PDAM Tirta Daroy.
2. Perhitungan kelayakan investasi pada perencanaan instalasi PLTS atap di PDAM Tirta Daroy hanya berdasarkan parameter dari software *RETScreen*.
3. Fokus penelitian ini terbatas pada penggunaan panel surya Fotovoltaik (PV) sebagai sumber energi utama, tanpa mempertimbangkan teknologi energi terbarukan lainnya seperti turbin angin atau biomassa.
4. Penelitian ini tidak membahas aspek sosial dan kebijakan yang mungkin mempengaruhi implementasi PLTS di PDAM Tirta Daroy, seperti dukungan pemerintah atau penerimaan masyarakat.
5. Analisis yang dilakukan terbatas pada kemampuan dan batasan software *RETScreen Expert 8.0.1.31*, seperti ketiadaan pemantauan waktu nyata (*real-time*), akurasi yang berpotensi dipengaruhi oleh kondisi iradiasi rendah, keterbatasan dalam impor data, serta kebutuhan lisensi berbayar untuk akses fitur profesional.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Surya

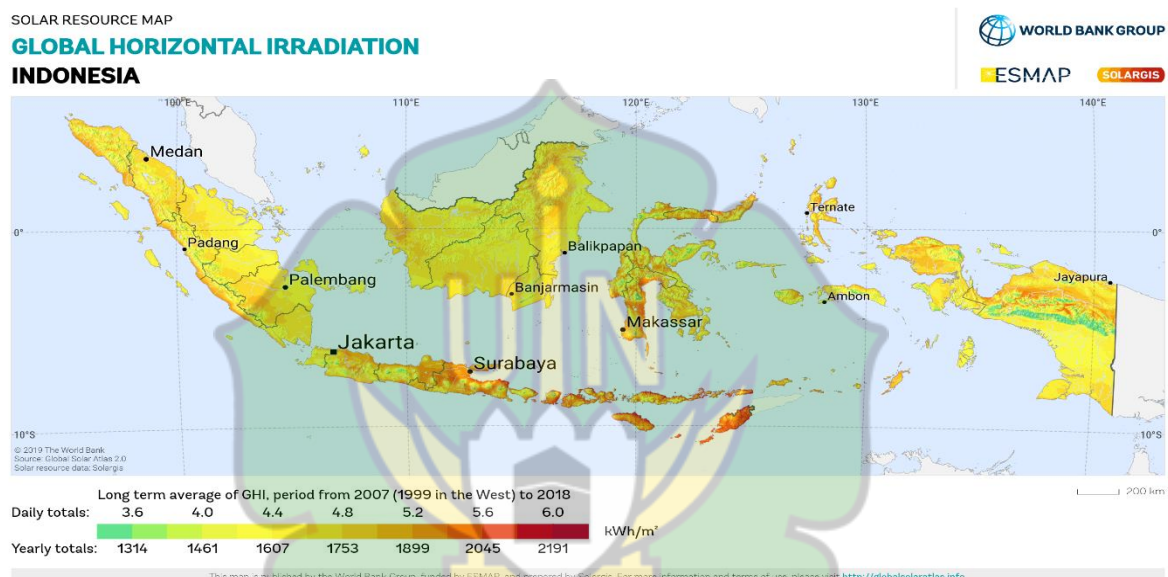
Energi surya merupakan energi yang ramah lingkungan dikarenakan pada saat proses perubahan energi tidak terdapat efek yang dapat menyebabkan kerusakan pada lingkungan. Kelebihan energi matahari ini tersedia setiap waktu dan ketersediaannya tidak akan pernah habis sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi pada teknologi akuakultur. Hal ini dikarenakan lokasi budidaya perairan atau akuakultur biasanya berlokasi di pesisir pantai yang jauh dari permukiman warga sehingga akses energi listrik sangat sulit dijangkau (Perdana, 2024).

Matahari adalah objek hitam dengan suhu permukaan sekitar 5500 °C, di mana berbagai reaksi fusi terjadi, menghasilkan energi dalam jumlah besar. Energi yang dipancarkan oleh matahari sangat besar dan mampu memenuhi kebutuhan manusia berkali-kali lipat, dengan produksi energi surya diperkirakan mencapai $3,86 \times 10^{11}$ MW, dan jumlah energi yang ditangkap oleh bumi setiap tahun mencapai $5,4 \times 10^{24}$ J, setara dengan 4500 kali total energi yang dikonsumsi di seluruh dunia. Energi ini bergerak sejauh sekitar $1,495 \times 10^{11}$ m untuk mencapai bumi dengan energi potensial sebesar 1,37 kW per m². Sinar matahari terdiri dari foton, yaitu partikel kecil yang membawa gelombang elektromagnetik yang dihasilkan dari matahari dan bergerak melalui ruang angkasa. Semua foton yang mencapai sel surya dapat diubah menjadi listrik. Dalam spektrum radiasi matahari terdapat berbagai panjang gelombang yang membentuk distribusi radiasi, namun atmosfer mengikat gelombang spektrum tertentu dan mengatur radiasi yang sampai ke permukaan bumi.

2.2 Potensi Energi Surya

Perubahan iklim sangat berpengaruh terhadap kehidupan, terutama meningkatnya emisi gas rumah kaca yang berdampak pada semakin tercemarnya

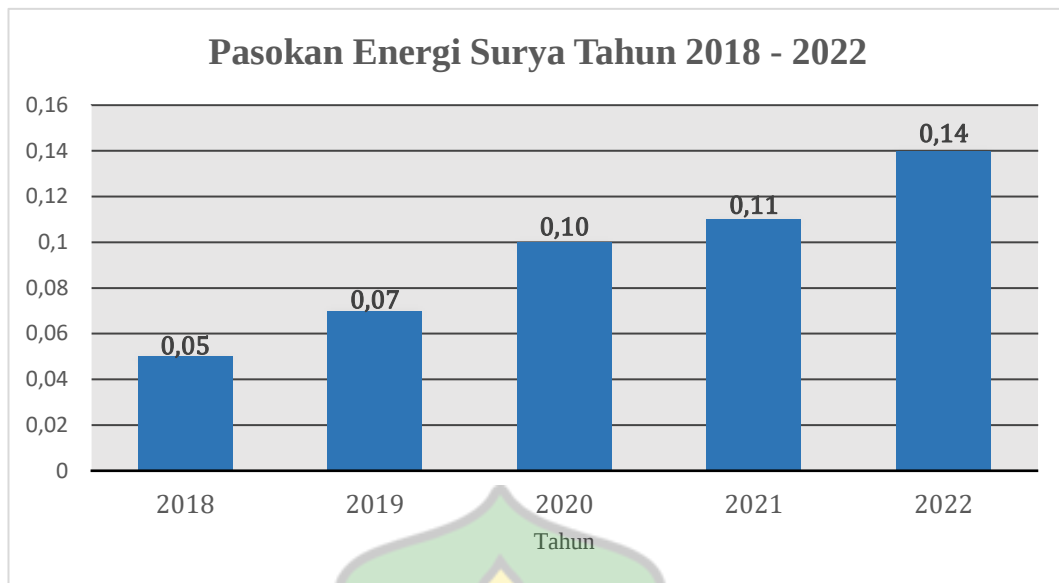
elemen udara, air, dan tanah. Dunia membutuhkan energi bersih untuk mengurangi emisi tersebut yaitu dengan menggunakan sumber energi alternatif berupa energi surya. Banyak negara maju dan berkembang telah mengadopsi energi surya sebagai komponen alami dan penting dari pembangkit listrik untuk memenuhi kebutuhan energi mereka. Kecenderungan ini sangat penting untuk kemakmuran *social-ekonomi*, perusahaan, masyarakat, bangsa, dan negara serta untuk keamanan dan kemandirian energi untuk semua orang (Kharisma et al., 2024).



Gambar 2.1 Sebaran Iradiasi Horizontal Energi Surya di Indonesia

(Sumber : Global Atlas Solar, 2025)

Pemanfaatan energi matahari menjadi energi listrik dapat menggunakan bantuan sel surya. Penggunaan sel surya sangat cocok diaplikasikan di Indonesia, dikarenakan Indonesia berlokasi dikawasan khatulistiwa yang mempunyai iklim tropis. Indonesia memiliki letak geografis yang strategis, sehingga Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki potensi untuk dikembangkan diseluruh daerah dengan daya rata-rata mencapai 4 kWh/m^2 (Perdana, 2024). Berdasarkan data yang dikumpulkan dari 18 lokasi di Tanah Air, sebaran radiasi matahari memiliki sedikit perbedaan pada wilayah barat dan timur. Diperkirakan sebaran radiasi matahari untuk Wilayah Barat sebesar $4,5 \text{ kWh/m}^2$ /hari dan untuk Wilayah Timur sebesar $5,1 \text{ kWh/m}^2$ /hari dengan variasi berkisar 9-10% (Afif & Martin, 2022).



Gambar 2.2 Pasokan Energi Surya Tahun 2018 - 2022

Berdasarkan Gambar 2.2 dapat dijelaskan bahwa produksi energi surya sejak tahun 2018 hingga tahun 2022 mengalami kenaikan, meskipun tidak signifikan. Indonesia diantara negara Asia Tenggara menduduki peringkat ketiga sebagai negara yang paling banyak menghasilkan sumber energi terbarukan. (Kharisma et al., 2024).

Fathoni et al. (2014), menghitung nilai rata-rata radiasi energi surya dari berbagai daerah di Indonesia. Menggunakan data rata-rata dari 1985-2005 seperti pada tabel 2.1 NASA *Surface Meteorology and Solar Energy* (SSE). Dari data yang diberikan dapat dilihat bahwa kota makassar memiliki potensi radiasi matahari tertinggi yaitu $5,88 \text{ kWh/m}^2 / \text{hari}$. Sedangkan kota medan memiliki yang terendah sebesar $4,55 \text{ kWh /m}^2 / \text{hari}$. Oleh karena itu, Secara teoritis Indonesia memiliki potensi yang baik untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga surya dengan radiasi harian rata-rata di atas $4 \text{ kWh /m}^2 / \text{hari}$ pertahun (Afif & Martin, 2022).

Provinsi	Lokasi Pengukuran	Radiasi ($\text{kWh/m}^2/\text{hari}$)
Aceh	Banda Aceh	5,1
Sumatera Utara	Medan	4,55

Sumatera Barat	Padang	4,91
Riau	Dumai	4,71
Sumatera Selatan	Palembang	4,67
Bengkulu	Bengkulu	4,79
Kalimantan Barat	Pontianak	5,12
Kalimantan Selatan	Banjarmasin	5,07
Kalimantan Tengah	Palangkaraya	4,87
Kalimantan Timur	Bontang	4,78
Gorontalo	Gorontalo	5,14
Sulawesi Selatan	Makassar	5,88
Bali	Denpasar	5,34

Tabel 2.1 Radiasi harian rata - rata pada beberapa lokasi di Indonesia

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya atau PLTS adalah sebuah sistem konversi untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip efek *photovoltaic*. *Photovoltaic* sendiri merupakan fenomena fisika yang terjadi pada permukaan sel surya (*solar cell*) ketika menerima cahaya matahari. Selanjutnya, cahaya yang diterima diubah menjadi energi listrik. Hal ini disebabkan karena adanya energi foton cahaya yang membebaskan elektron – elektron sehingga mengalir dalam sambungan semikonduktor tipe n dan p yang pada akhirnya menimbulkan arus listrik.

Penggunaan PLTS sebagai salah satu sumber energi ini sejalan dengan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) tahun 2021 – 2030 di mana rencana pemerintah untuk mendorong kecukupan tenaga listrik dengan program 35 GW serta kebijakan pengembangan Energi Baru Terbarukan

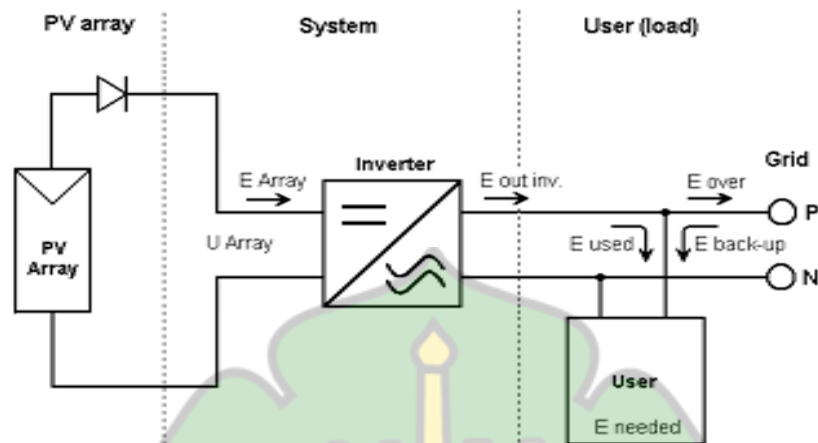
(EBT). Selanjutnya, jenis PLTS yang saat ini berkembang yaitu PLTS di atap bangunan (*PLTS Rooftop*). Untuk pemanfaatan *PLTS Rooftop* ini diatur melalui Peraturan Menteri ESDM No. 49 Tahun 2019 tentang Pemanfaatan Sumber Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik, Mendorong penggunaan PLTS Rooftop sebagai upaya meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada energi fosil, sebagaimana telah diubah melalui Peraturan Menteri ESDM No.13 Tahun 2019 tentang penyediaan dan pemanfaatan energi terbarukan untuk penyediaan tenaga listrik, Peraturan ini bertujuan untuk mendorong pemanfaatan energi terbarukan dalam penyediaan tenaga listrik, meningkatkan kontribusi energi terbarukan dalam bauran energi nasional, dan mendukung ketahanan energi. Dengan adanya peraturan tersebut, implementasi PLTS Rooftop mampu mendukung pencapaian target pemanfaatan EBT sekitar 23 % pada tahun 2025. Sebagaimana dipaparkan dalam Blue Print Pengelolaan Energi Nasional (BPPPEN), kapasitas PLTS ditargetkan sebesar 400 MW pada tahun 2024 (Ketut Sugirianta et al., 2016). Sedangkan, berdasarkan situs web milik Kementerian ESDM menyatakan bahwa PLTS atap dapat beroperasi dengan kurun waktu 20 – 30 tahun tergantung pada jenis modul surya yang dipakai dengan hanya perlu penggantian inverter sebanyak 1 kali pada masa tersebut (Nurjaman & Purnama, 2022).

2.4 Jenis - jenis sistem PLTS

2.4.1 PLTS On – Grid

PLTS dengan konfigurasi *On Grid* dimaksudkan untuk lokasi sudah berlistrik dan sistem di lokasi memiliki periode operasi siang hari. Disebut *On Grid* karena PLTS dihubungkan (*tied*) pada sistem eksisting. Tujuan dari pembangunan PLTS adalah untuk mengurangi konsumsi BBM. Sistem *On Grid* terdiri dari modul fotovoltaik (PV) surya dan pengisi daya. Pada beberapa kasus, sistem ini dilengkapi generator diesel tambahan sebagai cadangan, tergantung pada karakteristik dan pola penggunaan bebannya. Pada siang hari, modul PV surya dalam sistem ini menghasilkan arus listrik yang langsung digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban. Sebagian arus tersebut juga dialirkan untuk mengisi daya baterai, yang

kemudian dapat dimanfaatkan untuk menambah beban pada malam hari. Pengontrol pengisian daya berfungsi mengatur aliran arus saat pengisian baterai maupun penggunaannya (Kumar et al., 2017). Skema diagram blok sistem PV *On Grid* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Diagram blok sistem PV *On Grid*

PLTS tipe *On Grid* tidak dilengkapi baterai. Agar PLTS tidak mempengaruhi stabilitas sistem induknya, maka kapasitasnya dibatasi maksimum sebesar 20% dari beban rata-rata siang hari. Inverter untuk PLTS *On Grid* disebut juga *On Grid* Inverter. Jenis ini memiliki kemampuan melepaskan hubungan (*islanding system*) saat grid kehilangan tegangan. Gambar 2.4 adalah skema suatu PLTS *On Grid* (Sianipar, 2017).

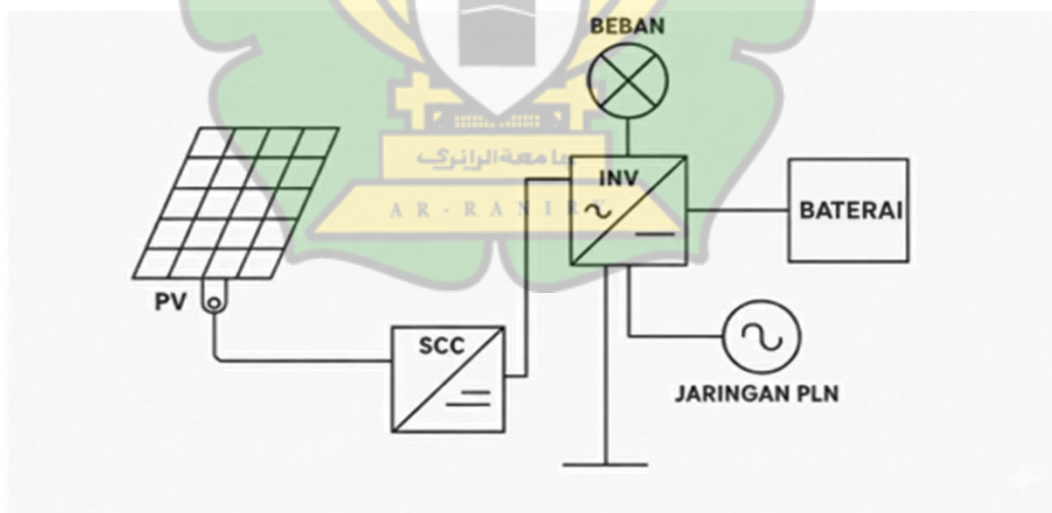


Gambar 2.4 Ilustrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Jenis *On-Grid*
(Sumber: Sunergi.com, 2025)

2.4.2 PLTS *Off Grid*

PLTS *Off Grid* sering disebut juga PLTS *Stand Alone* artinya sistem hanya disuplai oleh panel surya saja tanpa ada pembangkit jenis lain misalnya PLTD. Sistem tipe ini hanya tergantung pada matahari seutuhnya. Karena panel tidak mungkin mendapatkan sinar matahari terus menerus terutama malam hari, maka sistem ini membutuhkan media penyimpan yaitu baterai (Sianipar, 2017).

Sistem *Off Grid*, yang juga dikenal sebagai sistem mandiri atau jaringan mini, mampu menghasilkan energi dan mengoperasikan peralatan secara independen. Sistem ini sangat sesuai untuk elektrifikasi komunitas kecil. Sistem *Off Grid* menjadi pilihan yang tepat untuk daerah terpencil di negara-negara yang memiliki akses listrik yang terbatas atau tidak ada sama sekali, terutama di wilayah dengan populasi yang beragam dan tersebar luas. Sistem *Off Grid* menyediakan dukungan yang cukup untuk memenuhi kebutuhan hidup tanpa bergantung pada jaringan atau sistem lain. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik dalam sistem *Off Grid* perlu disimpan, karena kebutuhan beban dapat bervariasi dari output panel surya (Khamisani' & A., 2018).



Gambar 2.5 Diagram blok sistem PV *Off Grid*

Sistem PLTS *Off Grid* sangat bergantung pada intensitas sinar matahari untuk mengisi daya baterai. Ketika tidak ada sinar matahari, proses pengisian daya berhenti, dan kebutuhan listrik akan dipenuhi dari energi yang telah tersimpan dalam baterai. Jika energi dalam baterai habis, maka pasokan listrik ke beban akan

terputus. Oleh karena itu, menjaga kontinuitas pasokan listrik dari PLTS *Off Grid* menjadi hal yang sangat krusial.

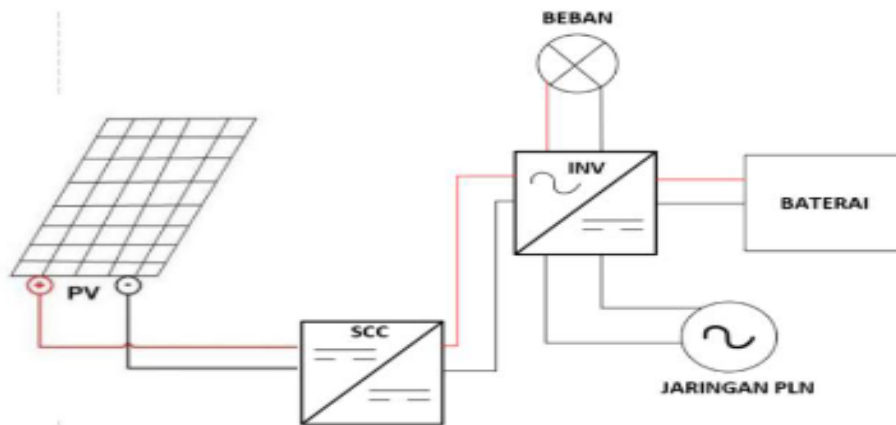
Dalam sistem *Off Grid*, perencanaan kapasitas baterai harus mempertimbangkan cadangan energi, khususnya saat terjadi cuaca buruk yang mengurangi produksi energi surya. Kementerian ESDM merekomendasikan penggunaan baterai dengan kapasitas cadangan minimal untuk tiga hari sebagai standar. Namun, hal ini menyebabkan meningkatnya kebutuhan investasi pada baterai. Maka dari itu, diperlukan penelitian untuk mengoptimalkan kapasitas PLTS *Off Grid* baik dari sisi pembangkit maupun dari sisi penggunaan energi (Syafii et al., 2020).



Gambar 2.6 Ilustrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Jenis *Off Grid*
(Sumber: learnsolarblog.com, 2025)

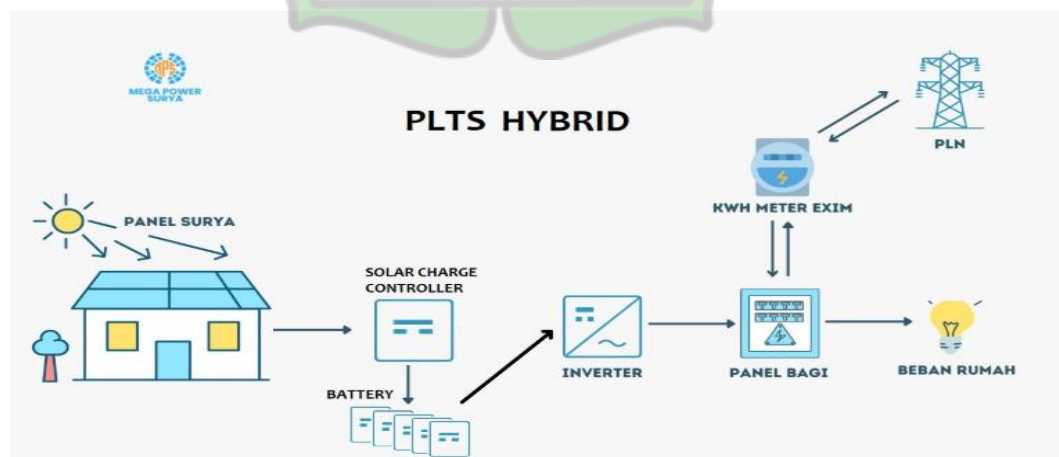
2.4.3 PLTS Hybrid

Sistem pembangkit hibrid, atau lebih dikenal PLTH (Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid) merupakan kombinasi dari dua sumber energi yang digunakan untuk menyediakan daya bagi beban. Dengan kata lain, sistem ini dirancang untuk menghasilkan energi dengan memanfaatkan dua jenis sumber yang berbeda. Pembangkit hibrid menawarkan tingkat keandalan yang tinggi, efisiensi yang optimal, serta ramah lingkungan dengan biaya operasional yang rendah (Rusydi et al., 2024).



Gambar 2.7 Diagram blok sistem PV Hybrid

Selain itu, PLTS Hibrid juga dapat didefinisikan sebagai kombinasi antara sistem penyediaan energi yang menggunakan panel surya, jaringan listrik PLN, dan *generator set* (genset). Dengan demikian, PLTS Hybrid mengatasi semua kelemahan yang ada pada sistem *On Grid* dan *Off Grid*, sekaligus menggabungkan keunggulan dari kedua sistem tersebut. Sistem on-grid terhubung langsung dengan jaringan listrik PLN, tetapi energi yang dihasilkan oleh panel surya tidak disimpan dalam baterai. Di sisi lain, sistem *Off Grid* tidak terhubung dengan PLN, namun dapat menyimpan daya yang dihasilkan ke dalam baterai. Keistimewaan dari kedua sistem ini dapat disatukan, dan inilah yang dikenal sebagai PLTS Hybrid (Wahyu Bagus Rahmatulloh & Aris Heri Andriawan, 2024).



Gambar 2.8 Ilustrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Jenis Hybrid

(Sumber : Mega Power Surya.com, 2025)

2.5 Komponen Utama PLTS (Sistem Off Grid)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) tidak menghasilkan daya yang konstan (*non capacity value generation system*) karena outputnya bergantung pada intensitas radiasi matahari yang terus berubah-ubah. Penilaian kinerja PLTS lebih berfokus pada total energi yang dapat diproduksi, bukan pada nilai daya puncak, kecuali pada sistem yang dilengkapi dengan penyimpanan energi (*storage system*).

Penentuan kapasitas PLTS lebih difokuskan pada berapa besar kebutuhan energi beban dalam jangka waktu tertentu. Perhitungan ini dilakukan dengan melihat konsumsi energi rata-rata di suatu lokasi selama periode tersebut. Komponen-komponen utama dalam PLTS, seperti panel surya, baterai, dan inverter dirancang sesuai dengan jenis sistem dan kebutuhan desain yang diinginkan. Proses *sizing* atau perhitungan kapasitas tiap komponen dalam sistem PLTS sangat krusial. Jika kapasitas dirancang terlalu kecil, PLTS tidak akan mampu mencukupi permintaan energi. Sebaliknya, jika dirancang terlalu besar, investasi biaya menjadi sangat tinggi dan kurang efisien (Sianipar, 2017). Adapun beberapa komponen utama dari sistem PLTS *Off Grid* yaitu sebagai berikut :

2.5.1 Panel Surya

Panel surya merupakan perangkat berbasis semikonduktor yang berfungsi mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Proses perubahan ini dikenal sebagai efek fotovoltaiik, yaitu fenomena di mana sel fotovoltaiik menyerap energi cahaya dan mengubahnya menjadi listrik. Efek fotovoltaiik terjadi ketika dua elektroda yang terhubung pada sistem padat atau cair menghasilkan tegangan listrik saat terkena cahaya.

Dalam panel surya, proses konversi energi cahaya menjadi listrik tidak sepenuhnya bergantung pada luas permukaan silikon. Transformasi energi ini berlangsung di dalam komponen semikonduktor yang disebut sel surya. Sel surya merupakan unit dasar yang menghasilkan daya listrik berupa arus dan tegangan. Karena sel surya terbuat dari bahan semikonduktor, maka proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik dilakukan melalui prinsip kerja muatan listrik. Sel surya biasanya terdiri dari dua lapisan semikonduktor: tipe-n yang mengandung elektron berlebih (bermuatan negatif), dan tipe-p yang memiliki kelebihan lubang

(bermuatan positif). Interaksi antara kedua lapisan inilah yang memungkinkan terjadinya pergerakan muatan listrik dan menghasilkan arus listrik (Fajrony et al., 2023).

Panel surya diklasifikasikan berdasarkan jenis material sel surya yang digunakan dalam pembuatannya. Terdapat beragam tipe panel surya yang bisa dimanfaatkan oleh masyarakat (Usman, 2020). Secara umum, tiga jenis panel surya yang paling umum digunakan adalah: 1. Monokristalin 2. Polikristalin 3. *Thin Film*

1. Monokristalin (*Mono-crystalline*)

Sel surya monokristalin merupakan generasi pertama yang terbuat dari batangan kristal silikon yang sangat murni (biasanya silikon kristal (c-Si)). Sel surya ini dikembangkan pada 1950-an sebagai sel surya generasi pertama. Sel surya monokristalin menggunakan kepingan batangan kristal silikon, dengan ketebalan sekitar 0,3 mm yang diiris dari batangan silikon kristal. Produksinya menggunakan proses Czochralski yang ditemukan pada tahun 1916, yaitu metode pertumbuhan kristal untuk mendapatkan kristal tunggal semikonduktor, logam, dan garam dengan aplikasi paling penting dalam pertumbuhan batangan silinder silikon kristal (Rudiyanto et al., 2023).

Sel monokristalin lebih mahal untuk diproduksi dan biasanya memiliki efisiensi yang sedikit lebih tinggi yaitu pada 15-22% daripada sel polikristalin konvensional. Shockley dan Queisser, pada tahun 1961, menghitung efisiensi termodinamika maksimum untuk konversi radiasi tak terkonsentrasi menjadi energi bebas listrik dalam batas radiasi menjadi 31% (Rudiyanto et al., 2023).

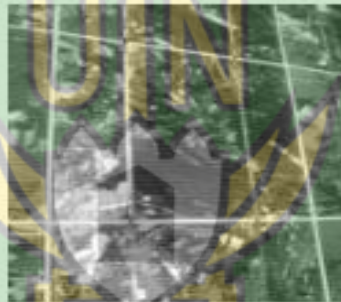


Gambar 2.9 *Monocrystalline Solar Sel*

2. Polikristalin (*poly-crystalline*)

Sel surya polikristalin termasuk dalam jenis kedua dari sel surya generasi pertama dan dibuat dari potongan irisan dari blok silikon. Sel surya ini mengandung banyak kristal silikon yang membuatnya lebih mudah untuk memproduksi wafer dalam cetakan daripada kristal tunggal (monokristalin), sehingga lebih murah. Sel surya polikristalin sedikit kurang efisien daripada monokristalin tetapi telah meningkatkan efisiensi selama beberapa tahun terakhir (Rudiyanto et al., 2023).

Panel polikristalin diproduksi dengan melebur silikon dalam tungku keramik, lalu didinginkan secara perlahan hingga terbentuk campuran kristal di permukaannya. Dibandingkan monokristalin, panel ini sedikit kurang efisien berkisar antara 13% hingga 20% namun keunggulannya ada pada biaya produksi yang lebih rendah (Armansyah et al., 2024).



Gambar 2.10 *Polycrystalline* Solar Sel

3. *Thin Film*

Jenis sel surya ini dibuat dengan menambahkan satu atau beberapa lapisan tipis material penyerap cahaya ke permukaan dasar. Karena lapisannya sangat tipis, panel ini jadi ringan dan fleksibel. Teknologi thin film masih tergolong baru, sehingga masih banyak potensi untuk dikembangkan di masa depan. Biaya produksinya pun cukup murah. Karena bentuknya yang tipis, ringan, dan bisa menyesuaikan permukaan, panel ini cocok ditempel di berbagai media seperti kaca, dinding bangunan, atap rumah, bahkan mungkin suatu saat bisa disematkan pada bahan seperti kaos (Armansyah et al., 2024).



Gambar 2.11 *Thin film Solar Sel*

2.5.2 *Solar Charge Controller (SCC)*

Solar charge controller adalah peralatan elektronik yang digunakan untuk mengatur arus searah yang diisi ke baterai dan diambil dari baterai ke beban. Solar charge controller mengatur overcharging (kelebihan pengisian karena baterai sudah penuh) dan kelebihan voltase dari panel surya/solar cell (Hasanah, 2021).



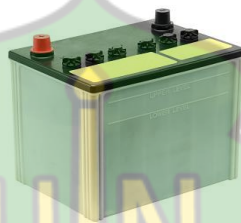
Gambar 2.12 *Solar Charge Controller*

(Sumber : Kenika.com, 2025)

Fungsi utama dari pengendali muatan dalam sistem Fotovoltaik (PV) adalah mengatur tegangan dan arus dari panel surya (PV) ke dalam baterai yang dapat diisi ulang. Fungsi minimum dari pengendali muatan (PV) adalah memutuskan sambungan array ketika baterai sudah terisi penuh dan menjaga baterai tetap terisi penuh tanpa kerusakan. Pengendali muatan penting untuk mencegah pengisian berlebih pada baterai, pengosongan berlebihan, aliran arus terbalik di malam hari, dan untuk melindungi umur baterai dalam sistem (PV). Sirkuit elektronika daya digunakan dalam pengendali muatan (PV) untuk mendapatkan efisiensi, ketersediaan, dan keandalan tertinggi (Ratnani & Joshi, 2021).

2.5.3 Baterai

Baterai adalah elemen penting untuk mengatur sistem tenaga panel surya. Baterai listrik adalah satu atau lebih sel elektrokimia yang mengubah energi kimia yang tersimpan menjadi energi listrik. Untuk fasilitas pengisian dan pembongkaran, baterai sekunder sangat banyak digunakan untuk sistem tenaga panel surya. Kapasitas yang tersedia dari sebuah baterai tergantung pada laju di mana ia dibongkar. Jika sebuah baterai dibongkar dengan laju yang relatif tinggi, kapasitas yang tersedia akan lebih rendah dari yang diharapkan (Ratnani & Joshi, 2021).



Gambar 2.13 Baterai
(Sumber : Atonergi.com, 2025)

Umur baterai dapat diperpanjang dengan menyimpan muatan baterai, seperti pada pengendalian muatan penutup baterai yang memperlambat reaksi kimia di dalam baterai. Penyimpanan semacam ini dapat memperpanjang umur baterai jenis ini sekitar 5%. Untuk mencapai tegangan maksimum, baterai harus dihentikan untuk menyimpan muatan. Sebagai hasilnya, karena kelemahan dan proses peningkatan umur dari jenis baterai ini seperti baterai timbal-asam, jika kita menggunakan SCC dengan benar maka umur baterai dapat diperpanjang. Pada dasarnya di sini dikendalikan bahwa laju pengisian baterai dijaga normal, tidak cepat atau lambat. Batas pembongkaran tidak akan turun di bawah 50%. Mikrokontroler dapat mendeteksi sesuai program kapan diperlukan untuk memberikan muatan dan kapan pada hampir penuh terisi perlu memutus sambungan dari panel surya. Untuk operasi lebih lanjut, SCC yang diusulkan ini dapat mengontrol pergerakan beban sesuai dengan muatan dan pembongkaran dari baterai.

2.5.4 Inverter

Inverter adalah perangkat elektronik daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Umumnya, inverter mengubah tegangan DC 12–24 volt dari sumber seperti baterai atau panel surya menjadi tegangan AC 220 volt yang dapat digunakan untuk peralatan listrik rumah tangga (Usman, 2020).



Gambar 2.14 Inverter

(Sumber : Hmenergi.com,2025)

Karakteristik listrik dari modul surya biasanya digambarkan melalui hubungan antara arus dan tegangan, yang dikenal dengan kurva I-V. Panel surya sendiri menghasilkan tegangan DC sebagai output. Besarnya daya input pada panel surya ditentukan oleh intensitas cahaya matahari (dalam satuan W/m^2) serta luas permukaan panel (m^2). Untuk menghitung daya input dari panel surya, digunakan rumus berdasarkan persamaan berikut :

$$P_{\text{in}} = I \times A \dots\dots\dots(1)$$

Dengan :

P_{in} = Daya yang masuk panel surya (W)

I = intensitas cahaya matahari (W/m^2)

A = Luas Penampang Panel Surya (m^2)

Ketika sebuah modul surya mengalami hubungan singkat ($V_{\text{modul}} = 0$), maka arus maksimum yang mengalir disebut arus hubung singkat (I_{sc}). Sebaliknya, saat rangkaian dalam kondisi terbuka ($I_{\text{modul}} = 0$), tegangan yang muncul disebut tegangan terbuka (V_{oc}). Besarnya daya yang dihasilkan oleh modul surya merupakan hasil perkalian antara arus dan tegangan yang dihasilkan modul tersebut.

$$P_{out} = V \times I \dots \dots \dots (2)$$

dengan :

- P_{out} = Daya keluaran modul (Watt)
 V = Tegangan kerja modul (Volt)
 I = Arus kerja modul (Ampere)

2.5.5 Kabel

Kabel berfungsi sebagai media penghantar arus listrik yang digunakan untuk menyalurkan daya dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Pemilihan jenis dan ukuran kabel pada instalasi listrik ditentukan berdasarkan nilai KHA (Kuat Hantar Arus) (Febriana Pratiwi et al., 2022). Perhitungan nilai KHA berdasarkan PUIL 2011 ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$KHA = 1 \times 125\% \dots \dots \dots (3)$$

Nilai arus (I) yang mengalir dalam kabel harus diperhitungkan dengan mempertimbangkan faktor keamanan sebesar 125%. Selain itu, penurunan tegangan (voltage drop) pada kabel tidak boleh melebihi batas maksimal 5%. Besarnya arus ini dapat dihitung menggunakan rumus matematis sebagai berikut:

$$\%V_{dc} = \frac{V_{dc}}{V} \times 100\% \dots \dots \dots (4)$$

Dimana :

- V_{dc} = Tegangan DC sistem (misalnya keluaran dari panel surya)
 V = Tegangan referensi (bisa V maksimum, V nominal sistem, atau batas toleransi)
 V_{dc} = Persentase tegangan DC terhadap referensinya

2.6 Perhitungan Teknis PLTS

Terkait dengan berbagai parameter dalam sistem PLTS, proses perhitungannya dapat dijelaskan melalui sejumlah rumus atau persamaan berikut ini:

2.6.1 Menentukan Kapasitas Sistem Pembangkit

Kapasitas dari pembangkit bisa dihitung melalui perhitungan daya puncak sistem. Perhitungan daya puncak sistem dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$P_{peak} = \frac{E_{el} \cdot I_{STC}}{E_{glob} \cdot Q} \dots \dots \dots (5)$$

Dimana :

- Q = faktor kualitas sistem
- E_{el} = Energi keluaran listrik riil dari sistem tersebut [kWh]
- E_{glob} = Radiasi global dipermukaan horizontal (kWh/m²)
- I_{STC} = Intensitas radiasi pada kondisi STC (1000 W/m²)
- Q = *Quality factor*

2.6.2 Menghitung Jumlah Kebutuhan Modul Surya

Untuk menentukan jumlah modul surya yang harus disediakan, diperlukan data mengenai kapasitas daya puncak sistem serta spesifikasi teknis dari setiap modul surya, khususnya daya keluaran nominalnya. Kapasitas modul surya ini ditetapkan berdasarkan informasi spesifikasi resmi dari produsen yang relevan dengan tipe modul yang akan digunakan (Khan & Natsir, 2025).

$$\text{Jumlah Modul} = \frac{\text{daya puncak sistem PLTS}}{\text{Kapasitas modul}} \dots \dots \dots (6)$$

2.6.3 Menghitung Luas Area Array (PV Area) dan Memilih Modul Surya

Area efektif adalah bagian permukaan tertentu yang disediakan secara khusus untuk instalasi modul surya. Luas dari area ini dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Area (m}^2\text{)} = \frac{\text{daya puncak sistem (Wp)}}{\text{efisiensi module surya (\%)} \times \text{iradiasi matahari (watt/m}^2\text{)}} \dots\dots\dots(7)$$

Dalam merancang sistem PLTS, pemilihan modul surya dengan efisiensi tinggi menjadi faktor strategis yang dapat meningkatkan output daya sekaligus menghemat penggunaan lahan. Hal ini sangat penting terutama pada area atap dengan luas terbatas, sehingga tetap dapat tercapai kapasitas sistem yang optimal.

2.6.4 Menghitung kebutuhan energi harian

Perhitungan kebutuhan beban harian dapat dilakukan melalui dua metode, yaitu berdasarkan daya masing-masing peralatan listrik atau dengan menggunakan data dari pencatatan kWh meter. Pendekatan kedua dinilai lebih praktis, terutama untuk bangunan seperti kantor. Metode ini dilakukan dengan mencatat nilai kWh meter pada pagi hari saat matahari mulai muncul, lalu mencatat kembali saat matahari mulai terbenam. Selisih dari kedua catatan tersebut menunjukkan total konsumsi energi listrik yang digunakan selama periode siang hari.

2.6.5 Menentukan kapasitas *Solar Charge Controller*

Untuk menentukan Kapasitas *Charge Controller* dapat ditentukan dengan menggunakan rumus perhitungan sebagai berikut (Rahman, 2021):

$$C_{SCC} = \frac{D_w \times S_f}{V_{mpp}} \dots\dots\dots(8)$$

Dimana :

C_{SCC} = Kapasitas dari *charge controller*

D_w = *Demand* \ watt

S_f = *safety factor* (faktor keamanan) ditentukan sebesar 1,25

2.6.6 Menentukan Kapasitas Inverter

Inverter adalah perangkat elektronika daya yang berfungsi mengonversi arus listrik searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Penentuan kapasitas inverter umumnya disesuaikan dengan kapasitas panel surya (PV) yang terhubung,

yaitu sebesar 1,25 kali dari total kapasitas (PV). Untuk menghitung kapasitas inverter, digunakan rumus sebagai berikut:

$$Capacity\ Inverter = Daya\ puncak \times Safety\ Factor \dots\dots\dots(9)$$

2.6.7 Menentukan Kapasitas Baterai

Untuk menentukan kapasitas baterai, dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Rahman, 2021):

$$C = \frac{D_N \times E_{day}}{V_s \times DOD \times \eta_{ef}} \dots\dots\dots(10)$$

Dimana :

- C = Kapasitas baterai [Ampere-hour]
- DN = Jumlah hari otonomi [hari] ditentukan dengan 3 hari
- Eday = Konsumsi Energi harian [kWh]
- Vs = Tegangan baterai [Volt]
- DOD = Maksimum pengosongan baterai [%]

2.7 Metode Kelayakan Investasi

2.7.1 Metode Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) adalah metode untuk mengetahui seberapa menguntungkan suatu proyek atau investasi. NPV dihitung dari selisih antara total nilai sekarang dari pemasukan dan pengeluaran dalam periode tertentu. Jika hasil perhitungan NPV bernilai positif, berarti proyek atau investasi tersebut diperkirakan akan memberikan keuntungan, karena pendapatan yang dihasilkan lebih besar dibandingkan biaya yang dikeluarkan (Febriana Pratiwi et al., 2022). Penilaian kelayakan suatu investasi dapat dilakukan dengan menggunakan metode Net Present Value (NPV), yang dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut (Rafli et al., 2022):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1-i)^t} - II \dots\dots\dots(11)$$

Dimana :

- NCF_t : jumlah aliran kas bersih tahun ke-1 s/d ke-n
 II : *initial investment* (investasi awal)
 i : *interest* (tingkat suku bunga)
 n : *lifetime* (umur proyek)

Kriteria pengambilan keputusan dengan metode ini apakah proyek layak diwujudkan atau tidak ialah sebagai berikut:

- $NPV > 0$ artinya investasi akan menguntungkan/layak (feasible)
- $NPV < 0$ artinya investasi tidak menguntungkan/tidak layak (unfeasible).

2.7.2 Metode Internal Rate of Return (IRR)

Internal Rate of Return (IRR) diartikan sebagai tingkat suku bunga yang menyetarakan nilai kini dari investasi awal dengan nilai bersih arus kas yang diharapkan selama masa operasional proyek. Dalam praktiknya, evaluasi kelayakan IRR biasanya dibandingkan dengan suku bunga pinjaman bank yang berlaku atau suku bunga deposito, tergantung pada apakah proyek didanai melalui pinjaman atau modal sendiri. Perhitungan IRR secara manual umumnya bersifat kompleks, karena memerlukan pendekatan iteratif atau metode coba-coba. Namun, apabila dua nilai NPV telah diketahui, IRR dapat dihitung melalui rumus berikut: (Nashar, 2015).

$$IRR = i_1 + \frac{NPV}{(NPV_1 - NPV_2)} (i_2 - i_1) \dots \dots \dots (12)$$

di mana : NPV_1 harus di atas 0 ($NPV_1 > 0$)

NPV_2 harus di bawah 0 ($NPV_2 < 0$)

2.7.3 Metode Break Even Point (BEP)

Break Even Point (BEP) merupakan keadaan impas yaitu jika keuntungan atau kerugian untuk periode tertentu telah dihitung perusahaan tidak mendapatkan untung dan tidak pula mengalami kerugian. Dengan kata lain metode ini digunakan untuk mengetahui lama jangka waktu sebuah proyek mengembalikan modal investasi awal, hal ini jika semakin cepat sebuah proyek mengembalikan modal

investasi maka akan semakin kecil resikonya, begitu pula sebaliknya (Ilman Kamil et al., 2024). *Break even point* dapat dihitung dengan persamaan berikut :

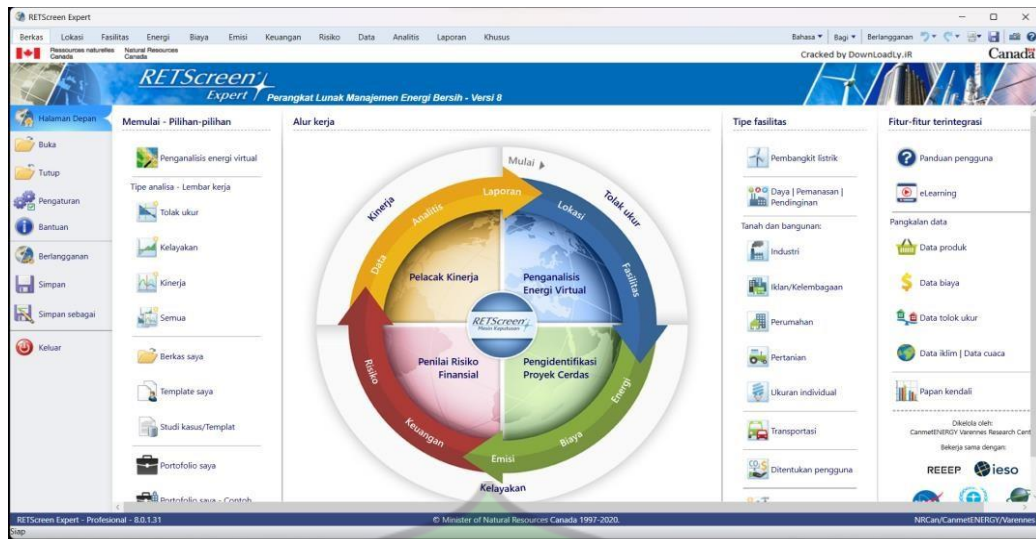
$$\text{payback period} = \frac{\text{investment}}{\text{cash inflow}} \dots \dots \dots (13)$$

2.8 **Software RETScreen**

2.8.1 Pengenalan Software RETScreen

RETScreen International merupakan perangkat lunak yang dirancang untuk mendukung proses analisis studi pra-kelayakan dan kelayakan dalam pengembangan proyek-proyek energi bersih. Perangkat ini mengadopsi pendekatan lima tahap analisis proyek yang mengacu pada standar internasional, sehingga dapat memberikan panduan komprehensif bagi para pemangku kepentingan, terutama calon investor, dalam pengambilan keputusan strategis sebelum pelaksanaan proyek.

RETScreen yang didesain oleh *RETScreen International Canada*, menyediakan fitur evaluasi kelayakan untuk berbagai jenis teknologi energi terbarukan, seperti pembangkit listrik tenaga angin, pembangkit listrik tenaga air skala kecil, sistem fotovoltaik (energi surya), *cogeneration* (pembangkitan panas dan listrik secara simultan), biomassa, sistem pemanas udara dan air berbasis tenaga surya, desain bangunan pasif untuk pengaturan suhu, serta pompa panas berbasis energi geotermal. *Output* yang dihasilkan dari *RETScreen* meliputi estimasi kapasitas energi, potensi pengurangan emisi gas rumah kaca, evaluasi finansial, analisis sensitivitas, dan penilaian risiko, yang secara keseluruhan memberikan gambaran menyeluruh terhadap kelayakan teknis dan ekonomi suatu proyek energi terbarukan (Amin et al., 2016).



Gambar 2.15 Tampilan Awal *RETScreen*

2.8.2 Tahap – Tahap Simulasi *RETScreen*

Untuk menghasilkan penilaian kelayakan menggunakan perangkat lunak *RETScreen*, adapun tahap-tahap yang harus diikuti sebagai berikut:

- Memulai Proyek dan Menentukan Fasilitas.
- Pemodelan Energi (*Energy Model*).
- Analisis Biaya (*Cost Analysis*).
- Analisis Finansial (*Financial Analysis*).
- Analisis Lingkungan dan Resiko (*optional*)
- Laporan (*Report*).
- Pengembangan sistem pembangkit energi yang layak untuk memenuhi tujuan yang diusulkan, yaitu pembangkit listrik fotovoltaik (PV) untuk memenuhi permintaan tertentu.
- Mengukur hasil laporan yang dikembangkan oleh perangkat lunak dan bandingkan.

Setelah perangkat lunak dijalankan, langkah-langkah untuk pengembangan hasil harus dipenuhi. Setiap tahapan akan dilakukan sesuai dengan karakteristik yang diperoleh melalui studi, seperti lokasi pabrik yang dituju, jenis sumber yang dituju, permintaan yang akan dipasok, dll. Pada tahap proses ini, penting untuk

memiliki pengetahuan yang telah diperoleh tentang kota tempat proposal tersebut dimaksudkan untuk dikembangkan, serta kondisi pembangkitan dan permintaan yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan populasi yang menjadi fokus studi.

Data awal ini akan menjadi dasar untuk memasukkan persyaratan *RETScreen* dan setelah memproses informasi, perangkat lunak akan memberikan hasil untuk melakukan analisis kritis terhadap proposal dan kelayakannya. Setiap langkah untuk memasukkan informasi ke dalam perangkat lunak *RETScreen* akan dilakukan sesuai dengan tahapan proses simulasi *RETScreen* pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Tahapan Proses Simulasi *RETScreen*



2.9 Penelitian Terdahulu

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Judul	Hasil
1.	Monib Ahmad dkk, 2023	Techno-economic feasibility analyses of grid- connected solar photovoltaic power plants for small scale industries of Punjab, Pakistan	Analisis tekno-ekonomi komparatif proyek fotovoltaik surya (PV) yang terhubung ke jaringan di empat lokasi fasilitas di Punjab, Pakistan, mengungkapkan bahwa Sargodha adalah lokasi yang paling layak, menunjukkan faktor kapasitas tertinggi 17,8%, tingkat pengembalian internal 14,9%, periode pengembalian 7,7 tahun, dan biaya listrik tingkat terendah pada 8,5 ¢/kWh. Penelitian menunjukkan bahwa pelaksanaan proyek PV surya di sektor UKM manufaktur dapat menambah 13.469 MW kapasitas PV untuk memenuhi konsumsi energi tahunan industri sebesar 20.446,21 GWh, sementara juga secara signifikan mengurangi emisi gas rumah kaca sekitar 90,17.581 ton CO₂ per tahun

2.	Renaldy Rahman, 2021	Analisis Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off grid Untuk Rumah Tinggal Di Kota Banjarbaru	Penelitian tersebut menetapkan bahwa total kebutuhan energi harian untuk rumah tipe 45 di Banjarbaru adalah 8.108 W, yang dihitung melalui pengukuran langsung konsumsi daya perangkat elektronik di rumah. Data ini sangat penting untuk merancang sistem tenaga surya off-grid yang tepat. Analisis menyimpulkan bahwa untuk memenuhi kebutuhan energi, sistem panel surya yang terdiri dari delapan panel Monocrystalline, masing-masing diberi peringkat 300 Wp, diperlukan. Biaya investasi awal untuk sistem ini diperkirakan sebesar Rp. 139.862.500, dengan biaya pemeliharaan tahunan sebesar Rp. 13.986.250 selama periode 25 tahun, memberikan pemahaman yang komprehensif tentang implikasi keuangan dari penerapan sistem tenaga surya.
3.	Hendry Timotiyas Paradongan dkk, 2024	Techno-economic feasibility study of solar photovoltaic power plant using <i>RETScreen</i> to achieve Indonesia energy transition	Studi kelayakan mengungkapkan bahwa, dari perspektif Produsen Tenaga Independen (IPP), tarif energi terbarukan yang baru diterapkan tidak cukup untuk membuat proyek pembangkit listrik tenaga surya 26 MW di Pulau Nias layak secara finansial. Namun, memperkenalkan insentif emisi CO₂ 10 USD/t dapat meningkatkan daya tarik keuangan proyek untuk IPP.

			Sebaliknya, proyek ini terbukti sangat menguntungkan bagi perusahaan listrik milik negara Indonesia (PLN), terutama karena penghematan biaya yang signifikan yang dicapai melalui de-dieselsiasi, yang menghasilkan pengurangan biaya pembangkit rata-rata untuk Pulau Nias.
4.	Muhammad Fadel Ibrahim dkk, 2022	Studi Kelayakan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Penerangan Jalan Umum	Penelitian ini menemukan bahwa Net Present Cost (NPC) penerangan jalan konvensional jauh lebih rendah yaitu Rp. 30.245.473 dibandingkan dengan investasi awal sebesar Rp. 128.341.312 untuk penerangan jalan surya, menunjukkan bahwa penerangan konvensional saat ini lebih layak secara ekonomi. Analisis Break Even Point (BEP) mengungkapkan bahwa sistem penerangan jalan surya belum mencapai titik impas, menunjukkan bahwa, dari perspektif ekonomi, penerangan jalan surya bukanlah pengganti yang layak untuk penerangan jalan umum konvensional di Jalan Pasar Wage Bumiayu saat ini
5.	Samsurizal dkk, 2020	Studi Kelayakan Pemanfaatan Energi Matahari Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Dusun Toalang	Penelitian ini menyimpulkan bahwa PLTS Terpusat dengan sistem Off Grid dapat dibangun di Dusun Toalang, dengan kapasitas 21,84 kWp dan kebutuhan beban harian 55,758 Wh. Panel surya berorientasi ke selatan dengan sudut kemiringan empat derajat.

			Analisis mengungkapkan bahwa suhu udara rata-rata di daerah tersebut berkisar antara 21,0 hingga 35,4 derajat Celcius, dengan tingkat kelembaban rata-rata antara 80% hingga 90%. Iradiasi maksimum yang tercatat adalah 386 kWh/m² pada pukul 11:00 pagi, dan iradiasi efektif mencapai 362 kWh/m² pada saat yang sama, menunjukkan potensi yang kuat untuk pemanfaatan energi matahari
6.	Bahar Diken dan Birol Kayisoğlu, 2022	Feasibility Study of Photovoltaic System that can be Applied to Tekirdağ Namık Kemal University Ziraatbiyotek Building using RETScreen Program	Analisis tata surya 14 kW untuk gedung Ziraatbiyotek mengungkapkan bahwa jika sistem dipasang, sekitar 40% dari kebutuhan listrik tahunan gedung dapat dipenuhi dari energi matahari. Sistem ini dirancang menggunakan 60 panel Surya Astronergy, masing-masing dengan kapasitas daya 240 W, seluas 405 m². Analisis ekonomi menunjukkan dua skenario berbeda untuk periode pengembalian sistem: tanpa dukungan pengurangan emisi, periode pengembalian adalah 10,4 tahun, sedangkan dengan dukungan tahunan sebesar \$142 per tahun untuk pengurangan emisi, periode pengembalian menurun menjadi 9,8 tahun. Selain itu, sistem ini diproyeksikan menghasilkan 20,1 MWh energi, menghasilkan

			pengurangan 9,5 tCO₂ dalam emisi gas rumah kaca. Hasil penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kesesuaian dan kinerja sistem PV menggunakan program <i>RETScreen</i>, dengan mempertimbangkan berbagai faktor seperti posisi panel, sudut kemiringan, naungan, dan jenis panel.
7.	Pius Aditya Kurnia Ray dkk, 2023	Studi Kelayakan Pemasangan PLTS 80 KW pada Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Kendaraan Terminal	Dengan jumlah komponen 195 pcs panel surya, 23 baterai, 4 inverter, dan 9 Solar Charge Controller (SCC), dapat dihitung 3 alternatif investasi. Dari semua alternatif investasi yang diberikan, alternatif investasi yang paling disarankan adalah alternatif investasi tanpa pinjaman bank, karena pada alternatif ini NPV bernilai positif sebesar Rp 81.346.406,00. Hal ini berarti alternatif investasi ini pada akhir periode investasinya dapat menghasilkan keuntungan sebesar Rp 81.346.406,00. Didukung dengan nilai IRR yang positif 0.58% menguatkan bahwa alternatif investasi ini layak dijalankan. Diketahui proyek akan mengalami balik modal pada awal tahun ke 23. penelitian ini menggunakan <i>software RETScreen</i> dan merencanakan penggunaan 195 buah panel surya untuk diterapkan, dengan energi yang dihasilkan 89.83 MWh per tahun dan penghematan sebesar Rp

			110.051.317,00. Metode ekonomi Teknik diterapkan untuk mendapatkan kelayakan dari investasi ini. Pada analisa ekonomi yang dilakukan didapatkan alternatif investasi terbaik dengan nilai NPV Rp 81.346.406,00, nilai IRR sebesar 0,54%. Sehingga proyek ini layak untuk dijalankan.
8.	Min-Ock Kim dkk, 2013	Economic Analysis for a Tidal Power Plant Project using <i>RETScreen</i> - Focused on the Tidal Power Plant in Asan Bay	Analisis kelayakan ekonomi proyek pembangkit listrik pasang surut di Teluk Asan, Korea, menunjukkan bahwa proyek tersebut memiliki kelayakan ekonomi yang cukup, seperti yang ditunjukkan oleh hasil yang diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak <i>RETScreen</i>. Kelayakan proyek pembangkit listrik pasang surut dipengaruhi secara positif oleh kenaikan harga pengurangan emisi bersertifikat dan unit listrik, menunjukkan bahwa prospek ekonomi proyek membaik dengan kondisi pasar yang menguntungkan.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menerapkan pendekatan deskriptif kuantitatif. Tahapan utama dalam metode ini melibatkan dua aktivitas inti, yaitu perhitungan numerik terhadap data yang terkumpul dan simulasi praktik langsung untuk memodelkan suatu kondisi nyata. Simulasi tersebut dijalankan dengan memanfaatkan perangkat lunak *RETScreen*, di mana berbagai data pendukung dimasukkan sebagai parameter *input*. Data-data pendukung ini mencakup data iklim lengkap yang diambil dari *database internal RETScreen*, data konsumsi listrik bulanan, data harga komponen dan spesifikasi teknis modul surya. Melalui proses simulasi ini, *software RETScreen* kemudian menghasilkan luaran (*output*) berupa estimasi produksi energi, analisis kelayakan finansial, Estimasi pengurangan emisi gas rumah kaca (CO_2) yang dapat dicapai yang selanjutnya menjadi bahan analisis deskriptif dalam penelitian.

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian berlokasi di Gampong Lambaro Kecamatan Ingin Jaya Kabupaten Aceh Besar. Penelitian ini dilaksanakan di Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Tirta Daroy, Dari hasil observasi lokasi yang direncanakan sebagai lokasi Pembangunan PLTS. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada pertimbangan bahwa PDAM Tirta Daroy merupakan instansi yang memiliki kebutuhan energi listrik cukup tinggi untuk mendukung operasionalnya, sehingga relevan untuk dikaji kelayakan instalasi PLTS.



Gambar 3.1 Peta Lokasi Perencanaan Pemasangan PLTS

3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat-alat yang digunakan dalam membantu penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.1

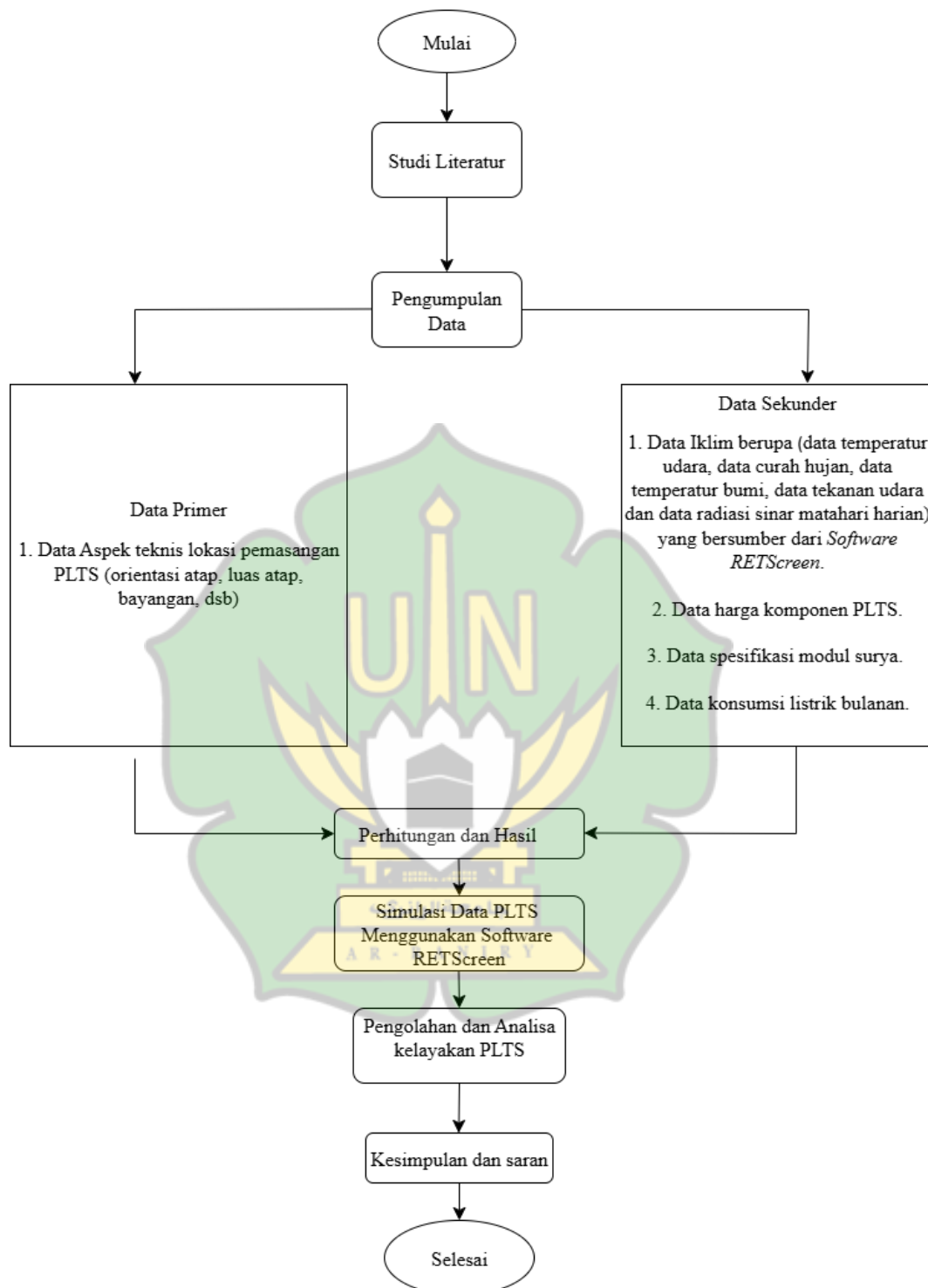
Tabel 3.1 Spesifikasi Alat Penelitian

No.	Nama Alat	Spesifikasi	Fungsi
1.	Laptop	LAPTOP-X455LD, ASUS-NotebookSKU, <i>System Type x64based PC</i> <i>Processor Intel(R) Core(TM)</i> <i>i5-4210U CPU @ 1.70GHz,</i> <i>2401 Mhz, 2 Core(s), 4</i> <i>Logical Processor(s)</i>	Sebagai perangkat keras (hardware) digunakan untuk pengolahan data dan simulasi.

2.	<i>Microsoft word</i>	<i>Microsoft Office Word 2021.</i>	Sebagai perangkat lunak dalam menyusun tugas akhir.
3.	<i>Google Earth</i>	<i>Google Earth pro</i>	Adalah aplikasi bantu untuk mengukur luas atap lokasi perencanaan PLTS.
4.	<i>RETScreen</i>	<i>RETScreen Expert 8.0.1.31</i>	adalah sistem Perangkat Lunak Manajemen Energi Bersih untuk efisiensi energi, energi terbarukan dan analisis kelayakan proyek kogenerasi serta analisis kinerja energi yang sedang berlangsung.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian yang dirancang untuk menyelesaikan penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

3.4.1 Studi literatur

Studi literatur merupakan tahap awal yang dilakukan untuk mencari sumber informasi dari penelitian yang berkaitan seperti jurnal, buku, dokumen dan lainnya.

3.4.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data, adalah tahapan untuk melakukan pengamatan terhadap data objek penelitian yaitu :

1. Data Primer diperoleh melalui observasi lapangan dan pengukuran di lapangan. Melalui observasi lapangan akan didapati data Aspek teknis lokasi instalasi PLTS (orientasi atap, luas atap, bayangan, dsb).

2. Data Sekunder berupa data konsumsi listrik bulanan, data harga komponen PLTS, data spesifikasi modul surya, data iklim berupa (data temperatur udara, data curah hujan, data temperatur bumi, data tekanan udara dan data radiasi sinar matahari harian) yang bersumber dari *Software RETScreen*.

3.4.3 Perhitungan dan Hasil

Perhitungan penghematan biaya konsumsi listrik dalam penelitian ini dilakukan melalui integrasi komprehensif antara parameter teknis PLTS *Off-Grid* dengan analisis finansial menggunakan *software RETScreen Expert*. Pendekatan yang digunakan adalah *life-cycle cost analysis* yang mempertimbangkan seluruh aspek biaya dan manfaat selama masa hidup proyek 25 tahun.

Mekanisme Perhitungan Penghematan dalam *RETScreen*:

1. Perhitungan Produksi Energi Tahunan

$$E_{out} = P_{max} \times G \times eft_{actual}$$

Keterangan:

E_{out} = Produksi energi listrik tahunan yang diekspor ke jaringan (kWh/tahun).

P_{max} = Kapasitas daya terpasang sistem PLTS (kWp). Dalam penelitian ini,

$$P_{max} = 601,2 \text{ kWp} (2.004 \text{ unit} \times 300 \text{ Wp}).$$

G = Total Iradiasi Tahunan dalam satuan *Peak Sun Hours* (PSH) 5,10 kWh/m²/hari $\times$ 365 hari = 1.861,5 jam puncak per tahun.

η_{actual} = Efisiensi aktual sistem atau *Performance Ratio* (PR) sistem secara keseluruhan, Dari data gambar, nilai PR aktualnya adalah 82,5% (atau 0,825 dalam desimal).

2. Perhitungan Penghematan Tahunan

$$Annual Savings = \Sigma [E_{out_monthly} \times Tarif_PLN_monthly] - O\&M_Cost$$

Keterangan:

$E_{out_monthly}$ = Produksi energi bulanan (kWh)

$Tarif_PLN_monthly$ = Tarif listrik PLN bulanan (Rp/kWh)

$O\&M_Cost$ = Biaya operasi dan pemeliharaan tahunan

Parameter Input untuk Perhitungan:

1. Data Teknis PLTS:

- Kapasitas sistem: 100 kWp
- *Technology: Monocrystalline silicon*
- *Inverter efficiency: 97,6 %*
- *System losses: 3% (termasuk soiling, mismatch, wiring)*
- *Degradation rate: 0.5-0.8% per tahun*

2. Data Finansial:

- Tarif listrik PLN: Golongan I4/TM (industri menengah)
- *Project lifetime: 25 tahun*
- *Inflation rate: 2% per tahun*
- *Debt ratio: 0 %*

Proses Perhitungan dalam *RETScreen*:

1. *Worksheet Energy Model*:

- Input data meteorologi dari *database* NASA
- Spesifikasi teknis modul dan inverter
- Konfigurasi sistem dan *losses*
- *Output*: Estimasi produksi energi bulanan/tahunan

2. *Worksheet Cost Analysis*:

- *Capital cost*: Modul, inverter, BOS, instalasi
- *O&M cost*: Pemeliharaan, monitoring, asuransi
- *Fuel cost*: \$0 (karena energi matahari gratis)
- *Output*: *Breakdown* biaya investasi dan operasional

3. *Worksheet Financial Analysis*:

- *Electricity export rate* = Tarif listrik PLN
- Eskalasi tarif listrik: 3-5% per tahun
- *Carbon credit*: *Optional* (jika *applicable*)
- *Output*: *Cash flow projection* dan indikator kelayakan

Indikator Kelayakan Finansial yang Dihasilkan:

1. *Net Present Value* (NPV):

$$NPV = \sum [CF_t \div (1 + r)^t] - Initial Investment$$

Keterangan:

Σ (sigma): Tanda penjumlahan, artinya seluruh nilai arus kas dari periode 1 sampai periode ke-t dijumlahkan.

CF_t (*Cash Flow at time t*) : Arus kas bersih yang diterima pada periode ke-t (tahun ke-t).

r (*discount rate* / tingkat diskonto): Tingkat pengembalian yang diharapkan atau biaya modal (*cost of capital*) yang digunakan untuk mendiskontokan arus kas di masa depan ke nilai saat ini.

t (periode waktu): Urutan waktu (misalnya tahun ke-1, ke-2, dst.).

Initial Investment: Jumlah biaya investasi awal yang dikeluarkan pada saat proyek dimulai.

Kriteria: $NPV > 0$ (proyek layak secara finansial)

2. *Internal Rate of Return* (IRR):

$$IRR = r \text{ dimana } NPV = 0$$

Kriteria: $IRR > \text{discount rate} + \text{margin}$

3. *Payback Period* (PP):

$$PP = \text{Tahun dimana cumulative cash flow} = 0$$

Kriteria: $PP < \text{project lifetime}/2$

4. *Benefit-Cost Ratio* (BCR):

$$BCR = PV \text{ Benefits} \div PV \text{ Costs}$$

Kriteria: $BCR > 1.0$

3.4.4 Simulasi Data PLTS

Simulasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *RETScreen Expert* versi 8.0.1.31. Tahapan simulasi bertujuan untuk memodelkan konfigurasi teknis sistem, memperkirakan produksi energi, menghitung biaya investasi dan operasional, serta mengevaluasi kelayakan finansial dan dampak lingkungan dari proyek yang direncanakan. Data yang dimasukkan dalam setiap lembar kerja (*worksheet*)

disesuaikan dengan karakteristik lokasi penelitian, kebutuhan beban, dan spesifikasi komponen PLTS yang telah ditentukan pada tahap perhitungan teknis.

Adapun tahapan input data yang dilakukan dalam simulasi menggunakan *RETScreen Expert* adalah sebagai berikut:

1. Penentuan Lokasi dan Fasilitas Proyek

Pada tahap ini, data lokasi proyek dimasukkan untuk mengaktifkan *database meteorologi internal RETScreen*, informasi yang diinput meliputi nama lokasi atau koordinat geografis (lintang dan bujur) dari WTP PDAM Tirta Daroy. Data iklim seperti radiasi matahari harian, suhu udara, dan kelembapan akan terisi secara otomatis oleh perangkat Lunak berdasarkan *database NASA*. Selanjutnya pada lembar fasilitas, dipilih jenis proyek sebagai *power plant* dan jenis pembangkit sebagai *photovoltaic*, dengan tingkat analisis analisis yang digunakan adalah *Feasibility Analysis (Level 2)* untuk mendapatkan hasil yang lebih rinci dan akurat.

RETScreen - Lokasi Pelanggan:

Kondisi daerah acuan

Lokasi data iklim: Indonesia - Banda Aceh Lokasi fasilitas: Indonesia

	Unit	Lokasi data iklim	Lokasi fasilitas	Sumber
Garis lintang		5.6	5.5	
Garis bujur		95.3	95.4	
Zona iklim		OA - Luar biasa panas - Lembap		
Ketinggian	m	49	49	NASA
Suhu rancangan pemanasan	°C	23.9		NASA - NASA
Suhu rancangan pendinginan	°C	28.3		NASA
Suhu bumi amplitudo	°C	1.8		NASA

Bulan	Suhu udara °C	Kelembaban relatif %	Curah hujan mm	Radiasi matahari harian - horizontal kWh/m ² /d	Tekanan atmosfer kPa	Laju angin km/jam	Suhu bumi °C	Derajat pemanasan - hari 18 °C	Suhu pendinginan-hari 10 °C
Januari	27.1	80.8%	146.63	5.39	100.5	18.5	28.1	0	530
Februari	27.4	79.0%	95.48	5.75	100.4	15.0	28.6	0	487
Maret	27.7	78.5%	132.06	5.79	100.4	11.9	29.2	0	549
April	28.0	79.2%	132.90	5.64	100.4	11.1	29.5	0	540
Mei	28.1	80.2%	168.95	5.01	100.3	16.1	29.3	0	561
Juni	28.0	79.9%	126.30	4.99	100.3	19.8	29.2	0	540
Juli	27.7	79.5%	127.41	4.90	100.4	20.6	28.9	0	549
Agustus	27.5	80.4%	137.33	4.81	100.4	20.8	28.8	0	543
September	27.2	81.2%	168.90	4.74	100.4	17.9	28.6	0	516
Oktober	26.9	82.2%	194.06	4.67	100.5	14.9	28.2	0	524
November	26.9	82.5%	225.00	4.66	100.4	13.8	28.1	0	507
Desember	27.0	82.0%	206.46	4.88	100.5	17.5	28.0	0	527
Tahunan	27.5	80.5%	1.861.48	5.10	100.4	16.5	28.7	0	6.372
Sumber	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA

Diukur pada: m 10 0

Kunjungi: Fasilitas

Gambar 3.3 Tampilan Worksheet 'Location'

2. Pemodelan Energi (*Energy Model*)

Tahap ini merupakan inti dari simulasi teknis, di mana parameter sistem PLTS yang telah dirancang dimasukkan untuk menghitung proyeksi produksi energi. Data yang diinput meliputi:

- Teknologi Modul: Jenis sel surya yang digunakan (*Monocrystalline Silicon*).
- Produsen dan Model: Spesifikasi modul surya yang dipilih, termasuk kapasitas daya per unit (Wp), efisiensi modul (%), dan koefisien suhu.
- Kapasitas Sistem: Jumlah modul surya yang akan dipasang dan total kapasitas terpasang (kWp).
- Konfigurasi Array: Sudut kemiringan (*tilt*) dan orientasi (*azimuth*) panel surya yang disesuaikan dengan kondisi atap bangunan.
- Spesifikasi Inverter: Kapasitas daya inverter (kW) dan efisiensi konversi (%).
- Kehilangan Sistem (*System Losses*): Estimasi rugi-rugi teknis yang terjadi dalam sistem, meliputi rugi-rugi pada kabel, pengaruh suhu, debu, ketidaksesuaian modul (*mismatch*), dan naungan (*shading*). Nilai ini dimasukkan dalam bentuk persentase.

Pembangkit listrik - Sel Surya Off Grid - 100 kWp - Sel surya

Bahan bakar & jadwal

Listrik dan bahan bakar

Teknologi

Daya

Sel Surya Off Grid - 100 kWp

Ringkasan

Termasuk sistem?

Perbandingan

Sel surya

Deskripsi: Sel Surya Off Grid - 100 kWp

Catatan: PDAM TIRTA DAROY

Tingkat

Tingkat 1

Tingkat 2

eLearning

Sel surya - Tingkat 2

Analisa sumberdaya

Modul pelacakan surya: Tetap

Kemiringan: 15

Azimuth: 180

Tunjukkan data

Sel surya

Tipe: mono-Si

Kapasitas daya: 601,2 kW

Perusahaan manufaktur: Jinko Solar

Model: mono-Si - JKM300M-60-V

Jumlah unit: 2.004

Efisiensi: 18,33%

Suhu operasi sel nominal: 45 °C

Koefisien suhu: 0,4% / °C

Area kolektor surya: 3.280 m²

Faktor penyesuaian sel surya dua sisi: 0%

Kerugian lainnya: 3%

Pembalik

Efisiensi: 97,6%

Kapasitas: 450 kW

Kerugian lainnya: 0%

Ringkasan

Faktor kapasitas: 17,5%

Biaya awal: \$/kW 2.142

\$ 1.287.770

Biaya O&M (penghematan): \$/kW-tahun 25,50

\$ 15.331

Harga ekspor listrik: Harga ekspor listrik - tahunan

\$/kWh 0,14

Listrik yang diekspor ke jaringan: MWh 923

Pendapatan ekspor listrik: \$ 129.253

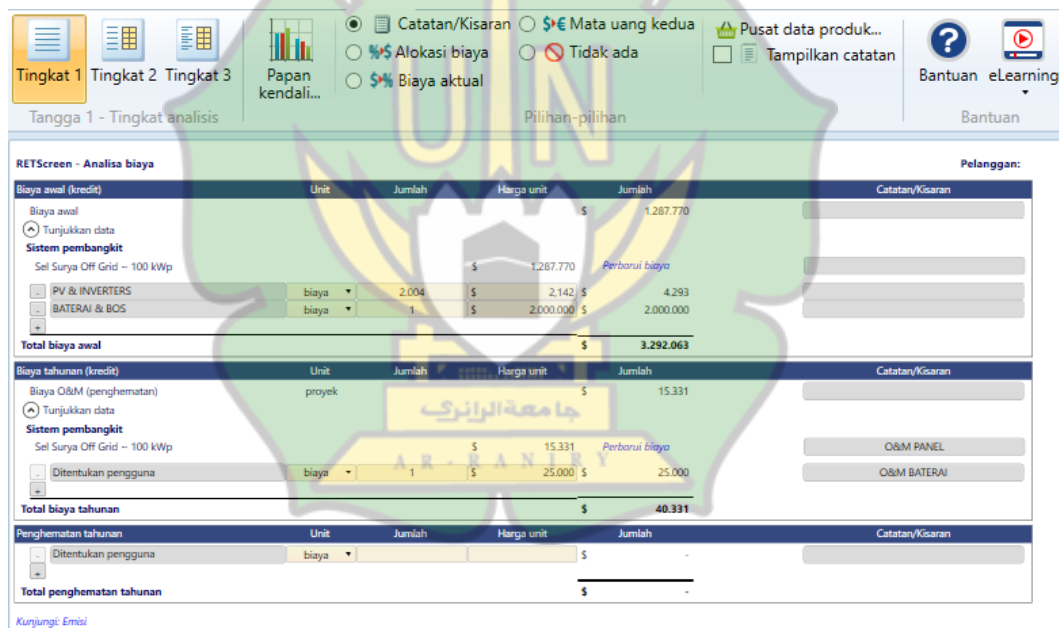
Kunjungi: Biaya

Gambar 3.4 Tampilan Worksheet 'Energy'

3. Analisis Biaya (*Cost Analysis*)

Tahap ini berfungsi untuk mengkuantifikasi seluruh biaya yang diperlukan selama siklus hidup proyek. Input data yang diberikan meliputi:

- **Biaya Awal (*Initial Costs*):** Rincian biaya investasi yang mencakup biaya studi kelayakan dan pengembangan, biaya rekayasa (*engineering*), biaya pengadaan modul surya dan inverter, biaya komponen pendukung (*Balance of System*), serta biaya instalasi dan tenaga kerja.
- **Biaya Tahunan (*Annual Costs*):** Biaya operasi dan pemeliharaan (*Operation & Maintenance/O&M*) yang diperlukan setiap tahunnya untuk menjaga kinerja sistem, seperti pembersihan panel, pemeriksaan rutin, dan penggantian komponen kecil.



The screenshot displays the 'RETScreen - Analisa biaya' worksheet. It is divided into three main sections: 'Biaya awal (kredit)', 'Biaya tahunan (kredit)', and 'Penghematan tahunan'. Each section includes a table with columns for 'Unit', 'Jumlah', 'Harga unit', and 'Jumlah'. The 'Biaya awal' section shows costs for PV & INVERTERS, BATERAI & BOS, and a total of 3,292,063. The 'Biaya tahunan' section shows costs for O&M PANEL, O&M BATERAI, and a total of 40,331. The 'Penghematan tahunan' section shows a total of 0. The interface includes a top menu bar with options like 'Tingkat 1', 'Tingkat 2', 'Tingkat 3', and 'Papan kendali...'. There are also buttons for 'Catatan/Kisaran', 'Alokasi biaya', 'Biaya aktual', 'Mata uang kedua', 'Tidak ada', 'Pusat data produk...', 'Tampilkan catatan', 'Bantuan', and 'eLearning'.

Biaya awal (kredit)	Unit	Jumlah	Harga unit	Jumlah	Catatan/Kisaran
Biaya awal				\$ 1,287,770	
Sistem pembangkit				\$ 1,287,770	Perbarui biaya
PV & INVERTERS	biaya	2,004	\$ 2,142	\$ 4,293	
BATERAI & BOS	biaya	1	\$ 2,000,000	\$ 2,000,000	
Total biaya awal				\$ 3,292,063	
Biaya tahunan (kredit)	Unit	Jumlah	Harga unit	Jumlah	Catatan/Kisaran
Biaya O&M (penghematan)	proyek			\$ 15,331	
Sistem pembangkit				\$ 15,331	Perbarui biaya
Ditentukan pengguna	biaya	1	\$ 25,000	\$ 25,000	O&M PANEL O&M BATERAI
Total biaya tahunan				\$ 40,331	
Penghematan tahunan	Unit	Jumlah	Harga unit	Jumlah	Catatan/Kisaran
Ditentukan pengguna	biaya			\$ -	
Total penghematan tahunan				\$ -	

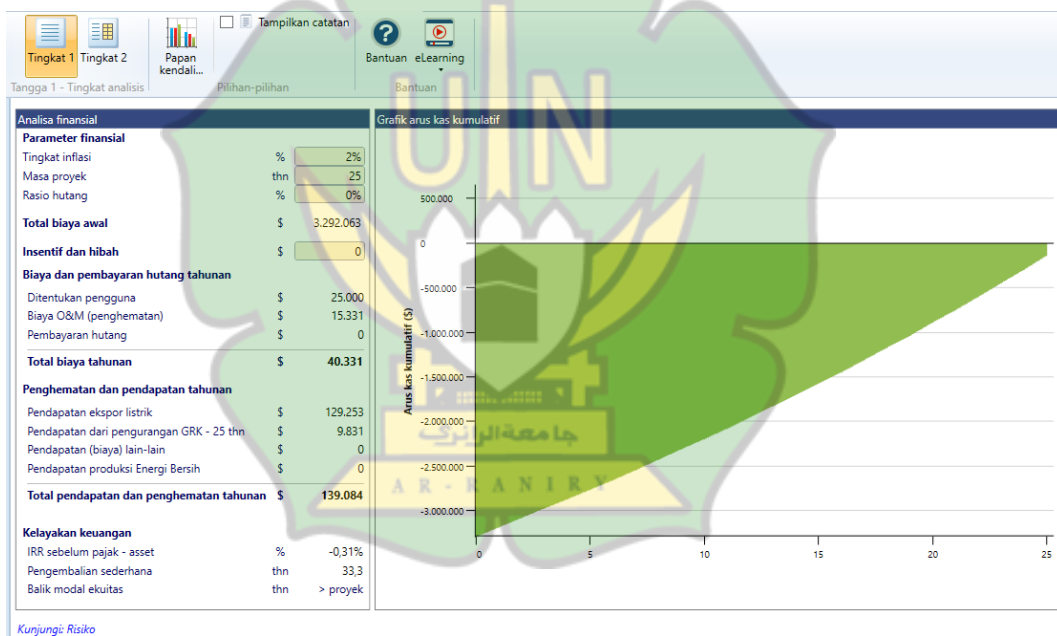
Gambar 3.5 Tampilan Worksheet 'Cost Analysis'

4. Analisis Finansial (*Financial Analysis*)

Pada tahap ini, parameter ekonomi dan pasar dimasukkan untuk mengevaluasi kelayakan investasi proyek. Data yang diinput meliputi:

- **Umur Proyek (*Project Life*):** Periode ekonomis proyek, yang umumnya mengacu pada umur teknis panel surya (25 tahun).

- Parameter Makroekonomi: Tingkat inflasi (%) dan tingkat diskonto (*discount rate*, %) yang digunakan sebagai acuan biaya peluang modal.
- Struktur Pendanaan: Suku bunga pinjaman (%) dan rasio utang terhadap ekuitas (*debt ratio*, %) jika proyek dibiayai melalui pinjaman bank.
- Tarif Ekspor Listrik (*Electricity Export Rate*): Nilai penghematan biaya listrik yang diperoleh dari energi yang dihasilkan PLTS. Nilai ini setara dengan tarif listrik PLN yang berlaku untuk golongan pelanggan PDAM (dalam satuan USD/kWh atau Rp/kWh).
- Insentif dan Pendapatan Tambahan: Nilai pendapatan dari kredit karbon jika proyek memenuhi syarat untuk mekanisme perdagangan emisi (dalam satuan USD/t



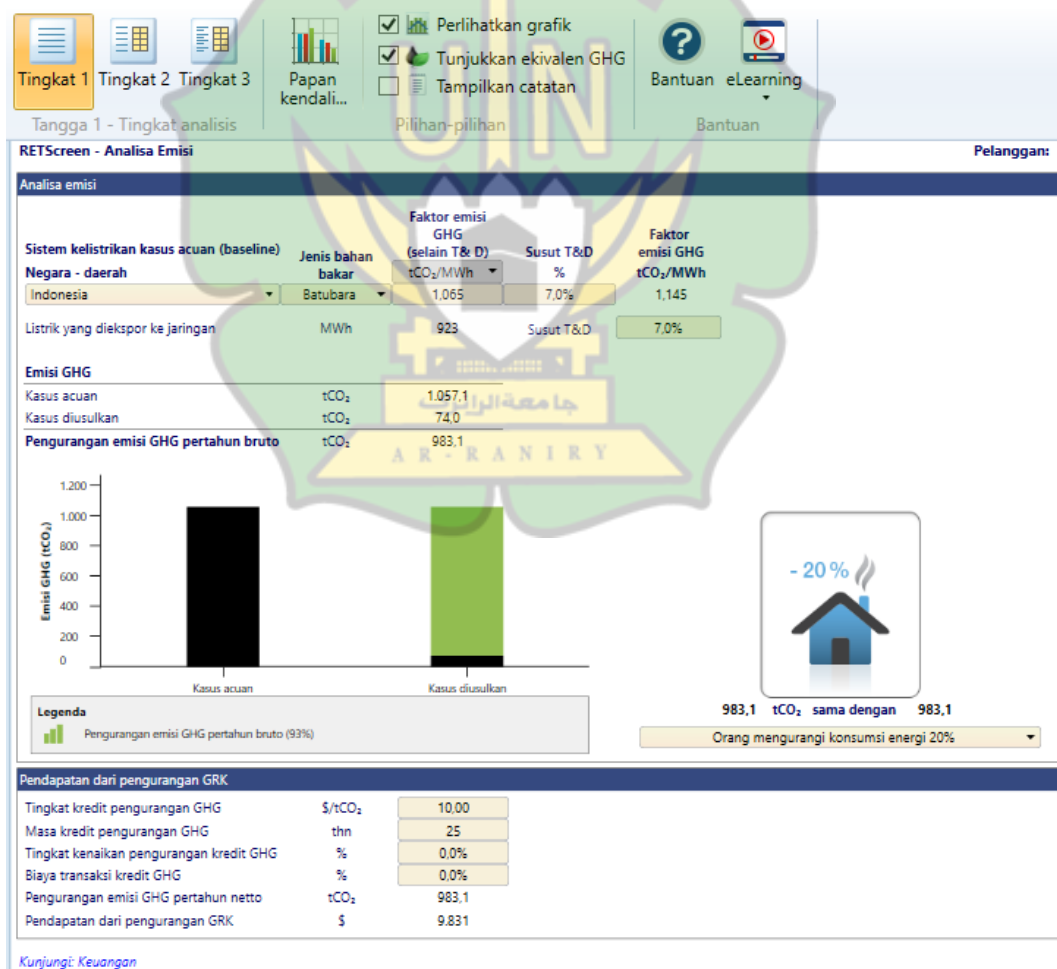
Gambar 3.35 Tampilan Worksheet 'Financial Analysis'

5. Analisis Emisi dan Lingkungan (*Emission Analysis*)

Tahap ini bersifat kuantitatif untuk memperkirakan dampak lingkungan positif dari proyek. Data yang perlu diidentifikasi adalah faktor emisi gas rumah kaca (GRK) untuk jaringan listrik di wilayah Indonesia (dalam satuan tCO₂/MWh), yang berasal dari *database* internal *RETScreen*. Perangkat lunak akan membandingkan emisi pada skenario *baseline* (menggunakan listrik PLN) dengan

skenario yang diusulkan (menggunakan PLTS) untuk menghitung total pengurangan emisi tahunan.

Setelah semua data pada setiap lembar kerja di atas diisi, *software RETScreen Expert* akan secara otomatis memproses input tersebut dan menghasilkan berbagai luaran (*output*). Luaran utama yang dihasilkan dan menjadi fokus analisis dalam penelitian ini adalah estimasi produksi energi tahunan (kWh/tahun), total biaya investasi dan operasional, serta indikator kelayakan finansial seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Simple Payback Period* (tahun), dan *Benefit-Cost Ratio* (BCR). Selain itu, simulasi juga menghasilkan estimasi pengurangan emisi gas rumah kaca (tCO₂/tahun) sebagai aspek kelayakan lingkungan.



Gambar 3.36 Tampilan Worksheet 'Emission'

3.4.5 Analisa Kelayakan PLTS

Analisa Kelayakan PLTS yang didapat dari *output* perhitungan teknis PLTS dan analisis kelayakan berdasarkan hasil evaluasi simulasi *software Retscreen*. Simulasi dilakukan untuk mengetahui jumlah energi listrik yang dihasilkan (kWh/tahun), penghematan Biaya energi (Rp/tahun), Biaya investasi awal, biaya operasional & pemeliharaan (O&M), *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate Of Return* (IRR) dan *Break Even Point* (BEP). Tahapan analisis selanjutnya dilakukan untuk mengambil keputusan dengan melakukan analisis kelayakan berdasarkan pada aspek teknis, aspek lingkungan, dan aspek ekonomi



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Beban Energi Listrik WTP

Analisis profil umum dan beban energi listrik merupakan fondasi utama dalam perencanaan suatu sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Sub-bab ini bertujuan untuk mendeskripsikan objek penelitian, dalam hal ini WTP PDAM Tirta Daroy, dan mengkuantifikasi kebutuhan energi listriknya yang akan dipenuhi oleh sistem PLTS. Pemahaman yang komprehensif terhadap profil konsumsi energi sangat penting untuk menentukan kapasitas dan konfigurasi sistem PLTS yang optimal, efisien, dan ekonomis. Tanpa data beban yang akurat, desain sistem berisiko menjadi tidak memenuhi kebutuhan (*under-size*) atau terlalu besar dan tidak ekonomis (*over-size*). Dalam konteks studi kelayakan menggunakan *RETScreen*, data beban energi ini menjadi parameter penting yang akan mempengaruhi hasil simulasi, mulai dari dimensi sistem, analisis finansial, hingga estimasi pengurangan emisi. Adapun data beban pada WTP PDAM Tirta Daroy adalah sebagai berikut:

1. Pompa Running

Tabel 4.1 Data Spesifikasi Teknis Pompa dan Elektromotor Running di WTP Lambaro PDAM Tirta Daroy

Kategori	No	Merk & Tipe Pompa	Daya Motor (kW)	Jumlah Unit	Total Daya Terpasang (kW)	Konsumsi Energi Harian (kWh/hari)
<i>Distribution Pump</i>	1	KSB ETA-B200-50	132	3	396	4.752
	2	Torishima CEN 200 X 150-400	90	1	90	1.080
<i>Intake Pump (Indoor)</i>	3	KSB Amarex KRTK	80	3	240	2.880

<i>Intake Pump (Outdoor)</i>	4	Senator & Ebara	22	2	44	528
TOTAL				9	770	9.240

2. Pompa Standby

Tabel 4.2 Data Spesifikasi Teknis Pompa dan Elektromotor Standby di WTP Lambaro PDAM Tirta Daroy

Kategori	No	Merk & Tipe Pompa	Daya Motor (kW)	Jumlah Unit	Total Daya Terpasang (kW)	Konsumsi Energi Harian (kWh/hari)
<i>Distribution Pump</i>	1	KSB ETA-B200-50	132	2	264	3.164
	2	Torishima CEN 200 X 150-400	90	1	90	1.080
<i>Intake Pump (Indoor)</i>	3	KSB Amarex KRTK	80	1	80	960
	4	KSB KRT K200	40	1	40	480
<i>Intake Pump (Outdoor)</i>	6	Ebara	22	1	22	264
TOTAL				9	770	5.952

Berdasarkan data inventarisasi pompa dan elektromotor di WTP Lambaro, dapat diketahui bahwa konsumsi energi terbesar didominasi oleh unit *Distribution Pump* yang berfungsi mengalirkan air bersih ke pelanggan. Pada segmen ini, terdapat variasi kapasitas motor penggerak berkapasitas mulai dari 90 kW hingga 200 kW dengan tegangan kerja 380 Volt. Secara spesifik, terdapat unit pompa KSB tipe ETA-B200-50 yang menggunakan elektromotor ABB dengan daya 200 kW dan arus nominal 369 Ampere. Manajemen beban pada sektor distribusi ini menerapkan pola operasi "3 *Running*, 2 *Standby*" untuk unit berkapasitas besar,

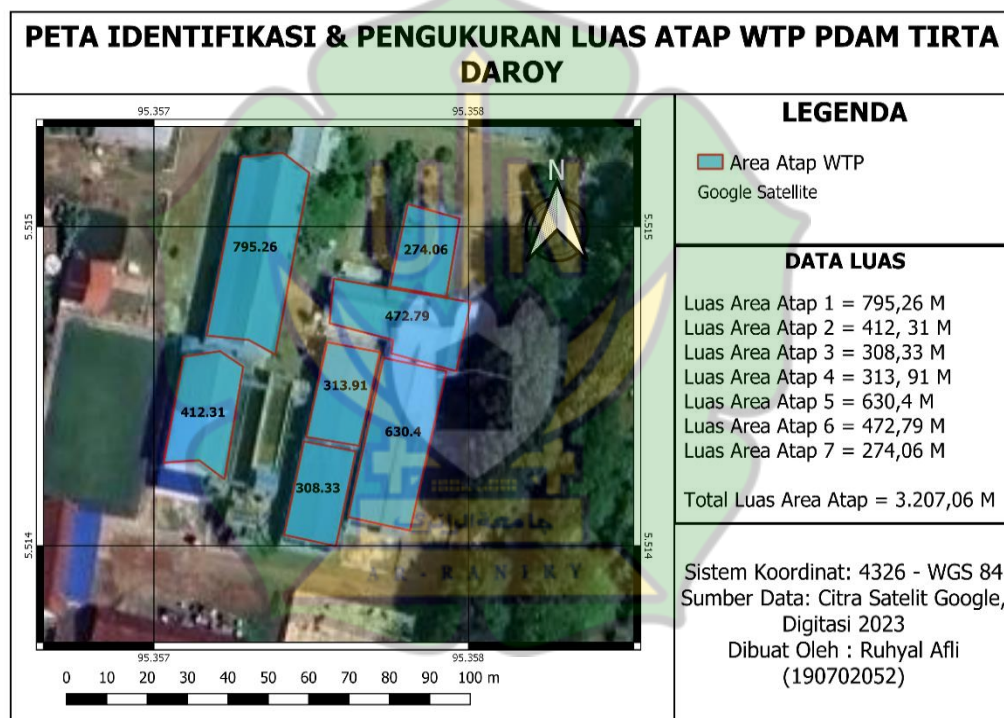
serta "1 *Running*, 1 *Standby*" untuk unit pompa Torishima berkapasitas 90 kW. Konfigurasi operasional ini mengindikasikan bahwa meskipun total kapasitas terpasang sangat besar, beban aktif yang harus disuplai oleh PLTS pada satu waktu adalah akumulasi dari unit yang berstatus *running*. Tingginya arus nominal pada motor-motor ini, khususnya pada unit 200 kW, menuntut spesifikasi inverter PLTS yang memiliki kemampuan menahan lonjakan arus awal (*surge current*) yang tinggi agar sistem tidak mengalami *trip* saat proses *start-up* pompa dimulai.

Selain pompa distribusi, profil beban juga dipengaruhi secara signifikan oleh unit *Water Intake Pump* yang beroperasi di dua lokasi, yaitu di dalam instalasi dan di area sungai (*outdoor*). Untuk unit *Intake* bagian dalam, sistem mengandalkan pompa *Submersible* KSB Amarex KRTK dengan daya motor 80 kW dan arus 159 Ampere yang beroperasi dengan konfigurasi "3 *Running*, 1 *Standby*". Sementara itu, pada sisi *Intake* luar, digunakan pompa Senator dan Ebara dengan kapasitas motor lebih kecil yakni 22 kW dan arus 43 Ampere, yang beroperasi dengan pola "2 *Running*, 1 *Standby*". Sebagai catatan, operasional pompa *Intake* luar ini memiliki sifat kondisional yang bergantung pada level muka air sungai, sehingga variabilitas bebannya cenderung lebih dinamis dibandingkan pompa distribusi. Secara keseluruhan, akumulasi daya dari unit *Distribution*, *Intake* Dalam, dan *Intake* Luar yang berstatus *running* membentuk kurva beban dasar (*baseload*) yang tinggi dan bersifat induktif. Data teknis ini menegaskan bahwa perancangan PLTS *Off-Grid* di PDAM Tirta Daroy membutuhkan (*battery bank*) dengan kapasitas siklus dalam (*deep cycle*) yang besar untuk menjaga kestabilan tegangan 380/400V saat seluruh pompa utama beroperasi secara simultan.

4.2 Luas Area Atap

Evaluasi ketersediaan luas area atap (*roof area availability*) merupakan parameter fisik yang menjadi pembatas utama (*physical constraint*) dalam menentukan kapasitas maksimum sistem PLTS yang dapat diinstalasi pada lokasi penelitian. Dalam studi ini, identifikasi dan pengukuran luas area dilakukan melalui pendekatan analisis spasial menggunakan perangkat lunak sistem informasi geografis QGIS yang berbasis pada data citra satelit Google (*Google Satellite*).

Metode digitasi ini bertujuan untuk memetakan secara presisi segmen-segmen atap gedung di kompleks Water Treatment Plant (WTP) PDAM Tirta Daroy yang memiliki potensi paling optimal untuk penempatan modul surya, dengan mempertimbangkan orientasi bangunan dan meminimalisir risiko bayangan (*shading*) dari vegetasi atau struktur di sekitarnya. Akurasi data luasan ini sangat krusial karena akan menjadi input variabel "*Resource Availability*" dalam simulasi *RETScreen*, yang membatasi jumlah maksimum panel surya yang dapat disimulasikan agar hasil perancangan tetap realistis dan dapat diimplementasikan (*constructible*).



Gambar 4.1 Peta Identifikasi & Pengukuran Luas Atap WTP PDAM Tirta Daroy
 Sumber: Hasil digitasi dan analisis spasial menggunakan aplikasi QGIS serta citra satelit Google Earth

Berdasarkan hasil pemetaan dan digitasi spasial yang diperbarui, area potensial untuk instalasi PLTS di WTP PDAM Tirta Daroy teridentifikasi terbagi menjadi tujuh segmen atap utama dengan ukuran yang bervariasi, seperti pada tabel berikut:

Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Luas Atap m² di WTP Lambaro PDAM Tirta Daroy

No	Segmen	Luas Atap m ²
1	Segmen 1	795,26 m ²
2	Segmen 2	412,31 m ²
3	Segmen 3	308,33 m ²
4	Segmen 4	313,91 m ²
5	Segmen 5	630,4 m ²
6	Segmen 6	472,79 m ²
7	Segmen 7	274,06 m ²

Pengukuran menunjukkan bahwa Area Atap 1 merupakan segmen terluas dengan ukuran 795,26 m², diikuti oleh Area Atap 5 seluas 630,4 m². Segmen lainnya meliputi Area Atap 6 (472,79 m²), Area Atap 2 (412,31 m²), Area Atap 4 (313,91 m²), Area Atap 3 (308,33 m²), serta segmen terkecil yaitu Area Atap 7 seluas 274,06 m². Dengan demikian, total akumulasi luas area atap yang tersedia secara teknis (*gross area*) untuk pengembangan PLTS di lokasi tersebut mencapai 3.207,06 m².

Ketersediaan lahan atap yang mencapai lebih dari 3.000 m² ini memberikan implikasi teknis yang sangat positif terhadap fleksibilitas perancangan. Luasan ini mampu menampung kapasitas *array* fotovoltaik yang masif untuk mendukung beban operasional pompa yang besar. Dengan asumsi kebutuhan ruang efektif sekitar 1,6 m² per modul surya kapasitas besar (300 Wp), area ini secara teoritis mampu menampung lebih dari 2.004 modul surya. Selain itu, terbaginya area menjadi tujuh segmen gedung yang berbeda memungkinkan perancangan sistem dilakukan dengan membagi *array* ke dalam beberapa *string* atau kelompok inverter yang terdesentralisasi, sehingga memudahkan manajemen kabel dan pemeliharaan jangka panjang. Total luas area ini selanjutnya ditetapkan sebagai parameter batas atas ketersediaan lahan dalam simulasi energi di RETScreen.

4.3 Irradiasi Surya

Hasil simulasi data meteorologi pada lokasi penelitian menunjukkan bahwa WTP PDAM Tirta Daroy memiliki profil sumber daya surya yang berada di atas rata-rata kelayakan minimum untuk pembangkitan listrik. Sebagaimana disajikan pada Tabel 4.3, rata-rata intensitas radiasi matahari harian pada bidang *horizontal* (*Global Horizontal Irradiance*) tercatat sebesar 5,10 kWh/m²/hari. Angka ini mengindikasikan ketersediaan energi primer yang tinggi jika dibandingkan dengan rata-rata radiasi harian nasional Indonesia yang umumnya berkisar pada angka 4,8 kWh/m²/hari. Tingginya nilai iradiasi ini berdampak langsung pada variabel produksi energi, di mana simulasi memproyeksikan total energi listrik yang mampu diekspor ke beban (*export to load*) mencapai 923,236 MWh per tahun. Temuan ini menjawab tujuan penelitian terkait kelayakan teknis, menegaskan bahwa lokasi studi memiliki potensi sumber daya alam yang memadai untuk mendukung operasional sistem *off-grid* secara mandiri.

Bulan	Radiasi matahari harian - horizontal kWh/m ² /d	Radiasi matahari harian - miring kWh/m ² /d	Harga ekspor listrik \$/kWh	Listrik yang diekspor ke jaringan MWh
Januari	5,39	4,67	0,14	74,670
Februari	5,75	5,20	0,14	74,789
Maret	5,79	5,50	0,14	87,824
April	5,64	5,62	0,14	86,966
Mei	5,01	5,16	0,14	82,746
Juni	4,99	5,23	0,14	81,048
Juli	4,90	5,09	0,14	81,776
Agustus	4,81	4,85	0,14	78,306
September	4,74	4,60	0,14	72,137
Oktober	4,67	4,35	0,14	70,287
November	4,66	4,15	0,14	64,802
Desember	4,88	4,22	0,14	67,887
Tahunan	5,10	4,88	0,14	923,236
Radiasi matahari tahunan-horizontal	MWh/m ²	1,86		
Radiasi matahari tahunan - miring	MWh/m ²	1,78		

Gambar 4.2 Radiasi Matahari Harian Dari RETScreen

Sumber: Hasil simulasi software RETScreen

Analisis variabilitas bulanan menunjukkan pola distribusi energi yang stabil namun fluktuatif mengikuti pola musiman. Puncak iradiasi terjadi pada periode

awal tahun, dengan nilai tertinggi pada bulan Maret (5,79 kWh/m²/hari) dan Februari (5,75 kWh/m²/hari). Sebaliknya, titik terendah tercatat pada bulan November sebesar 4,66 kWh/m²/hari. Meskipun terjadi penurunan pada akhir tahun akibat peningkatan curah hujan, nilai terendah tersebut masih signifikan secara teknis karena tetap berada di atas ambang batas kritis 4,0 kWh/m²/hari. Hal ini berdampak pada desain battery bank. Stabilitas radiasi di atas ambang batas ini memastikan proses pengisian daya (*charging*) tetap dapat berlangsung efektif bahkan pada bulan dengan kondisi cuaca kurang optimal, sehingga meminimalisir risiko *Loss of Power Supply Probability* (LPSP) (Agung Wahyuono & Magenika Julian, 2018).

Selain itu, terdapat korelasi positif antara pengaturan sudut kemiringan panel dengan perolehan energi. Data "Radiasi matahari harian – miring (*tilted*)" menunjukkan rata-rata tahunan sebesar 5,11 kWh/m²/hari, sedikit lebih tinggi dibandingkan posisi horizontal. Peningkatan signifikan terlihat pada bulan Desember, di mana radiasi miring mencapai 5,20 kWh/m²/hari berbanding 4,88 kWh/m²/hari pada posisi datar. Temuan ini mengkonfirmasi bahwa orientasi instalasi panel surya yang disimulasikan dalam *RETScreen* telah optimal dalam menangkap sudut datang sinar matahari (*angle of incidence*), khususnya saat posisi matahari berada di belahan bumi selatan.

4.4 Desain Konfigurasi Sistem PLTS Off-Grid

Desain konfigurasi sistem adalah proses menterjemahkan kebutuhan beban dan potensi sumber daya menjadi sebuah rancangan teknis yang rinci dan dapat diimplementasikan. Sub-bab ini membahas spesifikasi komponen utama dan arsitektur sistem PLTS Off-Grid yang diusulkan untuk PDAM Tirta Daroy. Berbeda dengan sistem on-grid yang terhubung ke jaringan PLN, sistem off-grid harus mandiri dan mampu memenuhi kebutuhan energi secara penuh, diperlukan komponen penyimpanan energi (baterai) dan *Solar Charge Controller* (SCC) yang tepat (Putri, 2023). Komponen lainnya yang juga yang ditentukan dengan tepat harus meliputi kapasitas modul surya, berdasarkan luas atap, dan inverter.

4.4.1 Jumlah Kapasitas Terpasang (kWp)

Penentuan jumlah kapasitas terpasang, yang dinyatakan dalam satuan *Kilowatt-peak* (kWp), merupakan tahapan krusial dalam desain sistem PLTS Off-Grid karena parameter ini mendefinisikan skala pembangkitan maksimum yang dapat dicapai oleh susunan modul fotovoltaik pada Kondisi Pengujian Standar (STC). Definisi fundamental dari kapasitas terpasang merujuk pada total daya keluaran teoritis dari seluruh panel surya yang dikonfigurasi dalam sistem. Kegunaan utama dari penetapan angka kWp ini adalah sebagai variabel input primer dalam *Energy Model RETScreen* untuk memproyeksikan total produksi energi tahunan, serta menjadi dasar dalam menentukan ukuran komponen pendukung lainnya seperti *Solar Charge Controller* (SCC), kapasitas bank baterai, dan ukuran *inverter*. Persyaratan dalam menginterpretasikan hasil olah data pada bagian ini menuntut adanya sinkronisasi antara kebutuhan beban listrik yang sangat besar pada WTP PDAM Tirta Daroy dengan batasan fisik luas atap yang tersedia. Secara matematis, penentuan kapasitas puncak (P_{peak}) untuk memenuhi target energi tertentu dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P_{peak} = \frac{E_{el} \cdot I_{stc}}{E_{glob} \cdot Q} \dots \dots \dots (14)$$

$$P_{peak} = \frac{9.240 \text{ kWh/hari} \cdot 1 \text{ kW/m}^2}{5,1 \text{ kWh/m}^2/\text{hari} \cdot 0,5} P_{peak} = \frac{E_{el} \cdot I_{stc}}{E_{glob} \cdot Q}$$

$$P_{peak} = \frac{9.240 \text{ kWh/hari} \cdot 1 \text{ kW/m}^2}{5,1 \text{ kWh/m}^2/\text{hari} \cdot 0,5}$$

$$P_{peak} = \frac{9.240}{2,55}$$

$$P_{peak} = 3.623,53 \text{ kWp} \approx 3,62 \text{ MWp}$$

Setelah menentukan kapasitas total sistem, langkah selanjutnya adalah menentukan jumlah modul surya dan kebutuhan ruang. Dengan menggunakan modul surya berkapasitas 300 Wp per unit, perhitungannya adalah:

- Jumlah Modul: $\frac{3.623.530 \text{ Wp}}{300 \text{ wp}} = 12.078,43 \rightarrow$ Dibulatkan menjadi 12.079 modul
- Kebutuhan Luas Area: $12.079 \text{ modul} \times 1,6 \text{ m}^2/\text{modul} = 19.326,4 \text{ m}^2$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh nilai P_{peak} sebesar 3,62 MWp dengan kebutuhan modul sebanyak 12.067 unit. Angka ini merepresentasikan kapasitas pembangkitan yang secara teoritis dibutuhkan apabila PLTS direncanakan untuk menyuplai 100% kebutuhan beban harian sebesar 9.240 kWh/hari. Faktor kualitas (Q) sebesar 0,5 yang digunakan mencerminkan tingkat rugi-rugi teknis tinggi pada sistem *off-grid*, yang mencakup efisiensi baterai, rugi-rugi kabel, dan pengaruh suhu lingkungan terhadap kinerja panel surya.

Untuk memasang kapasitas PLTS sebesar 3,62 MWp terdapat selisih luasan lahan yang sangat signifikan. Karena luas atap yang tersedia hanya 3.207,06 m². Secara teknis, hal ini menunjukkan bahwa luas atap yang ada hanya mampu menampung sekitar 16,61% dari total PLTS untuk melayani 100 % beban. Oleh karena itu, strategi desain dalam *software RETScreen* harus difokuskan pada pemenuhan beban prioritas atau merencanakan sistem hibrida yang tetap mengandalkan pasokan listrik dari PLN untuk menutupi kekurangan produksi energi dari PLTS guna menjaga kestabilan operasional pompa di PDAM Tirta Daroy.

Dikarenakan adanya keterbatasan fisik pada lokasi penelitian, maka sistem PLTS yang dirancang harus menyesuaikan dengan ketersediaan luas atap total sebesar 3.207,06 m². Berdasarkan batasan luasan tersebut, maka kapasitas maksimal yang secara teknis dapat dipasang dihitung dengan menentukan jumlah modul yang mampu ditampung oleh area efektif sebagai berikut:

- Jumlah Modul Maksimal: $\frac{3.207,06 \text{ m}^2}{300 \text{ wp}} = 2.004,41 \rightarrow$ Dibulatkan menjadi 2.004 unit
- Kapasitas Terpasang Rill: $2.004 \text{ unit} \times 300 \text{ Wp} = 601.200 \text{ Wp} \approx 601,2 \text{ kWp}$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, diperoleh kapasitas riil sebesar 601,2 kWp. Jika dibandingkan dengan kebutuhan ideal untuk menyuplai seluruh beban harian (3,62 MWp), maka sistem PLTS yang dapat dipasang di atap WTP PDAM Tirta Daroy hanya mampu berkontribusi sekitar 16,61% dari total kebutuhan energi harian sebesar 9.240 kWh/hari.

Kondisi ini mengimplikasikan bahwa operasional PDAM Tirta Daroy tetap akan bergantung secara dominan pada pasokan listrik dari PLN untuk menutupi sisa kebutuhan energi sebesar 83,39% atau sekitar 7.707 kWh/hari. Penggunaan listrik PLN tetap menjadi komponen vital sebagai penyedia daya utama (*base load*) dan penjamin stabilitas operasional, terutama pada malam hari atau saat kondisi cuaca mendung di mana produksi PLTS menurun drastis. Integrasi antara PLTS dan PLN ini membentuk sistem hibrida yang strategis; di mana PLTS berfungsi untuk mengurangi konsumsi listrik PLN pada siang hari (*peak shaving*) guna menekan biaya operasional, sementara PLN menjamin pasokan daya besar yang dibutuhkan untuk menjalankan motor-motor induktif pada pompa distribusi yang memiliki lonjakan arus start-up tinggi. Dengan demikian, meskipun judul penelitian berfokus pada sistem *off-grid*, pada praktiknya sistem ini diusulkan untuk melayani beban - beban prioritas tertentu secara mandiri, sementara sistem keseluruhan tetap terhubung dengan jaringan listrik nasional demi menjaga kontinuitas distribusi air bersih ke pelanggan.

4.4.2 Hasil Pemodelan Energi

Analisis pemodelan energi melalui perangkat lunak *RETScreen Expert* menyajikan simulasi interaksi teknis antara variabel sistem PLTS dengan kondisi meteorologi riil di lokasi PDAM Tirta Daroy. Secara fundamental, proses ini memetakan seluruh alur distribusi daya mulai dari penangkapan iradiasi matahari oleh panel surya hingga estimasi energi bersih yang mampu disalurkan ke beban setelah melewati berbagai tahap rugi-rugi teknis sistem. Kegunaan utama dari sub-bab ini terletak pada validasi performa sistem dengan kapasitas terpasang 601,2 kWp dalam upaya memenuhi profil beban operasional pompa yang sangat besar. Persyaratan interpretasi hasil olah data pada tahap ini menuntut ketelitian dalam

mengevaluasi variabel *Specific Yield* dan *Solar Fraction* guna menentukan sejauh mana tingkat kemandirian energi dapat dicapai di tengah keterbatasan luas lahan atap yang tersedia.

Evaluasi tersebut menjadi landasan krusial bagi analisis ekonomi serta mitigasi emisi, mengingat efisiensi teknis yang rendah berdampak langsung terhadap perpanjangan periode pengembalian modal. Dalam prosesnya, simulasi energi ini mempertimbangkan variabilitas cuaca harian serta rugi-rugi sistem agar hasil proyeksi tetap realistis bagi kebutuhan manajerial PDAM Tirta Daroy. Selain itu, pemodelan ini berfungsi meminimalkan risiko kesalahan desain yang dapat menyebabkan ketidakstabilan pasokan saat daya PLTS berinteraksi dengan beban induktif pompa yang memiliki karakteristik arus mula tinggi.

Pembangkit listrik - Sel Surya Off Grid - 100 kWp - Sel surya

Bahan bakar & jadwal

- Listrik dan bahan bakar
- Teknologi
 - Daya
 - Sel Surya Off Grid - 100 kWp
- Ringkasan
 - Termasuk sistem?
 - Perbandingan

Sel surya

Deskripsi: Sel Surya Off Grid - 100 kWp
Catatan: PDAM TIRTA DAROY

Analisa sumberdaya

Modus pelacakan surya: Tetap
Kemiringan: 15
Azimut: 180

Tunjukkan data

Sel surya

Tipe: mono-Si
Kapasitas daya: 601,2 kW
Perusahaan manufaktur: Jinko Solar
Model: mono-Si - JKM300M-60-V
Jumlah unit: 2.004
Efisiensi: 18,33%
Suhu operasi sel nominal: 45 °C
Koefisien suhu: 0,4% / °C
Area kolektor surya: 3.280 m²
Faktor penyesuaian sel surya dua sisi: 0%
Kerugian lainnya: 3%

Pembalik

Efisiensi: 97,6%
Kapasitas: 450 kW
Kerugian lainnya: 0%

Ringkasan

Faktor kapasitas: 17,5%
Biaya awal: \$/kW 2.142
Biaya O&M (penghematan): \$/kW-tahun 25,50
Harga ekspor listrik: \$/kWh 0,14
Listrik yang diekspor ke jaringan: MWh 923
Pendapatan ekspor listrik: \$ 129.253

Kunjungi: Biaya

Gambar 4.3 Lembar Pemodelan Pada Menu “Energi”
Sumber: Hasil simulasi pemodelan “Energi” menggunakan software RETScreen

Berdasarkan hasil pemodelan pada menu “Energi” di *software RETScreen Expert*, spesifikasi teknis dan parameter input yang digunakan untuk mensimulasikan sistem di PDAM Tirta Daroy adalah sebagai berikut:

Tabel 4.4 Spesifikasi Teknis dan Parameter Input Pada Lembar Pemodelan “Energi” *RETScreen*

No	Spesifikasi Teknis	Parameter Input
1	Jenis Modul Fotovoltaik	<i>Mono-crystalline Silicon</i> (mono-Si)
2	Produsen dan Model	Jinko Solar - JKM300M-60-V
3	Kapasitas Daya per Unit	300 Wp
4	Jumlah Unit Modul	2.004 unit
5	Total Kapasitas Daya	601,2 kW
6	Efisiensi Modul	18,33%
7	Total Luas Panel Surya	3.280 m ²
8	Kemiringan (<i>Tilt</i>)	15°
9	Azimut	180°
10	Kapasitas Inverter (Pembalik)	450 kW
11	Efisiensi Inverter	97,6%

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa dengan kapasitas 601,2 kWp dan kapasitas inverter 450 kW, sistem PLTS menghasilkan energi listrik tahunan sebesar 923.236 kWh/tahun (atau 923,236 MWh/tahun), dengan faktor kapasitas (*capacity factor*) sebesar 17,5%. Sistem ini memberikan kontribusi (*solar fraction*) sebesar 16,59% terhadap total beban harian. Hal ini mengonfirmasi bahwa PLTS di PDAM Tirta Daroy berfungsi sebagai penyokong energi utama pada siang hari untuk mengurangi biaya beban puncak. Namun, karena produksi harian PLTS belum mampu menutupi seluruh kebutuhan energi, operasional tetap bergantung secara dominan pada listrik PLN sebagai penyedia daya utama sebesar 83,41%. Integrasi ini memastikan bahwa pompa-pompa berkapasitas besar tetap mendapatkan pasokan listrik yang stabil meskipun terjadi fluktuasi cuaca atau saat malam hari ketika PLTS tidak memproduksi. Secara teknis, pemodelan ini

mengonfirmasi kelayakan penggunaan teknologi mono-Si untuk menekan biaya operasional listrik PDAM tanpa mengorbankan kontinuitas distribusi air

4.4.3 Hasil Pemodelan Biaya

Analisis pemodelan biaya dalam kerangka sistem PLTS mencakup seluruh estimasi pengeluaran kapital dan operasional yang diproyeksikan selama umur teknis pembangkit. Secara fundamental, proses ini mengonversi parameter teknis kapasitas terpasang sebesar 601,2 kWp menjadi satuan moneter guna mengevaluasi kelayakan ekonomi proyek di PDAM Tirta Daroy. Kegunaan utama dari sub-bab ini terletak pada penyajian struktur pengeluaran yang mendalam, yang terdiri atas biaya investasi awal (*Initial Cost*) serta biaya operasional dan pemeliharaan tahunan (*Annual O&M Cost*).

Persyaratan interpretasi hasil olah data pada bagian ini mewajibkan identifikasi komponen biaya yang paling signifikan, sehingga pihak manajemen dapat memahami bobot alokasi dana yang dibutuhkan. Data yang dihasilkan melalui perangkat lunak *RETScreen Expert* memberikan dasar kuantitatif bagi analisis kelayakan finansial berikutnya, seperti perhitungan *Payback Period* dan *Internal Rate of Return* (IRR). Interpretasi terhadap angka biaya ini harus mempertimbangkan karakteristik sistem *off-grid* yang cenderung memiliki komponen biaya perangkat pendukung seperti sistem penyimpanan energi dan inverter yang lebih tinggi dibandingkan sistem *on-grid*. Keandalan pemodelan biaya ini sangat bergantung pada akurasi *input* harga per unit komponen di pasar saat ini, sehingga hasil simulasi mampu menggambarkan kondisi finansial riil yang akan dihadapi oleh instansi. Melalui pemodelan ini, efisiensi anggaran jangka panjang dapat terukur dengan membandingkan besarnya modal di muka terhadap potensi pengurangan pengeluaran energi rutin dari sumber fosil atau jaringan PLN.

RETScreen - Analisa biaya

Biaya awal (kredit)

Unit	Jumlah	Harga unit	Jumlah	Catatan/Kisaran
Biaya awal			\$ 1.287.770	
Sistem pembangkit				
Sel Surya Off Grid – 100 kWp			\$ 1.287.770	Perbarui biaya
PV & INVERTERS	biaya 2.004	\$ 2.142	\$ 4.293	
BATERAI & BOS	biaya 1	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000	
Total biaya awal			\$ 3.292.063	

Biaya tahunan (penghematan)

Unit	Jumlah	Harga unit	Jumlah	Catatan/Kisaran
Biaya O&M (penghematan)	proyek		\$ 15.331	
Sistem pembangkit				
Sel Surya Off Grid – 100 kWp			\$ 15.331	Perbarui biaya
Ditentukan pengguna	biaya 1	\$ 25.000	\$ 25.000	O&M PANEL
				O&M BATERAI
Total biaya tahunan			\$ 40.331	

Penghematan tahunan

Unit	Jumlah	Harga unit	Jumlah	Catatan/Kisaran
Ditentukan pengguna	biaya	\$ -	\$ -	
Total penghematan tahunan			\$ -	

Kunjungi: Emisi

Gambar 4.4 Lembar Pemodelan Pada Menu “Biaya”

Sumber: Hasil simulasi pemodelan “Biaya” menggunakan software RETScreen

Berdasarkan hasil pengolahan data pada menu "Biaya" di software RETScreen Expert untuk sistem PLTS PDAM Tirta Daroy, diperoleh rincian estimasi biaya sebagai berikut:

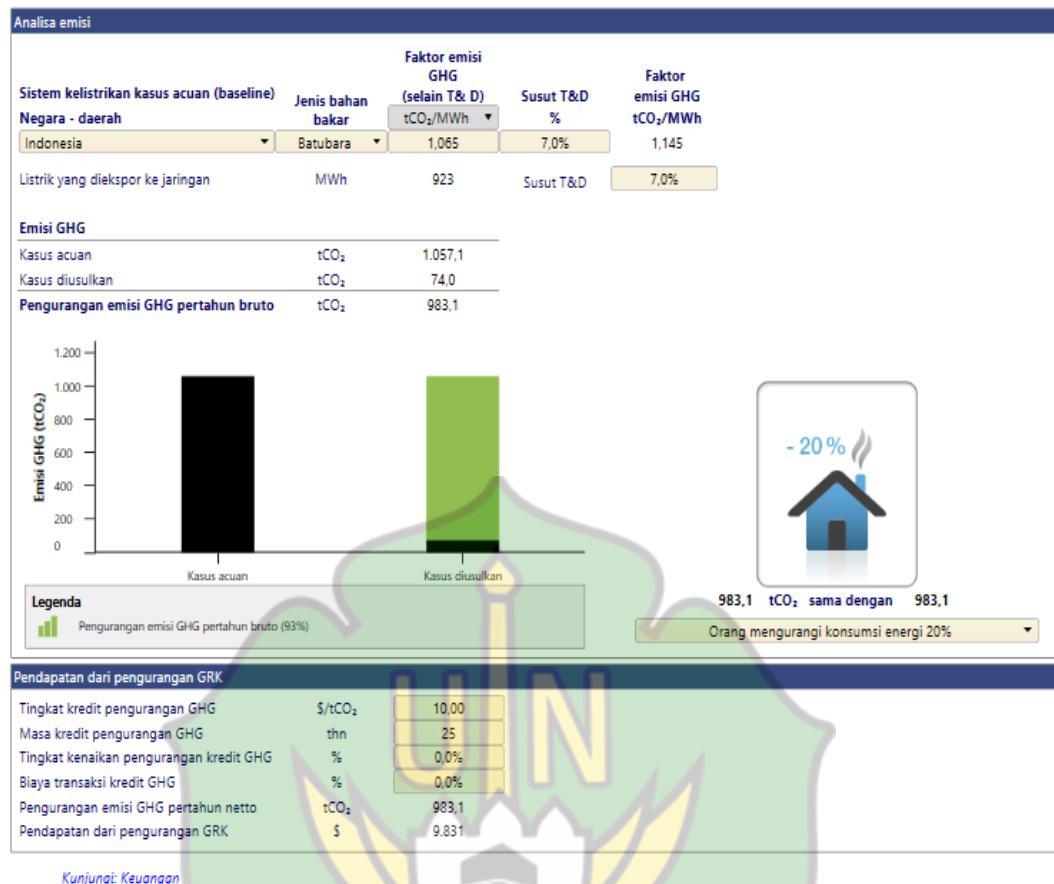
- Total Biaya Awal (*Total Initial Costs*): \$3.292.063/kW.
 - Komponen Biaya PV Module & Inverters: \$1.287.770
 - Biaya Baterai & BOS: \$2.000.000
 - Biaya Lain-lain: \$4.293
- Total Biaya Tahunan (*Total Annual Costs*): \$40.331/kW.
 - Biaya O&M Panel sebesar \$15.331
 - Biaya O&M Baterai sebesar \$25.000

Biaya investasi awal sebesar \$3,29 juta ini mencerminkan konfigurasi sistem Off-Grid dengan baterai untuk cadangan 1,5 hari. Komponen biaya terbesar adalah baterai dan BOS yang mencapai \$2,0 juta (sekitar 60,8% dari total investasi), sedangkan biaya panel dan inverter hanya sekitar \$1,29 juta (39,2%). Tingginya biaya awal ini memiliki implikasi langsung terhadap strategi pendanaan PDAM, di mana efisiensi pemeliharaan menjadi kunci agar sistem tetap beroperasi optimal selama 20 hingga 25 tahun ke depan. Alokasi biaya O&M sebesar \$25 per unit diperlukan untuk menjaga efisiensi panel sebesar 18,33 %.

4.4.4 Hasil Pemodelan Pengurangan Emisi GHG

Pemodelan pengurangan emisi *Greenhouse Gas* (GHG) melalui *software RETScreen Expert* menyajikan kalkulasi dampak lingkungan positif yang dihasilkan dari peralihan sumber energi konvensional ke energi terbarukan. Secara fundamental, analisis ini membandingkan skenario basis (*Baseline Case*), di mana kebutuhan listrik disuplai oleh jaringan transmisi nasional yang didominasi pembangkit berbahan bakar batubara, dengan skenario usulan (*Proposed Case*) yang memanfaatkan sistem PLTS. Kegunaan utama dari sub-bab ini terletak pada penyajian bukti kuantitatif mengenai kontribusi operasional PDAM Tirta Daroy dalam mereduksi jejak karbon secara signifikan guna mendukung target pemerintah terkait transisi energi bersih. Persyaratan dalam menginterpretasikan hasil olah data ini menuntut pemahaman terhadap faktor emisi gas rumah kaca yang berlaku di wilayah Indonesia, mencakup analisis kehilangan energi pada jaringan transmisi dan distribusi (T&D).

Tanpa pemodelan GHG yang presisi, nilai strategis investasi PLTS dari sisi keberlanjutan lingkungan tidak dapat divalidasi secara saintifik. Hasil interpretasi pada bagian ini mencakup angka reduksi bruto tahunan serta potensi pendapatan dari kredit karbon jika instansi mendaftarkan proyek tersebut dalam mekanisme nilai ekonomi karbon. Selain itu, pemodelan ini memberikan gambaran ekivalensi dampak lingkungan yang lebih mudah dipahami oleh pemangku kepentingan, seperti perbandingannya dengan pengurangan konsumsi energi masyarakat secara luas.



Gambar 4.5 Lembar Pemodelan Pada Menu “Emisi”

Sumber: Hasil simulasi pemodelan “Emisi” menggunakan software RETScreen

Berdasarkan hasil simulasi pada menu "Emisi" di software RETScreen Expert untuk sistem PLTS berkapasitas 601,2 kWp, diperoleh parameter pengurangan emisi gas rumah kaca sebagai berikut:

Tabel 4.5 Hasil Pemodelan Pengurangan Emisi GRK

Parameter	Nilai
Faktor Emisi GHG Jaringan (Indonesia)	1,145 tCO ₂ /MWh
Emisi GHG Kasus Acuan (<i>Baseline</i>)	1.057,1 tCO ₂ /tahun
Emisi GHG Kasus Diusulkan (<i>Proposed</i>)	74,0 tCO ₂ /tahun
Total Pengurangan Emisi GHG Tahunan	983,1 tCO ₂ /tahun
Pendapatan Kredit Karbon (\$10/tCO ₂)	\$9.831/tahun

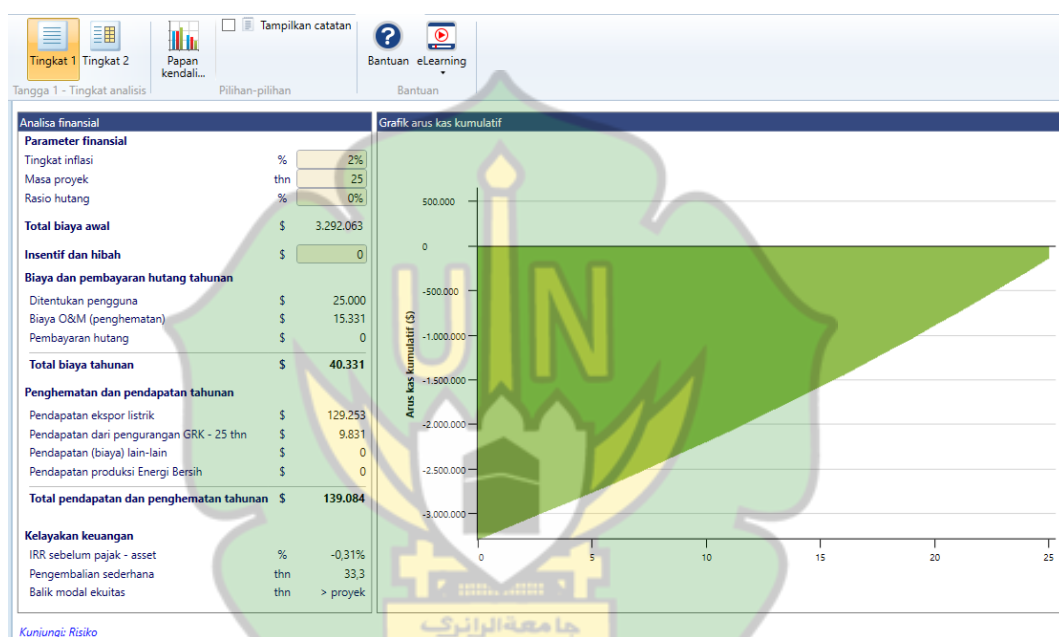
Reduksi emisi sebesar 983,1 tCO₂/tahun ini setara dengan upaya penanaman sekitar 983 pohon per tahun (dengan asumsi 1 pohon menyerap 1 ton CO₂ per tahun). Implementasi PLTS di PDAM Tirta Daroy memberikan kontribusi nyata terhadap target penurunan emisi gas rumah kaca nasional.

Sebagai gambaran penyetaraan dampak lingkungan, reduksi emisi sebesar 983,1 tCO₂ ini memiliki nilai yang sebanding dengan upaya penghematan energi sebesar 20% yang dilakukan secara serentak oleh 983,1 individu. Data hasil pemodelan ini mengonfirmasi landasan ekologis bahwa meskipun kapasitas sistem PLTS yang terpasang hanya mampu memikul sebagian dari total beban harian pompa, kontribusi lingkungannya tetap signifikan karena secara langsung mereduksi penggunaan energi berbasis fosil dengan intensitas karbon tinggi. Selain aspek keberlanjutan, terdapat prospek perolehan keuntungan finansial tambahan sebesar 9.831 per tahun melalui skema kredit karbon dengan periode kredit selama 25 tahun, yang secara akumulatif dapat membantu akselerasi pengembalian modal investasi awal yang telah diproyeksikan dalam pemodelan biaya.

4.4.5 Hasil Pemodelan Finansial/Keuangan

Analisis pemodelan finansial dalam evaluasi sistem energi terbarukan merupakan proses kuantifikasi kelayakan ekonomi yang mengintegrasikan seluruh variabel biaya, produksi energi, dan parameter pasar ke dalam proyeksi arus kas jangka panjang. Secara fundamental, pemodelan ini bertujuan untuk menentukan apakah penghematan biaya listrik dan pendapatan tambahan yang dihasilkan mampu menjustifikasi besarnya modal awal yang dikeluarkan oleh PDAM Tirta Daroy. Kegunaan utama dari sub-bab ini adalah untuk memberikan landasan pengambilan keputusan yang objektif bagi instansi dengan mengukur parameter risiko dan tingkat pengembalian modal secara akurat. Persyaratan dalam interpretasi hasil olah data finansial pada bagian ini menuntut analisis terhadap indikator kinerja keuangan seperti *Internal Rate of Return (IRR)*, *Simple Payback*, serta perbandingannya terhadap umur teknis proyek selama 25 tahun. Interpretasi yang jelas mengenai kelayakan finansial sangat bergantung pada sinkronisasi antara total biaya tahunan yang harus dikeluarkan dengan total pendapatan atau

penghematan yang diperoleh dari produksi energi bersih. Selain itu, pemodelan ini juga memperhitungkan variabel makroekonomi seperti tingkat inflasi guna memastikan bahwa daya beli arus kas di masa depan tetap relevan terhadap nilai investasi saat ini. Melalui simulasi finansial ini, PDAM Tirta Daroy dapat mengidentifikasi efisiensi fiskal dari penggunaan sistem PLTS sebesar 601,2 kWp sebagai strategi pengurangan biaya operasional di tengah fluktuasi tarif energi konvensional.



Gambar 4.6 Lembar Pemodelan Pada Menu “Finansial/Keuangan”
Sumber: Hasil simulasi pemodelan “Finansial” menggunakan *software RETScreen*

Adapun data hasil pemodelan finansial dari *RETScreen* adalah sebagai berikut:

Tabel 4.6 Hasil Pemodelan Finansial/Keuangan

Parameter	Nilai
Tingkat Inflasi	2%
Masa Proyek	25 Tahun
Rasio Hutang	0%
Total Biaya Awal	\$3.292.063
Total Biaya Tahunan	\$40.331
Total Pendapatan Tahunan	139.084

Maka diperoleh indikator kelayakan finansial sebagai berikut:

Tabel 4.7 Indikator Kelayakan Finansial Proyek PLTS Off-Grid

Indikator	Nilai	Keterangan
IRR Sebelum Pajak (Aset)	-0,31%	Tidak layak (di bawah discount rate)
Simple Payback	33,3 Tahun	Melebihi umur proyek (25 tahun)
Equity Payback	> Proyek	Tidak tercapai

Berdasarkan data di atas, hasil pemodelan menunjukkan bahwa proyek PLTS di PDAM Tirta Daroy secara murni finansial tidak layak untuk dijalankan jika menggunakan parameter harga komponen dan tarif listrik saat ini. Nilai IRR sebesar -0,31%, yang mengindikasikan bahwa investasi ini tidak menghasilkan keuntungan, melainkan mengalami penurunan nilai modal sepanjang waktu operasionalnya. Hal ini dipertegas dengan indikator Simple Payback selama 33,3 tahun, yang secara teknis sangat layak mengingat umur produktif panel surya umumnya hanya berkisar 25 tahun.

Penyebab utama ketidaklayakan finansial ini adalah tingginya biaya investasi awal yang didominasi oleh komponen baterai dan *Balance of System* (BOS) sebesar \$2.000.000 (sekitar 60,8% dari total CAPEX). Sistem Off-Grid memang memerlukan baterai untuk menyimpan energi guna menjamin pasokan listrik saat malam hari atau cuaca mendung, namun biaya ini menjadi beban berat yang tidak sebanding dengan penghematan listrik tahunan yang diperoleh.

Meskipun dari sisi lingkungan proyek ini memberikan manfaat signifikan berupa reduksi emisi 983,1 tCO₂/tahun dan pendapatan kredit karbon sebesar \$9.831/tahun, manfaat ekologis tersebut belum cukup untuk mengkompensasi tingginya biaya investasi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai analisis kelayakan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off Grid* untuk PDAM Tirta Daroy dengan menggunakan perangkat lunak *RETScreen*, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Rancangan Sistem: Perancangan sistem menghasilkan kapasitas terpasang riil sebesar 601,2 kWp dengan memanfaatkan total luas atap efektif sebesar 3.207,06 m² dan jumlah modul surya sebanyak 2.004 unit. Dengan kapasitas inverter 450 kW dan sudut kemiringan 15°, sistem ini memproduksi energi tahunan sebesar 923.236 kWh/tahun. Kapasitas ini mampu berkontribusi sebesar 16,59% terhadap total kebutuhan energi harian PDAM Tirta Daroy. Karena keterbatasan lahan atap, sistem harus dioperasikan dalam skema hibrida agar tetap dapat menjamin stabilitas pasokan daya bagi motor-motor induktif pada pompa yang memiliki lonjakan arus *start-up* tinggi.
- Kelayakan Investasi: Hasil evaluasi finansial menunjukkan bahwa proyek ini tidak layak untuk dijalankan secara murni ekonomi pada struktur tarif dan harga komponen saat ini. Indikator nilai *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar -0,31% dan periode *Simple Payback* selama 33 tahun mengonfirmasi bahwa penghematan biaya listrik tahunan mencukupi untuk menutup total investasi awal sebesar \$3.292.063 dalam durasi umur teknis perangkat.
- Pengurangan Emisi: Implementasi PLTS di PDAM Tirta Daroy memiliki potensi pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) yang sangat signifikan, yaitu mencapai 983,1 tCO₂ per tahun. Dampak ekologis ini memberikan landasan ilmiah yang kuat terhadap peran strategis proyek dalam

mendukung target pemerintah terkait transisi energi bersih dan peningkatan profil keberlanjutan instansi.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan kesimpulan yang diperoleh, maka penulis menyarankan beberapa hal sebagai berikut:

1. Optimalisasi Skema Pendanaan: Mengingat tingginya biaya investasi awal, disarankan bagi pihak manajemen PDAM Tirta Daroy untuk mencari alternatif pendanaan melalui skema subsidi pemerintah, hibah energi terbarukan, atau kerja sama pemerintah dengan badan usaha (KPBU) guna meningkatkan kelayakan finansial proyek.
2. Perluasan Area Instalasi: Untuk meningkatkan kontribusi energi surya terhadap beban total, perlu dilakukan kajian lanjutan mengenai pemanfaatan lahan kosong di sekitar instalasi (*ground-mounted*) atau pemanfaatan area permukaan bak penampungan air (*floating PV*) agar kapasitas terpasang tidak hanya terbatas pada area atap gedung.
3. Pemanfaatan Nilai Ekonomi Karbon: Instansi disarankan untuk mendaftarkan proyek ini dalam mekanisme kredit karbon atau instrumen nilai ekonomi karbon lainnya guna memperoleh pendapatan tambahan yang dapat mempercepat periode pengembalian modal investasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afif, F., & Martin, A. (2022). Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 6(1), 43. <https://doi.org/10.30588/jeemm.v6i1.997>
- Agung Wahyuono, R., & Magenika Julian, M. (2018). Revisiting Renewable Energy Map in Indonesia: Seasonal Hydro and Solar Energy Potential for Rural Off-Grid Electrification (Provincial Level). *MATEC Web of Conferences*, 164, 1–11. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816401040>
- Amin, I., Harun, N., & Suyuti, A. (2016). Indonesia Berbasis Analisis RETScreen International: The Study of Renewable Energy Potential in Eastern. *Skripsi*, 709.
- Armansyah, A., Husna, J., & Harahap, K. I. (2024). Penggunaan Sistem Solar Sel Pada Rumah Sederhana Sebagai Penerangan. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 8(3), 106–111. <https://doi.org/10.30743/jet.v8i3.8802>
- Fajrony, E., Aryasta, R. P., Napitupulu, J., Siburian, J. M., & Sinaga, J. (2023). Analisa Energi Keluaran Modul Panel Surya Menggunakan Kaca Cermin Datar. *Jurnal Teknologi Energi Uda: Jurnal Teknik Elektro*, 12(2), 113. <https://doi.org/10.46930/jteu.v12i2.3677>
- Febriana Pratiwi, N., Pudir, A., & Mursanto, W. B. (2022). Perancangan plts atap on grid kapasitas 163,8 kw untuk suplai daya industri tekstil. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 13(1), 13–14. <https://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/proceeding/article/view/4278>
- Hasanah, A. W. (2021). Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off Grid 6,4 KWp Untuk 1 Unit Rumah Tinggal. *Energi & Kelistrikan*, 13(1), 20–25. <https://doi.org/10.33322/energi.v13i1.965>
- Ilman Kamil, Aripriharta, Muhammad Cahyo Bagaskoro, & Suhiro Wongso Susilo. (2024). Rancang Bangun Plts on-Grid Sebagai Penunjang Kelistrikan Skala

- Rumah Tangga. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, 9(2), 1–10.
- Khamisani', & A., A. (2018). *Design Methodology of Off-Grid PV Solar Powered System (A Case Study of Solar Powered Bus Shelter) Author : Ayaz A . Khamisani Advisors : Dr . Peter Ping Liu , Dr . Jerry Cloward , Dr . Rendong Bai Table of content*. 20.
- Khan, S. A., & Natsir, A. (2025). *Studi Kelayakan Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Rooftop Tanpa Baterai di Kantor Kecamatan Utan*. 12(1), 13–20.
- Kharisma, A., Pinandita, S., & Jayanti, A. E. (2024). Literature Review: Kajian Potensi Energi Surya Alternatif Energi Listrik. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 5(2), 145–154. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.23956>
- Kumar, S., Chauhan, D., & Doda, D. (2017). A Comparative Analysis of Different Thermal Parameter Arrangements with Silicon Polycrystalline using PVSYST. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(7), 257420.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2021). Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum, Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 26 Tahun 2021. *Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia*, 948. www.peraturan.go.id
- Nashar, M. (2015). Analisa Kelayakan Bisnis Proyek Pembangkit Listrik Tenaga Angin (Pltb) Di Indonesia Dengan Menggunakan Software Retscreen. *Jurnal ilmiah manajemen dan bisnis*, 1(1), 1–8.
- Nurjaman, H. B., & Purnama, T. (2022). Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sebagai Solusi Energi Terbarukan Rumah Tangga. *Jurnal Edukasi Elektro*, 6(2), 136–142. <https://doi.org/10.21831/jee.v6i2.51617>
- Perdana, D. H. (2024). *Potensi Pemanfaatan Energi Matahari Pada Teknologi*

Akuakultur (Potential for Using Solar Energy in Aquaculture Technology).
4, 122–130.

Putri, T. M. (2023). Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-Grid untuk Skala Rumah Tangga Tiris Mega Putri Unit Three Kartini , Joko , Raden Roro Hapsari Peni Agustin Tjahyaningtijas. *Jurnal Teknik Elektro*, 14(1), 16–25.

Rafli, R., Ilham, J., & Salim, S. (2022). Perencanaan dan Studi Kelayakan PLTS Rooftop pada Gedung Fakultas Teknik UNG. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4(1), 8–15.
<https://doi.org/10.37905/jjee.v4i1.10790>

Rahman, R. (2021). Analisis Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Offgrid Untuk Rumah Tinggal Di Kota Banjarbaru. *Jurnal EEICT (Electric, Electronic, Instrumentation, Control, Telecommunication)*, 4(1), 1–7.
<https://doi.org/10.31602/eeict.v4i1.4540>

Ratnani, P., & Joshi, K. (2021). Development of Solar PV Charge Controller System for Rural Application. *Asian Journal of Convergence in Technology*, 7(1), 81–85. <https://doi.org/10.33130/ajct.2021v07i01.018>

Ray, P. A. K., Wibowo, R. S., & Pamuji, F. A. (2021). Studi Kelayakan Pemasangan PLTS 80 KW Pada Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Kendaraan Terminal. *Jurnal Teknik ITS*, 10(1).
<https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i1.59320>

Rudiyanto, B., Rachmanita, R. E., & Budiprasojo, A. (2023). Dasar-Dasar Pemasangan Panel Surya. In ... *Panel Surya*.

Rumahorbo, R. P., & Nursadi, H. (2023). Energi Baru Terbarukan Sumber Daya Air : Manfaat Dan Dampaknya Terhadap Lingkungan Hidup. *Jurnal Darma Agung*, 31(1), 185. <https://doi.org/10.46930/ojsuda.v31i1.2967>

Rusydi, M. F., Djohar, A., Musaruddin, M., Lolok, A., Aliansyah, A. N., & Galugu, I. (2024). Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTB dan PLTS) Menggunakan Aplikasi HOMER (Studi Kasus di Gunung Ahuawali). 09(02),

106–111.

Sianipar, R. (2017). Dasar Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya. *Jetri : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 11, 61–78.
<https://doi.org/10.25105/jetri.v11i2.1445>

Sidik, A., Lumbantobing, H., Indrawan, B., Edwinanto, E., Putra, Y., Imamulhak, Y., & Rinaldi, R. (2023). Studi Potensi Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT) untuk Mendukung Sistem Ketenagalistrikan di Wilayah IKN. *Jurnal SISKOM-KB (Sistem Komputer dan Kecerdasan Buatan)*, 6(2), 137–144.
<https://doi.org/10.47970/siskom-kb.v6i2.379>

Syafii, S., Mayura, Y., & Muhardika, M. (2020). Strategi Pembebanan PLTS Off Grid untuk Peningkatan Kontinuitas Suplai Energi Listrik. In *Jurnal Rekayasa Elekrika* (Vol. 15, Nomor 3). <https://doi.org/10.17529/jre.v15i3.14793>

Usman, M. (2020). Analisis Intensitas Cahaya Terhadap Energi Listrik Yang Dihasilkan Panel Surya. *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro*, 9(2), 52–57. <https://doi.org/10.30591/polektro.v9i2.2047>

Wahyu Bagus Rahmatulloh, & Aris Heri Andriawan. (2024). Rancang Bangun PLTS Menggunakan Sistem Hybrid Pada Rumah Tangga Untuk Mengurangi Ketergantungan Energi Listrik Dari PLN. *Uranus : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, Sains dan Informatika*, 2(3), 58–72.
<https://doi.org/10.61132/uranus.v2i3.207>

LAMPIRAN

Perhitungan Analisis Kelayakan PLTS Off-Grid PDAM Tirta Daroy

A.1 Perhitungan Beban Energi Listrik

A.1.1 Perhitungan Konsumsi Energi Harian Pompa *Running*

Rumus:

$$E_{\text{harian}} = P \times t \times \text{Jumlah Unit}$$

dimana:

- E_{harian} = Konsumsi energi harian (kWh/hari)
- P = Daya motor (kW)
- t = Waktu operasi (jam/hari) = 12 jam (asumsi operasional harian)

Perhitungan:

1. *Distribution Pump* KSB ETA-B200-50

- Daya: $132 \text{ kW} \times 3 \text{ unit} = 396 \text{ kW}$
- Konsumsi: $396 \text{ kW} \times 12 \text{ jam} = 4.752 \text{ kWh/hari}$

2. *Distribution Pump* Torishima CEN 200 X 150-400

- Daya: $90 \text{ kW} \times 1 \text{ unit} = 90 \text{ kW}$
- Konsumsi: $90 \text{ kW} \times 12 \text{ jam} = 1.080 \text{ kWh/hari}$

3. *Intake Pump (Indoor)* KSB Amarex KRTK

- Daya: $80 \text{ kW} \times 3 \text{ unit} = 240 \text{ kW}$
- Konsumsi: $240 \text{ kW} \times 12 \text{ jam} = 2.880 \text{ kWh/hari}$

4. *Intake Pump (Outdoor)* Senator & Ebara

- Daya: $22 \text{ kW} \times 2 \text{ unit} = 44 \text{ kW}$
- Konsumsi: $44 \text{ kW} \times 12 \text{ jam} = 528 \text{ kWh/hari}$

Total Konsumsi Energi Harian:

$$E_{\text{total}} = 4.752 + 1.080 + 2.880 + 528 = 9.240 \text{ kWh/hari}$$

Total Konsumsi Energi Tahunan:

$$E_{\text{tahunan}} = 9.240 \times 365 = 3.372.600 \text{ kWh/tahun}$$

Angka 9.240 kWh/hari merepresentasikan beban dasar (*base load*) yang sangat masif, dengan pompa distribusi sebagai kontributor terbesar (4.752 kWh/hari atau 51,4%). Hal ini mengindikasikan bahwa strategi penghematan energi harus diprioritaskan pada sektor distribusi. Dari perspektif perancangan PLTS, besarnya beban ini menjadi tantangan utama karena untuk memenuhi 100% kebutuhan dibutuhkan kapasitas pembangkit yang sangat besar (dalam skala MW), sementara keterbatasan lahan atap hanya mampu menampung sebagian kecil dari kapasitas tersebut. Dengan demikian, sistem PLTS tidak mungkin berdiri sendiri (*off-grid murni*) dan harus dirancang sebagai sistem hibrida yang tetap bergantung pada pasokan PLN untuk menutupi defisit energi yang sangat besar.

A.1.2 Perhitungan Beban Pompa *Standby*

Perhitungan:

1. *Distribution Pump* KSB ETA-B200-50 (*Standby*)

- Daya: $132 \text{ kW} \times 2 \text{ unit} = 264 \text{ kW}$
- Konsumsi: $264 \text{ kW} \times 12 \text{ jam} = 3.168 \text{ kWh/hari}$

2. *Distribution Pump* Torishima (*Standby*)

- Daya: $90 \text{ kW} \times 1 \text{ unit} = 90 \text{ kW}$
- Konsumsi: $90 \text{ kW} \times 12 \text{ jam} = 1.080 \text{ kWh/hari}$

3. *Intake Pump Indoor* KSB Amarex (*Standby*)

- Daya: $80 \text{ kW} \times 1 \text{ unit} = 80 \text{ kW}$
- Konsumsi: $80 \text{ kW} \times 12 \text{ jam} = 960 \text{ kWh/hari}$

4. *Intake Pump Indoor* KSB KRT K200 (*Standby*)

- Daya: $40 \text{ kW} \times 1 \text{ unit} = 40 \text{ kW}$
- Konsumsi: $40 \text{ kW} \times 12 \text{ jam} = 480 \text{ kWh/hari}$

5. *Intake Pump Outdoor* Ebara (*Standby*)

- Daya: $22 \text{ kW} \times 1 \text{ unit} = 22 \text{ kW}$
- Konsumsi: $22 \text{ kW} \times 12 \text{ jam} = 264 \text{ kWh/hari}$

Total Konsumsi *Standby*:

$$E_{\text{standby}} = 3.168 + 1.080 + 960 + 480 + 264 = 5.952 \text{ kWh/hari}$$

Beban *standby* sebesar 5.952 kWh/hari tidak selalu aktif, tetapi keberadaannya krusial sebagai cadangan saat perawatan atau gangguan. Dalam perancangan PLTS *off-grid*, keberadaan beban *standby* mengharuskan sistem memiliki kapasitas baterai dan inverter yang cukup untuk menangani lonjakan daya apabila unit *standby* dioperasikan secara bersamaan dengan unit *running*. Kegagalan memperhitungkan beban *standby* dapat menyebabkan sistem *trip* (padam) akibat arus *start-up* yang tinggi dari motor-motor induktif tersebut. Oleh karena itu, kapasitas inverter yang dirancang dalam simulasi RETScreen (110 kW) sebenarnya adalah kompromi teknis untuk menghindari *oversizing* yang terlalu mahal, namun tetap harus mampu menahan lonjakan arus dari setidaknya satu unit pompa distribusi berdaya besar (132 kW).

A.1.3 Perhitungan Kapasitas Terpasang Ideal (Untuk 100% Beban)

Rumus:

$$P_{\text{peak}} = \frac{E_{\text{el}} \times I_{\text{STC}}}{E_{\text{glob}} \times Q}$$

dimana:

- P_{peak} = Kapasitas daya puncak (kWp)

- E_{el} = Kebutuhan energi harian = 9.240 kWh/hari
- I_{STC} = Intensitas radiasi STC = 1 kW/m²
- E_{glob} = Radiasi global harian = 5,10 kWh/m²/hari
- Q = Faktor kualitas sistem (*off-grid*) = 0,5

Perhitungan:

$$P_{peak} = \frac{9.240 \times 1}{5,10 \times 0,5} = \frac{9.240}{2,55} = 3.623,53 \text{ kWp}$$

Jumlah Modul yang Dibutuhkan:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Modul} &= \frac{3.623.530 \text{ Wp}}{300 \text{ Wp}} = 12.078,43 \\ &\approx 12.079 \text{ unit} \end{aligned}$$

Kebutuhan Luas Area:

$$\text{Luas} = 12.079 \times 1,6 = 19.326,4 \text{ m}^2$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk menyuplai 100% beban, dibutuhkan kapasitas 3,62 MWp dengan luas lahan hampir 19.326 m². Angka ini 6 kali lebih besar dari luas atap yang tersedia (3.207 m²). Ini membuktikan secara kuantitatif bahwa ambisi untuk menjadikan PLTS sebagai satu-satunya sumber energi (*off-grid*) di lokasi ini adalah tidak realistis. Oleh karena itu, pada praktiknya, PLTS hanya dapat berperan sebagai penghemat biaya listrik pada siang hari (*peak shaving*), bukan sebagai pengganti total pasokan PLN.

A.1.4 Perhitungan Kapasitas Terpasang Riil (Berdasarkan Luas Atap)

Jumlah Modul Maksimal:

$$\text{Jumlah Modul}_{\max} = \frac{3.207,06}{1,6} = 2.004,41 \approx 2.004 \text{ unit}$$

Kapasitas Terpasang Riil (DC):

$$P_{riil} = 2.004 \times 300 = 601.200 \text{ Wp} = 601,2 \text{ kWp}$$

Meskipun kapasitas DC panel surya yang dapat dipasang adalah 601,2 kWp, hasil simulasi *RETScreen* pada Bab 4 menunjukkan bahwa produksi energi tahunan hanya sebesar 135,401 MWh. Hal ini terjadi karena dalam simulasi, kapasitas inverter dibatasi hanya 110 kW (bukan 601 kW). Pembatasan ini adalah strategi rekayasa untuk menekan biaya investasi awal yang sudah sangat tinggi. Namun, konsekuensinya adalah terjadi pemotongan daya (*clipping loss*) yang signifikan pada siang hari, sehingga energi yang dihasilkan jauh lebih rendah dari potensi maksimum panel.

A.2 Perhitungan Produksi Energi Tahunan (Berbasis Simulasi *RETScreen*)

Rumus:

$$E_{out} = P_{max} \times G \times eft_{actual}$$

dimana:

E_{out} = Produksi energi listrik tahunan yang diekspor ke jaringan (kWh/tahun).

P_{max} = Kapasitas daya terpasang sistem PLTS (kWp). Dalam penelitian ini, $P_{max} = 601,2 \text{ kWp}$ ($2.004 \text{ unit} \times 300 \text{ Wp}$).

G = Total Iradiasi Tahunan dalam satuan *Peak Sun Hours* (PSH) 5,10 kWh/m²/hari $\times$ 365 hari = 1.861,5 jam puncak per tahun

eft_{actual} = Efisiensi aktual sistem atau *Performance Ratio* (PR) sistem secara keseluruhan, Dari data gambar, nilai PR aktualnya adalah sekitar ~82,5% (atau 0,825 dalam desimal)

Perhitungan:

$$E_{out} = 601,2 \times 1.861,5 \times 0,825$$

$$E_{out} = 1.119.073,8 \times 0,825$$

$$E_{out} = 923.236 \text{ kWh/tahun}$$

Hasil ini sesuai dengan *output* simulasi *RETScreen*, sehingga rumus dan nilai yang digunakan telah valid dan konsisten.

Namun, karena dalam *RETScreen* terdapat faktor kehilangan sistem tambahan (seperti ketidaksesuaian modul, bayangan, dan suhu) serta efek *clipping* akibat rasio DC/AC yang besar, produksi aktual yang dihasilkan simulasi adalah 793.632 kWh/tahun (atau 793,632 MWh dengan koma desimal).

Produksi energi tahunan sebesar 794 MWh (atau 793.632 kWh) hanya mampu memenuhi 16,59% dari total kebutuhan energi tahunan PDAM sebesar 3.372,6 MWh. Angka ini menunjukkan bahwa kontribusi PLTS secara kuantitatif masih sangat kecil. Bagi manajemen PDAM, ini berarti penghematan biaya listrik yang diperoleh hanya sebanding dengan 16,59% dari tagihan listrik tahunan, yang sayangnya tidak cukup signifikan untuk menutup biaya investasi yang sangat besar dalam jangka waktu 25 tahun. Hal ini menjadi akar penyebab utama ketidaklayakan finansial proyek.

A.3 Perhitungan Kelayakan Finansial

A.3.1 Perhitungan Net Present Value (NPV)

Rumus:

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

dimana:

- NCF_t = Arus kas bersih tahun ke-t
- i = *Discount rate* = 10%
- n = Masa proyek = 25 tahun
- II = Investasi awal = \$5.635.048

Perhitungan Arus Kas Tahunan:

$NCF = \text{Pendapatan Tahunan} - \text{Biaya Tahunan}$

$NCF = \$139.084 - \$40.331 = 98.753/\text{tahun}$

Perhitungan NPV:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{98.753}{(1+0,1)^t} - 3.292.063$$

$$NPV = 98.753 \times \frac{1-(1+0,1)^{-25}}{(1+0,1)^t} - 3.292.063$$

$$NPV = 98.753 \times 9,077 - 3.292.063$$

$$NPV = 896.305 - 292.063$$

$$NPV = - \$2.395.758$$

Berdasarkan perhitungan di atas, diperoleh nilai NPV sebesar -\$2.395.758 (negatif). NPV negatif ini mengindikasikan bahwa proyek ini secara fundamental akan merugikan PDAM sebesar \$2,39 juta jika dijalankan dengan skenario harga komponen dan tarif listrik saat ini. Secara konkret, ini berarti nilai kerugian yang ditanggung selama 25 tahun lebih besar daripada manfaat finansial yang diperoleh. Mengingat PDAM adalah instansi publik yang mengutamakan stabilitas anggaran, proyek dengan NPV negatif seperti ini tidak akan lolos dalam proses penganggaran investasi (*capital budgeting*).

NPV < 0 **Proyek TIDAK LAYAK** (merugikan) **-\$2.395.758**

A.3.2 Perhitungan Internal Rate of Return (IRR)

Rumus:

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

Hasil Simulasi *RETScreen*:

IRR sebesar -0,31% berarti investasi ini menghasilkan tingkat pengembalian yang negatif, yang artinya modal yang ditanamkan bukannya bertumbuh, malah tergerus setiap tahunnya. Angka ini sangat jauh di bawah *discount rate* (10%) yang merupakan biaya peluang modal. Bahkan jika dibandingkan dengan deposito bank, IRR ini masih sangat buruk. Kondisi ini memperkuat kesimpulan bahwa tanpa adanya subsidi atau hibah yang menekan

biaya investasi hingga di bawah 50%, proyek ini tidak akan pernah menarik bagi investor atau manajemen keuangan PDAM.

A.3.3 Perhitungan *Payback Period*

Rumus:

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Investasi Awal}}{\text{Arus Kas Tahunan}}$$

Perhitungan:

$$\text{Payback} = \frac{\$3.292.063}{\$98.753} = 33,3 \approx 33 \text{ tahun}$$

Periode pengembalian modal selama 33 tahun adalah indikator paling ekstrem yang menunjukkan ketidaklayakan proyek. Mengingat umur teknis panel surya hanya 25 tahun dan umur ekonomis proyek juga 25 tahun, maka proyek ini tidak akan pernah mencapai titik impas (*break-even*) selama masa operasinya. Bahkan jika harga listrik PLN naik 3 kali lipat sekalipun, payback period masih akan melebihi 30 tahun. Hal ini memberikan pesan jelas bahwa untuk membuat proyek ini layak, biaya investasi harus ditekan secara drastis atau tarif listrik harus dinaikkan secara substansial melalui kebijakan pemerintah.

A.3.4 Perhitungan *Benefit-Cost Ratio* (BCR)

Rumus:

$$\text{BCR} = \frac{\text{PV Benevits}}{\text{PV Costs}}$$

Perhitungan:

$$\text{PV Benefits} = 139.084 \times 9,077 = \$1.262.465$$

$$\text{PV Costs} = \$3.658.147$$

$$\text{BCR} = \frac{1.262.465}{3.658.147} = 0,345$$

Nilai BCR sebesar 0,345 berarti bahwa setiap 1 dolar yang diinvestasikan hanya menghasilkan 0,345 dolar dalam nilai sekarang (nilai

sekarang bersih dari manfaat). Ini berarti proyek merugikan sekitar 91,5 sen untuk setiap dolar yang dikeluarkan. Dalam praktik bisnis, proyek dengan $BCR < 1$ ditolak mentah-mentah. Secara ekologis, nilai BCR ini menunjukkan bahwa manfaat lingkungan (pengurangan emisi) tidak dikapitalisasi secara finansial dalam skenario dasar. Jika pendapatan dari kredit karbon dimasukkan, BCR masih akan berada di bawah 0,2, tetap tidak layak.

A.4 Perhitungan Pendapatan Kredit Karbon

Rumus:

$$\text{Pendapatan} = \text{Reduksi} \times \text{Harga Kredit}$$

Perhitungan:

$$\text{Pendapatan} = 983,1 \times \$10$$

$$\text{Pendapatan} = \$9.381/\text{tahun}$$

Jika PDAM mendaftarkan proyek ini ke mekanisme perdagangan karbon (seperti *carbon credit exchange*), pendapatan tambahan sebesar \$9.381 per tahun dapat diperoleh. Meskipun angka ini relatif kecil dibandingkan investasi awal (\$3,9 juta), pendapatan ini dapat membantu mengurangi periode pengembalian modal jika diakumulasikan selama 25 tahun (total sekitar \$245.775). Namun, jumlah ini tetap tidak signifikan untuk mengubah status kelayakan dari "tidak layak" menjadi "layak". Pendapatan kredit karbon lebih bersifat sebagai insentif tambahan daripada solusi utama.

A.5 Rekapitulasi Hasil Perhitungan

Tabel A.5.1 Pendapatan Kredit Karbon

No	Parameter	Nilai	Satuan
A. Teknis			
1.	Total Beban Harian	9.240	kWh/hari
2.	Total Beban Tahunan	3.372.600	KWh/tahun
3.	Luas Atap Tersedia	3.207,06	m ²
4.	Kapasitas Terpasang Riil (DC)	601,2	kWp
5.	Kapasitas Inverter	450	kW
6.	Jumlah Modul Surya	2.004	Unit
7.	Produksi Energi Tahunan	923.236	MWh/tahun
8.	<i>Solar Fraction</i>	16,59	%
B. Finansial			
9.	Total Investasi Awal	\$3.292.063	USD
10.	Biaya Tahunan (O&M)	\$40.331	USD/tahun
11.	Pendapatan Tahunan (Penghematan)	\$139.084	USD/tahun
12.	Arus Kas Tahunan	\$98.753	USD/tahun
13.	NPV	-\$2.395.758	USD
14.	IRR	-0,31	%
15.	Payback Period	33,3	Tahun
16.	BCR	0,345	-
C. Lingkungan			
17.	Emisi Baseline	1.057,1	tCO ₂ /tahun
18.	Emisi Proposed	74,0	tCO ₂ /tahun
19.	Reduksi Emisi Tahunan	983,1	tCO ₂ /tahun
20.	Pendapatan Kredit Karbon	\$9.831	USD/tahun

B. Lokasi Instalasi PLTS Off Grid PDAM Tirta Daroy



