

**SIMULASI PENETRASI PLTS ATAP YAYASAN TUNAS
MANUNGGA KAPASITAS 107 KWP KE *GRID* PLN 20 KV**

LAPORAN TUGAS AKHIR

Laporan ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar S1 pada
Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Sultan Agung



OLEH :

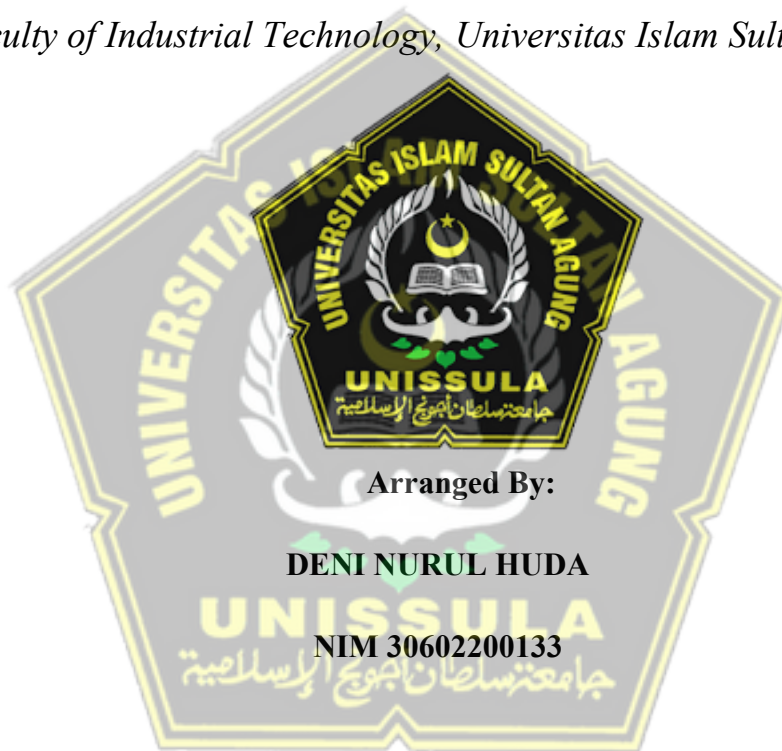
DENI NURUL HUDA

NIM 30602200133

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2025**

FINAL PROJECT
SIMULATION OF 107 KWP ROOFTOP PV PENETRATION AT
YAYASAN TUNAS MANUNGGA TO THE 20 KV PLN GRID

Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (S1)
at Department of Industrial Engineering,
Faculty of Industrial Technology, Universitas Islam Sultan Agung



Arranged By:

DENI NURUL HUDA

NIM 30602200133

MAJORING OF INDUSTRIAL ENGINEERING
INDUSTRIAL ENGINEERING FACULTY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “SIMULASI PENETRASI PLTS ATAP YAYASAN TUNAS MANUNGGA KAPASITAS 107 KWP KE GRID PLN 20 KV” ini disusun oleh:

Nama : Deni Nurul Huda
NIM : 30602200133
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Rabu
Tanggal : 19 Agustus 2025

Pembimbing


Dr. Gunawan, S.T., M.T.
NIDN. 0607117101

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro




Jenniv Putri Hapsari, S.T., M.T.
NIDN. 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “SIMULASI PENETRASI PLTS ATAP YAYASAN TUNAS MANUNGGA KAPASITAS 107 KWP KE GRID PLN 20 KV” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Selasa

Tanggal : 19 Agustus 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT., IPM.

NIDN. 0628086501

Ketua Penguji

Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.

NIDN. 0607018501

Penguji II

Dr. Gunawan, S.T., M.T..

NIDN. 0607117101

Penguji III

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Deni Nurul Huda
NIM : 30602200133
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **"SIMULASI PENETRASI PLTS ATAP YAYASAN TUNAS MANUNGGAL KAPASITAS 107 KWP KE GRID PLN 20 KV"** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Tangerang, Agustus 2025

Yang Menyatakan



Deni nurul Huda

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Deni Nurul Huda
NIM : 30602200133
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“Simulasi Penetrasi PLTS Atap Yayasan Tunas Manunggal Kapasitas 107 kWp Ke Grid Pln 20 kV”** dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

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

Tangerang, 19 Agustus 2025

Yang Menyatakan



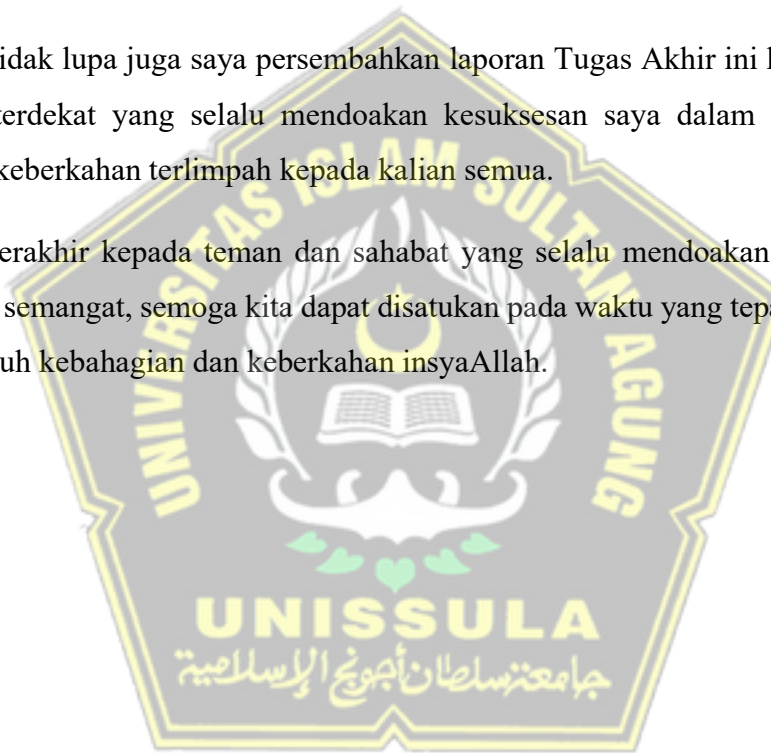
Deni Nurul Huda

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas akhir ini saya persembahkan kepada kedua orang tua, istri dan anak-anak saya, sebagai bukti rasa cinta saya kepada mereka. Bukti bahwa dengan terselesainya laporan Tugas Akhir ini, saya sudah bisa memenuhi kepercayaan kedua orang tua saya selama berkuliah di Universitas Islam Sultan Agung Semarang Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri.

Tidak lupa juga saya persembahkan laporan Tugas Akhir ini kepada keluarga, kerabat terdekat yang selalu mendoakan kesuksesan saya dalam menjalani studi. Semoga keberkahan terlimpah kepada kalian semua.

Terakhir kepada teman dan sahabat yang selalu mendoakan saya dan selalu memberi semangat, semoga kita dapat disatukan pada waktu yang tepat dalam suasana yang penuh kebahagiaan dan keberkahan insyaAllah.



MOTTO

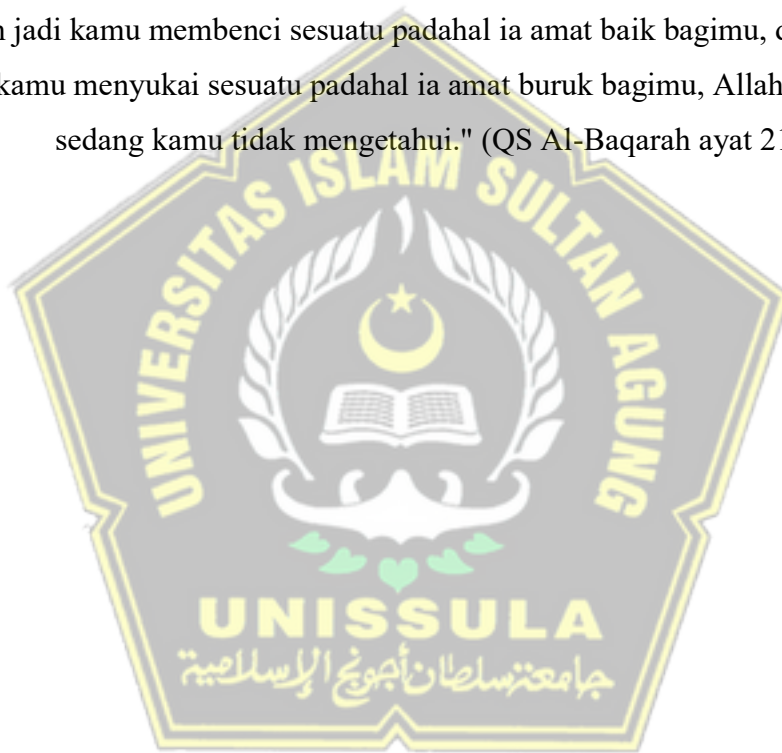
“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

(QS Al Baqarah ayat 286)

"Dan bersabarlah. Sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar."

(Surat Al-Anfal ayat 46)

"Boleh jadi kamu membenci sesuatu padahal ia amat baik bagimu, dan boleh jadi pula kamu menyukai sesuatu padahal ia amat buruk bagimu, Allah mengetahui sedang kamu tidak mengetahui." (QS Al-Baqarah ayat 216)



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, taufiq dan hidayahnya sehingga **Tugas Akhir (TA)** dapat terlaksana dan laporan **Tugas Akhir (TA)** ini dapat terselesaikan. Shalawat serta salam selalu tercurah kepada Rasulullah SAW yang telah memberikan syafaat kepada kita semua.

Laporan Tugas Akhir (TA) dengan Judul “**Simulasi Penetrasi PLTS Atap Yayasan Tunas Manunggal Kapasitas 107 Kwp Ke Grid Pln 20 Kv**” ini ditujukan untuk memenuhi syarat akhir untuk menyelesaikan program studi Strata 1 (S1) Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Agung Semarang.

Penyusunan dan penyelesaian Laporan Tugas akhir (TA) ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan semua pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada

1. Ibu Dr. Ir. Hj. Novi Marlyana, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri UNISSULA.
2. Ibu Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro UNISSULA dan dosen penguji Tugas akhir (TA).
3. Bapak Dr. Gunawan, S.T., M.T. selaku Dosen pembimbing Tugas akhir.
4. Bapak Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT., IPM, selaku dosen penguji Tugas akhir (TA)
5. Segenap Dosen Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi UNISSULA yang sudah memberikan banyak ilmu kepada penulis..
6. Teman-teman Elektro Kelas Mitra yang selalu bersama dan tetap menjaga silaturahmi, kompak dan bahagia.

Dalam penyusunan laporan Tugas akhir (TA) ini tidak luput dari kekurangan, dan oleh karena itu kritik dan saran diperlukan demi kebaikan dan kesempurnaan penyusunan laporan di masa yang akan datang. Semoga Tugas akhir (TA) ini dapat memberikan manfaat bagi banyak orang.

Tangerang, Juli 2025

Penulis



DAFTAR ISI

LAPORAN TUGAS AKHIR	i
FINAL PROJECT	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
SURAT PERNYATAAN.....	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vii
MOTTO.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Pembatasan Masalah	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	6

2.1	Tinjauan pustaka	6
2.2	Landasan Teori.....	7
2.2.1	Kapasitas Jaringan dan Stabilitas Sistem PLN.....	7
2.2.1	Kapasitas Jaringan PLN.....	8
2.2.2	Stabilitas Sistem pada Jaringan listrik	12
2.3	Standar Operasional PLTS dalam Jaringan.....	13
2.4	Lokasi dan Koneksi ke Jaringan.....	15
2.4.1	Pengaruh Lokasi PLTS	15
2.4.2	Penyambungan ke <i>Grid</i>	16
2.5	Permintaan dan Beban Listrik	16
2.5.1	Sinkronisasi Produksi dan Permintaan Energi.....	17
2.5.2	Sistem Penyimpanan Energi.....	17
2.6	Pengelolaan Intermitensi.....	17
2.7	Efisiensi dan Kehilangan Daya	19
2.7.1	Efisiensi Transmisi	20
2.7.2	Maksimalisasi Output	20
2.8	Dampak adanya penetrasi PLTS atap terhadap jaringan PLN	21
2.8.1.	Fluktuasi Daya dan Intermitensi.....	21
2.8.2.	Gangguan Kualitas Daya	21
2.8.3.	Overvoltage (Tegangan Berlebih)	24
2.8.4.	Reverse Power Flow (Aliran Daya Balik)	24
2.8.5.	Koordinasi Proteksi yang Tidak Optimal	25
2.8.6.	Islanding Effect (Islanding Mode).....	26
2.9	Komponen dan Prinsip Kerja Sistem PLTS Terhubung Jaringan.....	27
2.9.1	Current Transformer (CT)	27
2.9.2	Potential Transformer (PT).....	28

2.9.3 kWh Meter Ekspor–Impor.....	28
2.9.4 Inverter.....	29
BAB III METODE PENELITIAN.....	30
3.1 Metode Penelitian.....	30
3.1.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	30
3.1.2 Alat Penelitian.....	31
3.2 Metode Pengumpulan Data.....	31
3.2.1 Metode Studi <i>Literature</i>	31
3.2.2 Metode Observasi Non-Partisipasi.....	31
3.3 Tahapan penelitian.....	31
3.4 Studi pustaka.....	33
3.5 Pengumpulan data.....	33
3.6 Teknik Analisa Data.....	36
BAB IV DATA DAN ANALISA.....	37
4.1 Data kondisi Beban PT Yayasan Tunas Manunggal.....	37
4.2 Analisa Perbandingan Daya.....	41
4.3 Analisa Tegangan.....	44
4.4 Analisa THD Tegangan (THD V).....	47
4.5 Analisa THD Arus (THD I).....	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	51
5.1 KESIMPULAN.....	51
5.2 SARAN.....	52
DAFTAR PUSTAKA.....	53
CURRICULUM VITAE.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem penyaluran tenaga listrik	8
Gambar 3. 1 Lokasi yayasan Tunas Manunggal	30
Gambar 3. 2 Diagram alir tahapan penelitian	32
Gambar 3. 3 Titik pengukuran yayasan tunas manunggal	34
Gambar 3. 4 Tampilan aplikasi PQM	35
Gambar 4. 1 Grafik perbandingan daya kontrak, beban puncak pelanggan dan kapasitas maks PLTS atap.....	38
Gambar 4. 2 Beban harian hari kerja (<i>weekday</i>).....	40
Gambar 4. 3 Grafik perbandingan daya hari kerja (<i>weekday</i>)	43
Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan daya saat hari libur (<i>weekend</i>)	44
Gambar 4. 5 Grafik perbandingan Nilai tegangan ketika weekend	46
Gambar 4. 6 Grafik perbandingan Nilai tegangan ketika weekday	47
Gambar 4. 7 perbandingan Nilai THD tegangan (THD V).....	48
Gambar 4. 8 Grafik perbandingan Nilai THD arus (THD I) pada hari kerja (<i>weekday</i>)	49
Gambar 4. 9 Grafik perbandingan Nilai THD arus (THD I) pada hari libur (<i>weekend</i>)	49

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 data beban puncak dan energi bulanan	37
Tabel 4. 2 Perbandingan Beban harian hari kerja (<i>weekday</i>) dan hari libur (<i>weekend</i>)	41
Tabel 4. 3 Data pengukuran arus tegangan, arus dan cosphi pada PQM.....	41
Tabel 4. 4 Data pengukuran tegangan pada PQM	45
Tabel 4. 5 Hasil analisa PLTS atap Yayasan Tunas Manunggal	50



ABSTRAK

Seiring perubahan regulasi PLN minat pengajuan ijin PLTS Atap dengan system On Grid cukup banyak karena biaya perangkat yang semakin murah. Yayasan Tunas Manunggal memiliki 107 KWp daya kontrak ke PLN sebesar 865 KVA yang di suplai dari Gardu PLN PJ096. Problem utama energi terbarukan adalah intermittensi karena karakteristik sumber energi primernya, dimana PLTS dihadapkan pada intensitas penyinaran matahari. Pola pembebanan juga memiliki kontribusi pada kemampuan PLTS mensuplai beban untuk memenuhi target kontraknya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas dan keandalan penyaluran tenaga listrik saat terjadi dinamikan beban mingguan. Metode yang digunakan membaca trend perubahan beban saat weekday dan weekend dimana merupakan faktor krusial yang mempengaruhi faktor daya, harmonic dan arah aliran daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi berbeban (weekday) tidak terjadi *reverse power* dan kualitas jaringan dalam keadaan baik. Saat kondisi tanpa beban (weekend), terjadi *reverse power* ke jaringan PLN mulai jam 07.22 sampai dengan jam 15.07 dengan nilai paling tinggi sebesar 65.540 watt pada jam 12.28. *Reverse power* ke jaringan PLN menyebabkan peningkatan Total Harmonic Distortion arus (THD I) dari THD rata- rata ketika hari libur sebesar 19.88% menjadi 31.11 %. Untuk parameter lainnya seperti tegangan, dan THD tegangan masih dalam batas normal sesuai standar (tidak terganggu).

Kata Kunci: PLTS atap, *Load profile*, *reverse power*

ABSTRACT

Along with changes in PLN regulations, the demand for rooftop solar PV (PLTS) permit applications under on-grid systems has increased due to the decreasing cost of equipment. Yayasan Tunas Manunggal has installed a 107 kWp rooftop solar PV system with a contractual power of 865 kVA supplied from PLN Substation PJ096. One of the main challenges of renewable energy is intermittency due to the characteristics of its primary energy source, where solar PV depends on sunlight intensity. The load pattern also significantly affects the PV system's ability to supply loads to meet its contractual targets. This study aims to evaluate the power quality and reliability of electricity supply during weekly load dynamics. The method involves analyzing the load trend variations during weekdays and weekends, which critically affect the power factor, harmonics, and power flow direction. The results show that during weekday conditions, no reverse power occurs, and the grid quality remains stable. During weekend conditions, reverse power flow to the PLN grid occurs between 07:22 and 15:07, with the highest reverse power recorded at 65.540 watts at 12:28. The occurrence of reverse power flow to the PLN grid led to a notable increase in current Total Harmonic Distortion (THD-I), rising from an average value of 19.88% (recorded during holidays) to 31.11%. In contrast, other power quality parameters, such as voltage magnitude and voltage THD, remained within acceptable limits as per the relevant standards and were not significantly impacted.

Keywords: solar PV, load profile, reverse power.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem distribusi listrik terdiri dari beberapa tahapan yang penting dalam proses penyediaan listrik kepada konsumen akhir. Tahap pertama adalah distribusi dari gardu induk distribusi ke gardu distribusi primer. Gardu distribusi primer berperan dalam mengubah tegangan listrik tinggi dari gardu induk menjadi tegangan yang lebih rendah, yang lebih sesuai untuk disalurkan ke wilayah yang lebih luas seperti kota atau daerah. Hal ini sesuai dengan konsep bahwa "sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan listrik dari gardu induk distribusi ke pusat-pusat beban (Jaya & Ashad, 2020)".

Selanjutnya, sistem distribusi sekunder berperan dalam menyalurkan listrik dari gardu distribusi primer ke konsumen akhir. Gardu distribusi sekunder mengurangi tegangan lebih lanjut sehingga listrik dapat disalurkan secara aman ke rumah-rumah, bisnis, dan fasilitas lainnya di tingkat local (Rosyadi et al., 2018).

Menjaga jaringan distribusi tenaga listrik yang baik sangat penting untuk memastikan pasokan listrik yang stabil dan aman bagi konsumen . Jaringan distribusi yang rusak atau tidak terawat dapat menyebabkan gangguan pasokan listrik, bahkan kebakaran dan ledakan . Hal ini sesuai dengan data laporan gangguan PLN UP3 Teluknaga bulan Januari tahun 2024 sampai bulan Mei 2024 terdapat 24 gangguan gardu yang diakibatkan kondisi jaringan distribusi yang tidak terawat.

Oleh karena itu, perawatan dan pemeliharaan jaringan distribusi harus dilakukan secara berkala . Strategi perawatan yang efektif dapat meningkatkan *reliabilitas* jaringan distribusi dengan mengidentifikasi dan memperbaiki masalah secara proaktif sebelum menyebabkan gangguan besar (Ravaghi Ardabili et al., 2021).

Saat ini, sudah banyak pengajuan pemasangan PLTS atap yang menggunakan sistem *on grid* dengan jaringan PLN. Pemasangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap dengan sistem *on grid* semakin meningkat sebagai solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap pasokan listrik dari jaringan PLN. Meskipun memiliki banyak manfaat seperti penghematan energi dan reduksi emisi karbon, peningkatan jumlah PLTS atap dapat berpotensi mempengaruhi keandalan jaringan PLN 20 kV serta kualitas daya yang disediakan kepada pengguna akhir.

Variabilitas daya yang dihasilkan oleh PLTS bisa terjadi secara cepat. Ketika sinar matahari terhalang oleh awan atau hujan, produksi listrik bisa menurun secara tiba-tiba, menyebabkan ketidakstabilan jaringan. Variasi dalam intensitas radiasi matahari dapat menyebabkan fluktuasi dalam output daya dari PLTS, yang dapat mengganggu keseimbangan antara pasokan dan permintaan daya dalam jaringan (Yin et al., 2020).

Salah satu parameter dari stabilitas jaringan adalah fluktuasi tegangan, maka Tegangan yang dihasilkan oleh PLTS harus berada dalam batasan yang sesuai dengan spesifikasi jaringan untuk menghindari kerusakan pada peralatan listrik dan memastikan efisiensi dalam distribusi energi (IEEE Std 1547-2003, 2003).

Selain itu, pertumbuhan pesat instalasi PLTS atap menyebabkan adanya fenomena aliran daya balik (*reverse power flow*), dimana daya yang dihasilkan oleh sistem dapat melebihi konsumsi lokal dan mengalir kembali ke jaringan listrik utama (Alam et al., 2014). Fenomena ini sering terjadi pada waktu siang hari, ketika produksi energi surya mencapai puncaknya. adanya *reverse power* dapat mempengaruhi faktor daya ($\cos \phi$) karena peningkatan sumber daya dari PLTS atap yang biasanya memiliki karakteristik daya aktif dan reaktif tertentu.

Jika PLTS atap tidak dilengkapi dengan fitur pengaturan daya reaktif, maka besar kemungkinan akan terjadi ketidakseimbangan antara daya aktif dan reaktif di jaringan (Barrero-González et al., 2019). Jika PLTS hanya menghasilkan daya aktif tanpa mengelola daya reaktif, maka faktor Daya jaringan cenderung menjadi menurun

(menjadi lebih dekat ke nol), yang dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya dan beban pada sistem proteksi (Chandra, 2019).

Selain itu, Pada sistem PLTS atap terdapat sebuah alat yaitu inverter. Inverter berperan penting dalam mengubah arus searah (DC) yang dihasilkan oleh panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang sesuai dengan standar jaringan listrik utama (Harmini, 2020). Namun, proses konversi dari DC ke AC pada inverter PLTS atap ini tidak sempurna dan dapat menghasilkan distorsi harmonik (Kurniawan et al., 2022). Harmonik adalah komponen frekuensi tambahan yang bukan frekuensi utama (fundamental), dan biasanya muncul karena ketidaksempurnaan rangkaian inverter serta metode kontrol yang digunakan (Budiman & Ramadhani, 2018) .

Dari beberapa tinjauan pustaka diatas, maka peneliti tertarik melakukan analisa tentang dampak adanya penetrasi PLTS atap di yayasan Tunas Manunggal kapasitas 107 Kwp yang terhubung dengan jaringan PLN dengan daya kontrak sebesar 865 Kva. Penelitian ini bertujuan untuk menjaga kualitas jaringan PLN dalam rangka menjaga mutu dan keandalan penyaluran tenaga listrik ke Yayasan Tunas Manunggal dan kawasan sekitar.

Parameter yang akan dianalisa yaitu terkait aliran daya terkait *reverse power*, *cosphi*, fluktuasi tegangan, dan harmonisa arus dan harmonisa tegangan dengan membandingkan kondisi berbeban dan tanpa beban di pelanggan tersebut pada kondisi PLTS atap beroperasi untuk mengetahui dampak dari adanya penetrasi PLTS atap ke jaringan PLN

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana kondisi aliran daya (*power flow*) pada sistem kelistrikan Yayasan Tunas Manunggal ketika PLTS atap beroperasi pada hari kerja (*weekday*) dan hari libur (*weekend*), khususnya terkait kemungkinan terjadinya *reverse power* ke jaringan PLN?

2. Seberapa besar nilai *reverse power* yang terjadi pada saat beban rendah (*weekend*), dan bagaimana perbandingannya terhadap kapasitas PLTS atap serta daya kontrak pelanggan?
3. Bagaimana pengaruh operasi PLTS atap terhadap tegangan sistem pada kondisi *weekday* dan *weekend*, serta apakah perubahan tegangan tersebut masih berada dalam batas aman sesuai standar?
4. Bagaimana pengaruh penetrasi PLTS atap terhadap *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan dan arus, baik pada kondisi berbeban (*weekday*) maupun tidak berbeban (*weekend*)?
5. Apa implikasi kenaikan THD arus yang signifikan ketika terjadi *reverse power* pada kondisi beban rendah (*weekend*) terhadap kualitas daya dan keandalan jaringan PLN?

1.3 Pembatasan Masalah

1. Pengukuran dampak penetrasi PLTS atap dilakukan dengan kondisi perbandingan ketika sebelum PLTS atap beroperasi dan sesudah PLTS atap beroperasi menggunakan power quality meter pada waktu hari kerja (*weekday*) dan hari libur (*weekend*)

1.4 Tujuan

1. Menganalisa dampak penetrasi PLTS atap Yayasan tunas manunggal ke jaringan PLN 20 kV terhadap kualitas daya seperti tegangan.
2. Mengukur dan membandingkan harmonisa pada jaringan PLN 20 kV sebelum PLTS atap beroperasi dan sesudah beroperasi menggunakan alat *Power Quality Meter*.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penulisan Tugas Akhir ini adalah untuk menambah wawasan dari penulis tentang analisa dampak penetrasi PLTS atap terhadap jaringan PLN.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I : PENDAHULUAN

Dalam bab ini berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan tugas akhir, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Pada bab ini membahas tinjauan pustaka, dasar teori tentang kapasitas jaringan dan stabilitas system PLN, standar operasional PLTS dalam jaringan, Lokasi dan koneksi ke jaringan, permintaan dan beban Listrik, pengelolaan intermitensi, efisiensi dan kehilangan daya serta dampak penetrasi PLTS atap terhadap jaringan PLN.

BAB III : METODE PENELITIAN

Bab ini membahas tentang metode penelitian, tahapan penelitian, studi pustaka, pengumpulan data, dan Teknik Analisa data.

BAB IV : DATA DAN ANALISA

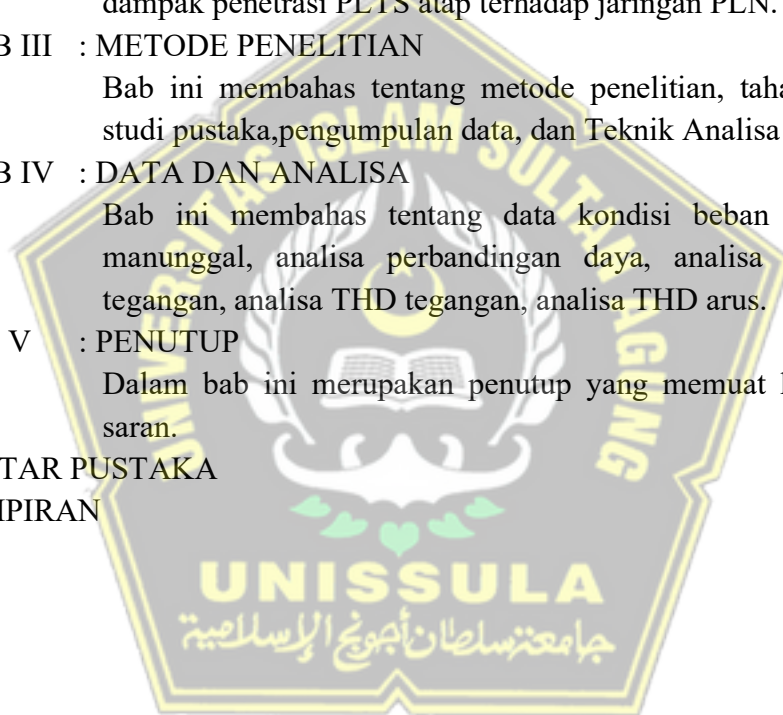
Bab ini membahas tentang data kondisi beban Yayasan tunas manunggal, analisa perbandingan daya, analisa cosphi, analisa tegangan, analisa THD tegangan, analisa THD arus.

BAB V : PENUTUP

Dalam bab ini merupakan penutup yang memuat kesimpulan dan saran.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan pustaka

Penelitian mengenai integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ke dalam sistem distribusi telah banyak dilakukan baik di Indonesia maupun luar negeri. Beberapa hasil penelitian terdahulu menjadi dasar dan pembanding dalam studi ini. Penelitian terkait Integrasi PLTS terhadap Sistem Distribusi menurut (Kundur, 1994), integrasi pembangkit energi terbarukan ke sistem distribusi dapat memengaruhi stabilitas sistem, kualitas daya, dan koordinasi proteksi.

Penelitian Dampak terhadap Reverse Power Flow oleh (Sutanto et al., 2020) menunjukkan bahwa pada saat beban rendah, PLTS atap berpotensi menyebabkan *reverse power flow* ke jaringan distribusi. Kondisi ini dapat menimbulkan masalah proteksi apabila tidak diantisipasi dengan baik. Studi lain oleh (Rahman et al., 2019) menyebutkan bahwa besarnya daya balik tergantung pada kapasitas PLTS, profil beban, dan kondisi operasional jaringan.

Penelitian serupa terkait Integrasi PLTS atap dapat menimbulkan kenaikan tegangan (*overvoltage*) pada sisi pelanggan maupun jaringan distribusi. Menurut (Wijaya, 2018), kenaikan tegangan masih dapat ditoleransi selama berada dalam batas standar SPLN dan IEEE 519. Hasil simulasi (Putra, 2021) menunjukkan bahwa penetrasi PLTS kapasitas kecil hingga menengah tidak menimbulkan kenaikan tegangan signifikan jika sistem distribusi memiliki kapasitas cukup besar.

Penelitian terkait analisis harmonik merupakan salah satu isu utama dalam penetrasi PLTS yang menggunakan inverter. Penelitian oleh (Rashid, 2015) menjelaskan bahwa inverter dapat menghasilkan harmonisa orde tinggi yang memengaruhi kualitas daya. Sedangkan penelitian (Iskandar et al., 2022) menemukan bahwa penetrasi PLTS atap

menyebabkan kenaikan THD arus terutama saat kondisi beban rendah, sedangkan THD tegangan umumnya masih dalam batas aman.

Adapun studi terkait di Indonesia, sudah dilakukan beberapa penelitian. (Pratama, 2020) menganalisis integrasi PLTS atap 100 kWp pada jaringan distribusi 20 kV dan menemukan adanya potensi *reverse power* pada saat beban minimum. (Nugroho, 2021) melakukan studi pada PLTS 80 kWp dan menyimpulkan bahwa THD tegangan masih di bawah 5%, namun THD arus dapat meningkat signifikan ketika terjadi aliran daya balik.

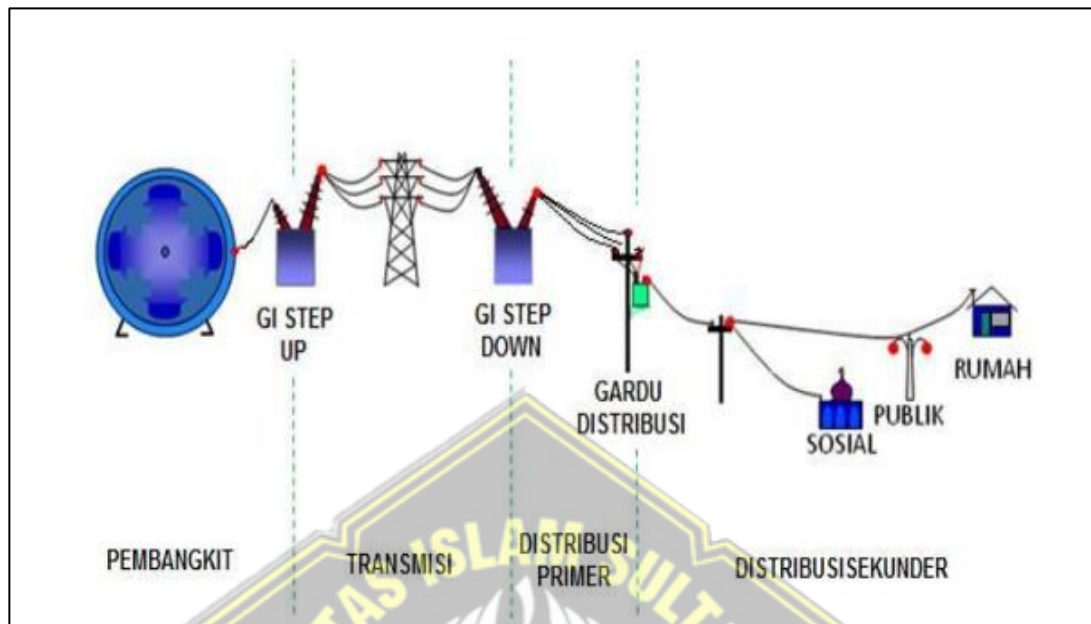
Dari berbagai penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa isu utama integrasi PLTS meliputi *reverse power flow*, kualitas daya (harmonik, tegangan), serta stabilitas sistem. Namun, masih terbatas penelitian yang secara spesifik menganalisis penetrasi PLTS atap kapasitas 107 kWp pada pelanggan dengan daya kontrak 865 kVA di jaringan distribusi 20 kV, khususnya menggunakan pengujian secara langsung ke lokasi menggunakan alat *power quality meter (PQM)*. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kekosongan tersebut.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Kapasitas Jaringan dan Stabilitas Sistem PLN

Sistem tenaga listrik adalah rangkaian dalam ketenagalistrikan yang fungsinya menyalurkan tenaga listrik dari pembangkit tenaga listrik ke konsumen tenaga listrik (Kementrian ESDM, 2024).

Sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa bagian yaitu pembangkitan, saluran transmisi dan distribusi. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator kemudian didistribusikan melalui sistem transmisi dan distribusi kemudian sampai ke beban pelanggan.



Gambar 2. 1 Sistem penyaluran tenaga listrik (Artema, 2020)

Sistem tenaga listrik memang perlu fokus pada kapasitas jaringan dan stabilitas sistem. Kapasitas jaringan dan stabilitas sistem merupakan faktor kunci dalam memastikan listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik, baik konvensional maupun terbarukan (misalnya PLTS), didistribusikan ke konsumen secara efisien dan aman.

2.2.1 Kapasitas Jaringan PLN

Sistem tenaga listrik sangat perlu memperhatikan kapasitas jaringan. Kapasitas Jaringan mengacu pada kemampuan sistem transmisi listrik untuk mengalirkan daya dari pembangkit ke konsumen. PLTS, sebagai pembangkit energi terbarukan, menghasilkan listrik yang perlu disalurkan melalui jaringan transmisi. Jika kapasitas jaringan tidak mencukupi, beberapa masalah dapat muncul, seperti overloading atau ketidakmampuan untuk menyalurkan daya secara efisien.

Berikut beberapa alasan pentingnya memperhatikan kapasitas jaringan:

1. Menghindari Overloading

Jika kapasitas jaringan tidak mencukupi, daya listrik yang dihasilkan tidak dapat disalurkan dengan optimal dan dapat menyebabkan overloading, yang mengakibatkan terjadi peningkatan susut, penurunan kualitas sistem, hingga terjadinya gangguan dan pemadaman bergilir (Samsurizal & Hadinoto, 2020). Overloading atau kelebihan beban terjadi ketika jumlah daya yang dialirkan melebihi kapasitas maksimal jaringan transmisi atau distribusi.

kehadiran PLTS, dapat memengaruhi stabilitas dan kualitas sistem tenaga. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis beberapa parameter teknis penting seperti Aliran Daya balik (*Reverse Power Flow*). PLTS yang menghasilkan daya aktif melebihi kebutuhan lokal dapat menyebabkan aliran daya balik (*reverse power*) ke jaringan utama PLN. Fenomena ini dapat mempengaruhi kerja transformator (misalnya meningkatkan rugi-rugi atau overload), menyebabkan pengoperasian proteksi menjadi tidak sesuai arah arus, serta memerlukan penyesuaian sistem proteksi dan koordinasinya.

Penetrasi tinggi PLTS pada jaringan tegangan rendah dapat menyebabkan aliran daya balik ke transformator distribusi. Hal ini berpotensi menyebabkan kelebihan beban (overload), peningkatan rugi-rugi daya, dan penurunan umur teknis transformator. Simulasi penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pada tingkat penetrasi PLTS sebesar 88,3%, terjadi aliran daya balik yang signifikan, dengan batas beban balik transformator mencapai 78,04 kVA atau 24,77% dari kapasitasnya (Majeed & Nwulu, 2022). Persamaan dasar aliran daya:

$$P = V \times I \times \cos \pi \dots\dots\dots \text{ dan } Q = V \times I \times \sin \pi \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

P : Daya Aktif (Watt)

Q : Daya Reaktif (Var)

V : Tegangan (Volt)

I : Arus (Ampere)

$\cos \Omega$: Faktor Daya

2. Efisiensi Penyaluran Daya

Jika kapasitas jaringan tidak mencukupi, meskipun daya listrik dihasilkan dalam jumlah besar, daya tersebut tidak dapat disalurkan dengan efisien ke pengguna akhir. Hal ini dapat menyebabkan kerugian daya (losses) yang tinggi selama proses transmisi dan distribusi.

Salah satu bentuk kerugian daya yang paling umum dalam sistem transmisi adalah losses yang dinyatakan dalam rumus :

$$P_{\text{loss}} = I^2 \times R \dots\dots\dots (2.2)$$

losses I^2R , di mana kehilangan daya listrik selama transmisi bergantung pada besarnya arus listrik (I) dan resistansi (R) pada saluran transmisi. Jika daya listrik yang disalurkan melebihi kapasitas jaringan, resistansi saluran akan meningkat, menyebabkan peningkatan panas yang dibuang, sehingga efisiensi penyaluran listrik menurun secara signifikan.

Pendekatan modern yang dapat diterapkan untuk meningkatkan kapasitas dan keandalan jaringan tenaga listrik:

1. Pembangunan dan Peningkatan Infrastruktur Jaringan

Pembangunan Saluran Transmisi Baru merupakan salah satu cara paling langsung untuk mengatasi keterbatasan kapasitas adalah membangun saluran transmisi baru yang lebih kuat dan lebih efisien. Pembangunan jalur transmisi berbasis High Voltage Direct Current (HVDC) kini semakin populer karena memiliki efisiensi yang lebih tinggi untuk jarak jauh dan kapasitas daya yang lebih besar dibandingkan

saluran AC konvensional. HVDC cocok untuk kapasitas besar dan jarak panjang, dengan biaya lebih rendah dan kapasitas transmisinya lebih tinggi dibanding HVAC setelah jarak breakeven $\pm 150\text{--}200$ km (untuk sistem 400–500 MW) (Li et al., 2021)

2. Integrasi Jaringan Pintar (Smart Grid)

Smart Grid adalah salah satu inovasi paling signifikan dalam mengatasi keterbatasan kapasitas jaringan modern. Teknologi ini memungkinkan pemantauan dan pengelolaan energi secara real-time, meningkatkan efisiensi jaringan, dan mendukung integrasi pembangkit energi terbarukan. Smart grid mampu mengidentifikasi dan mengatasi kemacetan jaringan, menyeimbangkan beban, serta merespons permintaan daya secara otomatis (Lund et al., 2022). Selain itu, dengan dukungan kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin, smart grid dapat memprediksi kebutuhan daya dan menyesuaikan penyaluran daya secara proaktif.

3. Penyimpanan Energi Terdistribusi dan battery Energy Storage Systems (BESS)

memainkan peran penting dalam menjaga stabilitas jaringan saat kapasitas transmisi terbatas. Sistem penyimpanan energi seperti BESS dapat menyimpan energi saat produksi berlebih dan mendistribusikannya ketika permintaan lebih tinggi atau ketika jaringan mengalami kemacetan. Penyimpanan terdistribusi memungkinkan pengelolaan energi lebih fleksibel, membantu meredam fluktuasi dari sumber energi terbarukan seperti PLTS, dan mengurangi beban pada jaringan transmisi selama periode permintaan tinggi

4. Manajemen Permintaan Listrik (Demand-Side Management)

Demand-Side Management (DSM) memungkinkan pengelola sistem tenaga listrik mengendalikan permintaan energi dari pengguna akhir selama periode puncak. Dengan adanya DSM, konsumen dapat diatur untuk menunda atau mengurangi konsumsi energi selama jam puncak, yang membantu meratakan beban pada jaringan dan mengurangi tekanan pada kapasitas. DSM dapat dilakukan melalui

insentif harga dinamis, seperti tarif waktu penggunaan (Time of Use - TOU), yang memberikan insentif ekonomi kepada konsumen untuk mengubah pola konsumsi energi mereka.

2.2.2 Stabilitas Sistem pada Jaringan listrik

Stabilitas sistem tenaga listrik mengacu pada kemampuan sistem untuk mempertahankan kondisi operasi yang stabil meskipun terjadi gangguan atau fluktuasi dalam penyaluran daya (Kundur et al., 2004) menekankan pentingnya menjaga stabilitas dinamis dan stabilitas tegangan dalam jaringan yang terintegrasi dengan PLTS. Stabilitas ini melibatkan beberapa dimensi:

- Stabilitas Tegangan: Kemampuan sistem untuk menjaga tegangan dalam batas yang aman, menghindari penurunan tegangan yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan (Kundur et al., 2004)
- Stabilitas Frekuensi: Kemampuan sistem untuk mempertahankan frekuensi operasi yang stabil, mencegah gangguan pada peralatan dan sistem distribusi (Kundur et al., 2004)
- Stabilitas Dinamis: Kemampuan sistem untuk mengatasi gangguan transien dan kembali ke operasi normal dalam waktu yang wajar (Kundur et al., 2004)

Stabilitas sistem pada jaringan listrik yang terintegrasi dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan tantangan utama karena sifat intermiten dari PLTS. Variabilitas daya yang dihasilkan oleh PLTS bisa terjadi secara cepat. Ketika sinar matahari terhalang oleh awan atau hujan, produksi listrik bisa menurun secara tiba-tiba, menyebabkan ketidakstabilan jaringan. Variasi dalam intensitas radiasi matahari dapat menyebabkan fluktuasi dalam output daya dari PLTS, yang dapat mengganggu keseimbangan antara pasokan dan permintaan daya dalam jaringan (Yin et al., 2020).

Selain itu, PLTS tidak menghasilkan listrik di malam hari dan menghasilkan lebih sedikit daya pada hari berawan, sehingga ketersediaan listrik dari PLTS sangat bergantung pada kondisi lingkungan. Hal ini menyebabkan ketidakpastian pasokan energi, yang menambah beban pada sistem untuk menjaga kestabilan. Ketergantungan pada kondisi cuaca membuat PLTS tidak dapat menghasilkan daya secara konsisten sepanjang waktu, yang berpotensi menyebabkan periode kekurangan daya jika tidak dikelola dengan baik.

Menjaga stabilitas jaringan tenaga listrik sangat penting karena beberapa alasan utama yaitu:

- Keandalan Pasokan Energi: Stabilitas jaringan memastikan kontinuitas pasokan energi kepada konsumen, mengurangi risiko pemadaman listrik yang dapat mempengaruhi kehidupan sehari-hari dan operasi bisnis.
- Perlindungan Peralatan: Tegangan dan frekuensi yang stabil melindungi peralatan listrik dari kerusakan akibat fluktuasi yang tidak terkendali, memperpanjang umur peralatan dan mengurangi biaya perawatan.
- Keselamatan Sistem: Stabilitas jaringan mengurangi risiko keselamatan terkait dengan gangguan sistem, termasuk potensi risiko kebakaran dan kerusakan infrastruktur.

2.3 Standar Operasional PLTS dalam Jaringan

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang terhubung ke jaringan harus mampu beroperasi sesuai dengan standar frekuensi dan tegangan yang berlaku:

1. Frekuensi: Jaringan listrik di berbagai negara umumnya beroperasi pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz. Standar ini penting agar sistem dapat berfungsi dengan baik dan tidak menyebabkan interferensi dengan peralatan lain yang terhubung ke jaringan. Stabilitas frekuensi sangat penting untuk kelancaran operasi sistem kelistrikan, dan penyimpangan dari nilai yang seharusnya dapat menyebabkan masalah operasional yang signifikan.

Tabel 2. 1 Batas rentang frekuensi operasi (Kementrian ESDM, 2020)

Rentang Frekuensi	Rentang Waktu Operasi
$51,50 \text{ Hz} < f \leq 52,00 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 15 menit
$51,00 \text{ Hz} < f \leq 51,50 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
$49,00 \text{ Hz} \leq f \leq 51,00 \text{ Hz}$	Beroperasi secara terus-menerus
$47,50 \text{ Hz} < f < 49,00 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
$47,00 \text{ Hz} < f \leq 47,50 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 6 detik

Selanjutnya, inverter berfungsi penting dalam konversi arus searah (DC) dari PLTS menjadi arus bolak-balik (AC). Inverter yang tidak memenuhi spesifikasi teknis dapat menyebabkan masalah kestabilan frekuensi. Kesesuaian inverter dengan standar teknis menjadi sangat penting untuk menjaga frekuensi dan tegangan dalam jaringan agar tetap stabil. (Yongning et al., 2019)

2. Tegangan: Tegangan yang dihasilkan oleh PLTS harus berada dalam batasan yang sesuai dengan spesifikasi jaringan untuk menghindari kerusakan pada peralatan listrik dan memastikan efisiensi dalam distribusi energi. Tegangan dalam jaringan juga perlu dikelola dengan baik. Pengaturan tegangan yang tidak tepat dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan dan kegagalan sistem. Oleh karena itu, teknologi inverter harus mampu menyesuaikan output sesuai dengan kebutuhan jaringan. Sistem kontrol yang canggih dalam inverter memungkinkan penyesuaian real-time terhadap fluktuasi tegangan.

Tabel 2. 2 Batas tegangan nominal (Kementrian ESDM, 2020)

Tegangan Nominal	Kondisi normal
500 k V	+5%, -5%
275 k V	+5%, -5%
150 k V	+5%, -10%

66 k V	+5%, -10%
20 k V	+5%, -10%

Inverter berperan penting dalam mengubah arus searah (DC) yang dihasilkan oleh panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang sesuai dengan standar jaringan listrik utama (Harmini, 2020)

Inverter tidak hanya mengubah aliran arus, tetapi juga mengatur kualitas listrik yang dihasilkan, termasuk tegangan dan arus. frekuensi sehingga keluarannya sesuai dengan standar jaringan.

Sistem PLTS dapat beroperasi secara efisien dan tanpa gangguan dalam jaringan listrik, penting untuk memastikan bahwa sistem tersebut sesuai dengan standar frekuensi dan tegangan yang berlaku. Selain itu, teknologi inverter yang digunakan harus memenuhi standar teknis agar dapat menjaga stabilitas dan kualitas daya yang dihasilkan, mendukung integrasi energi terbarukan secara berkelanjutan.

2.4 Lokasi dan Koneksi ke Jaringan

Lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki dampak yang signifikan terhadap efisiensi operasional dan biaya infrastruktur transmisi. Oleh karena itu, pemilihan lokasi yang strategis menjadi langkah awal yang penting dalam perencanaan sistem PLTS.

2.4.1 Pengaruh Lokasi PLTS

Jarak ke Pusat Beban atau Jarak antara PLTS dan pusat beban (load center) mempengaruhi kebutuhan infrastruktur transmisi. Apabila PLTS berada jauh dari pusat beban, maka diperlukan pembangunan jaringan transmisi tambahan, yang tentu saja akan meningkatkan biaya investasi untuk Pembangunan jaringan.

Pemilihan lokasi juga harus mempertimbangkan faktor lingkungan dan ketersediaan sinar matahari. Lokasi dengan pancaran matahari yang optimal akan meningkatkan

efisiensi energi yang dihasilkan, sedangkan lokasi yang tidak optimal dapat meningkatkan kehilangan daya dan biaya infrastruktur transmisi.

2.4.2 Penyambungan ke *Grid*

Koneksi PLTS ke jaringan listrik membutuhkan analisis teknis yang mendalam untuk mengevaluasi dampak terhadap performa jaringan listrik, termasuk analisis hubung singkat dan dampak pada arus sirkulasi. (Neumann, 2012)

Koneksi yang tidak sesuai dengan kapasitas jalur transmisi dapat mengakibatkan potensi kelebihan beban, yang dapat menyebabkan gangguan pada jaringan dan merugikan pengguna lain.

Sebelum menghubungkan PLTS ke jaringan, diperlukan studi kelayakan yang mencakup analisis dampak pada performa jaringan, analisis hubung singkat, dan potensi kelebihan beban pada jalur transmisi. Evaluasi ini penting untuk memprediksi dan mengatasi masalah yang mungkin terjadi pada saat sistem beroperasi.

Mengkaji dampak sistemik dari penambahan PLTS ke dalam jaringan listrik adalah kritis untuk memastikan bahwa performa jaringan tetap stabil dan andal setelah integrasi.

Pemilihan lokasi yang tepat untuk PLTS dan analisis teknis yang mendalam terkait penyambungan ke jaringan adalah faktor-faktor krusial dalam memastikan keberhasilan proyek PLTS. Dengan mempertimbangkan jarak ke pusat beban dan dampak teknis dari koneksi ke jaringan, akan memungkinkan pengembangan sistem energi terbarukan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2.5 Permintaan dan Beban Listrik

Permintaan listrik dan pola beban merupakan faktor penting dalam manajemen dan operasional sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Ketersediaan daya yang

dihasilkan oleh PLTS harus sejalan dengan kebutuhan energi yang ada di jaringan listrik agar dapat mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan.

2.5.1 Sinkronisasi Produksi dan Permintaan Energi

Permintaan energi di jaringan listrik dapat bervariasi sepanjang waktu, sering kali dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti waktu siang, musim, dan aktivitas manusia. Penting bagi sistem PLTS untuk mempertimbangkan pola-pola ini agar produksi daya dapat lebih efisien.

Jika PLTS menghasilkan daya pada saat permintaan listrik rendah, fakta ini dapat menyebabkan kelebihan energi, sehingga berpotensi terbuang. Oleh karena itu, diperlukan solusi untuk menyimpan energi yang tidak terpakai untuk digunakan pada saat permintaan yang lebih tinggi.

2.5.2 Sistem Penyimpanan Energi

Untuk mengatasi tantangan ketidakcocokan antara produksi daya dan permintaan, sistem penyimpanan energi seperti baterai dapat digunakan. Baterai ini menyimpan kelebihan energi saat produksi melebihi permintaan dan melepaskannya saat sebaliknya terjadi.

Penggunaan sistem penyimpanan energi tidak hanya mengurangi pemborosan, tetapi juga meningkatkan stabilitas dan keandalan jaringan dengan menyediakan cadangan daya saat diperlukan.

Pentingnya sinkronisasi antara produksi listrik dari PLTS dan pola permintaan energi di jaringan tidak dapat diabaikan. Dengan mempertimbangkan tantangan ini, termasuk kebutuhan untuk sistem penyimpanan energi, maka pengelolaan produksi dan konsumsi energi dapat dilakukan secara lebih efisien, mendukung keberlanjutan sistem energi terbarukan.

2.6 Pengelolaan Intermitensi

Intermitensi merupakan tantangan utama dalam integrasi sumber energi terbarukan, terutama Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Ketergantungan PLTS pada sinar

matahari mengakibatkan fluktuasi dalam output listrik, yang dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan waktu siang. Oleh karena itu, strategi pengelolaan intermitensi menjadi sangat penting untuk memastikan kestabilan dan keandalan pasokan energi.

Fluktuasi ini dapat mempengaruhi konsistensi dan keandalan pasokan daya listrik. Menurut Fath et al. (2021), "Ketidakpastian yang diakibatkan oleh intermitensi solar dapat memengaruhi kestabilan jaringan jika tidak dikelola dengan baik." Oleh karena itu, penting untuk memiliki strategi dan teknologi yang dapat mengelola intermitensi ini agar sistem dapat beroperasi dengan stabil.

Variasi dalam intensitas radiasi matahari dapat menyebabkan fluktuasi dalam output daya dari PLTS, yang dapat mengganggu keseimbangan antara pasokan dan permintaan daya dalam jaringan (Yin et al., 2020). Fluktuasi ini membutuhkan pendekatan yang efektif untuk menjaga kesinambungan pasokan energi.

Beberapa solusi dapat diterapkan untuk mengatasi intermitensi dalam produksi daya dari PLTS:

1. Sistem Penyimpanan Energi (BESS):

Teknologi penyimpanan energi seperti baterai memainkan peran krusial dalam menyimpan kelebihan daya yang dihasilkan pada saat produksi tinggi untuk digunakan pada saat produksi rendah. BESS dapat membantu menjaga kestabilan jaringan dengan menyediakan pasokan listrik pada saat dibutuhkan. Seperti yang dinyatakan oleh (Mudakir et al., 2024) "Dengan teknologi BESS, PLTS dapat berfungsi lebih stabil karena mampu mendukung permintaan ketika produksi berkurang dan produksi menurun.

2. Power Management Systems (PMS):

Sistem manajemen daya yang canggih dapat digunakan untuk mengoptimalkan penggunaan energi yang dihasilkan dan memberikan kontrol yang lebih baik terhadap penyimpanan dan distribusi daya. PMS dapat membantu dalam memonitor

kondisi jaringan secara real-time dan menyesuaikan output PLTS sesuai dengan kebutuhan. PMS dapat berfungsi sebagai jembatan antara produksi energi dan permintaan, serta berperan dalam pengelolaan potensi intermitensi dari PLTS.

3. Kombinasi dengan Sumber Energi Terbarukan Lain:

Menggabungkan PLTS dengan sumber energi terbarukan lainnya, seperti tenaga angin atau hidro, dapat meningkatkan keandalan pasokan listrik. Kombinasi ini dapat membantu mengurangi ketergantungan pada satu sumber energi dan meningkatkan stabilitas karena setiap sumber mungkin memiliki pola produksi yang berbeda. . Integrasi beberapa sumber energi terbarukan dapat menyajikan kurva produksi yang lebih stabil dan dapat diandalkan, sehingga meminimalkan dampak intermitensi.

Tanpa pengelolaan yang efektif, intermitensi dapat menyebabkan fluktuasi pada frekuensi dan tegangan dalam jaringan. Fluktuasi ini dapat mempengaruhi kinerja peralatan listrik yang terhubung ke jaringan, berpotensi mengakibatkan kerusakan atau gangguan operasional. Oleh karena itu, langkah-langkah untuk pengelolaan intermitensi harus diwujudkan dalam desain dan operasi sistem kelistrikan modern.

2.7 Efisiensi dan Kehilangan Daya

Efisiensi dalam produksi dan transmisi energi dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sangat penting untuk memastikan bahwa sebanyak mungkin energi yang dihasilkan dapat digunakan secara efektif. Dua aspek utama yang perlu diperhatikan adalah efisiensi transmisi dan maksimalisasi output energi.

Ketika energi listrik ditransmisikan dari lokasi produksi ke konsumen, ada kemungkinan kehilangan daya yang signifikan, terutama jika jarak antara pembangkit dan pusat konsumsi cukup jauh. Kehilangan daya ini biasanya berupa panas yang dihasilkan dari resistansi dalam kabel transmisi. Penggunaan teknologi transmisi tegangan tinggi (HVDC) dapat membantu mengurangi kehilangan daya tersebut. Teknologi HVDC telah terbukti efisien untuk transmisi jarak jauh karena dapat

mengurangi kehilangan daya secara signifikan dan meningkatkan stabilitas sistem. (Watson & Watson, 2020)

Untuk memaksimalkan output dari PLTS, orientasi panel surya yang tepat, penggunaan teknologi photovoltaic (PV) yang efisien, dan sistem tracking yang dapat mengikuti gerakan matahari sangat penting. Dengan optimalisasi ini, dapat diperoleh peningkatan produksi energi yang akan berkontribusi pada pengurangan intermitensi.

2.7.1 Efisiensi Transmisi

Jarak yang jauh antara pembangkit listrik dan pusat konsumsi dapat mengakibatkan kehilangan daya yang signifikan sepanjang jalur transmisi. Kehilangan ini dapat terjadi akibat resistansi kabel dan faktor lainnya yang memengaruhi efisiensi pengiriman Listrik.

Penggunaan Teknologi Transmisi Tegangan Tinggi (HVDC): Teknologi transmisi tegangan tinggi arus searah (HVDC) dapat menjadi solusi efektif untuk mengurangi kehilangan daya selama transmisi ke pusat beban. HVDC memiliki keuntungan dalam mengirim daya listrik pada jarak jauh dengan kerugian daya yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem transmisi arus bolak-balik (AC).

2.7.2 Maksimalisasi Output

Optimalisasi Orientasi Panel Surya dengan Penempatan dan orientasi panel surya sangat mempengaruhi jumlah energi yang dapat dihasilkan. Orientasi yang tepat terhadap sinar matahari akan memaksimalkan efisiensi produksi.

Teknologi PV dan Tracking System: Teknologi photovoltaic (PV) yang digunakan, bersama dengan sistem pelacakan (tracking system), dapat meningkatkan produksi energi. Sistem pelacakan memungkinkan panel surya untuk mengikuti jalur matahari, sehingga meningkatkan waktu eksposur dan jumlah energi yang dihasilkan selama sehari.

Efisiensi dan pengurangan kehilangan daya dalam sistem PLTS sangat penting untuk keberhasilan operasional dan keberlangsungan pasokan listrik yang dihasilkan. Dengan menerapkan teknologi transmisi HVDC dan mengoptimalkan konfigurasi panel surya serta teknologi PV yang digunakan, sistem dapat memaksimalkan output energi dan meminimalkan kerugian, memberikan kontribusi signifikan terhadap sistem energi yang lebih berkelanjutan

2.8 Dampak adanya penetrasi PLTS atap terhadap jaringan PLN

Penetrasi PLTS atap dalam sistem distribusi tenaga listrik dapat memberikan dampak positif dan negatif terhadap jaringan PLN. Berikut adalah beberapa aspek yang perlu diperhatikan:

2.8.1. Fluktuasi Daya dan Intermitensi

PLTS atap bergantung pada kondisi cuaca dan waktu, sehingga output daya dapat berfluktuasi. Ketika intensitas sinar matahari berubah, misalnya tertutup awan atau hujan, daya yang dihasilkan oleh PLTS akan menurun drastis. Fluktuasi ini dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan dan frekuensi pada jaringan PLN. Selain itu, fluktuasi dalam output daya dari PLTS, yang dapat mengganggu keseimbangan antara pasokan dan permintaan daya dalam jaringan (Yin et al., 2020).

2.8.2. Gangguan Kualitas Daya

Kualitas daya berpotensi terganggu dengan adanya penetrasi PLTS atap, adapun parameter yang kemungkinan terdampak adalah sebagai berikut:

a. Harmonik

Inverter pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berperan penting dalam mengubah arus searah (DC) yang dihasilkan oleh panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang sesuai dengan standar jaringan listrik utama (Ahmadi et al.,

2019). Fungsi utama inverter adalah memastikan sinkronisasi frekuensi dan tegangan agar energi yang dihasilkan dapat disalurkan ke jaringan secara efisien dan aman. proses konversi dari DC ke AC pada inverter PLTS atap ini tidak sempurna dan dapat menghasilkan distorsi harmonik (Kurniawan et al., 2022). Harmonik adalah komponen frekuensi tambahan yang bukan frekuensi utama (fundamental), dan biasanya muncul karena ketidaksempurnaan rangkaian inverter serta metode kontrol yang digunakan (Budiman & Ramadhani, 2018)

Distorsi harmonik ini dapat mengganggu kualitas daya pada jaringan listrik, yang kemudian menimbulkan berbagai masalah seperti peningkatan rugi-rugi daya, pemanasan berlebihan pada transformator dan peralatan listrik, serta penurunan efisiensi sistem tenaga secara keseluruhan

Pengaruh harmonik terhadap sistem tenaga tidak hanya terbatas pada kerusakan peralatan; harmonik juga dapat menyebabkan kegagalan dini komponen kelistrikan dan mengganggu kestabilan sistem proteksi. Harmonik ini dapat mengganggu kualitas daya dalam jaringan karena menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya, pemanasan berlebih pada transformator dan peralatan listrik, serta penurunan efisiensi sistem tenaga listrik.

Permen ESDM tentang aturan *Grid code* membatasi tingkat harmonik yang diizinkan dalam jaringan, sehingga diperlukan filter harmonik atau inverter dengan kualitas daya yang lebih baik untuk mengurangi efek ini.

Tabel 2. 3 Batas THD tegangan menurut permen ESDM 2020 (Kementrian ESDM, 2020)

Tegangan sistem	PLTS Atap
500 kV	$\leq 1.5\%$
275 kV	$\leq 2.0\%$
150 kV	$\leq 3.0\%$

Tegangan sistem	PLTS Atap
66 kV	$\leq 5.0\%$
20 kV	$\leq 5.0\%$
0,4 kV	$\leq 8.0\%$

Tabel 2.4 menjelaskan batasan THD tegangan yang diizinkan menurut aturan grid code pada permen ESDM yaitu untuk tegangan 20 kV, maka batasan maksimal THD tegangan yaitu $\leq 5.0\%$.

b. Flicker Tegangan

Flicker tegangan adalah fenomena fluktuasi tegangan yang cepat dan berulang, yang dapat menyebabkan kedipan lampu dan gangguan operasional pada peralatan elektronik sensitif.

Penyebab utama flicker tegangan dalam sistem PLTS adalah perubahan mendadak dalam intensitas cahaya matahari, seperti ketika awan melintas di atas panel surya, menyebabkan variasi daya yang dihasilkan.

Dalam skala besar, flicker tegangan dapat mengganggu stabilitas jaringan PLN dan menyebabkan gangguan kenyamanan bagi pelanggan. Penggunaan sistem kendali tegangan otomatis dan penyimpanan energi dapat membantu mengurangi efek flicker ini.

c. Ketidakseimbangan Fasa

Jika PLTS dihubungkan secara tidak merata ke sistem tiga fasa (misalnya, lebih banyak daya yang masuk ke satu atau dua fasa daripada fasa lainnya), maka akan terjadi ketidakseimbangan tegangan dan arus dalam jaringan.

Ketidakseimbangan ini dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya, pemanasan lebih pada peralatan listrik, dan menurunkan efisiensi sistem distribusi PLN.

Untuk mengatasi masalah ini, perlu dilakukan perencanaan yang baik dalam pemasangan PLTS, seperti memastikan distribusi daya yang seimbang ke setiap fasa atau menggunakan inverter tiga fasa yang dapat menyesuaikan output daya secara otomatis

2.8.3. Overvoltage (Tegangan Berlebih)

Pada siang hari ketika produksi PLTS tinggi dan konsumsi daya rendah, tegangan jaringan dapat meningkat melebihi batas normal. Overvoltage ini disebabkan oleh ketidakseimbangan antara produksi daya dari PLTS dan konsumsi lokal, yang mengakibatkan peningkatan tegangan pada jaringan distribusi. Jika tegangan melebihi batas yang ditetapkan oleh PLN (misalnya, +10% dari tegangan nominal), maka dapat terjadi kerusakan pada peralatan listrik pelanggan serta aktivasi proteksi jaringan secara tidak diinginkan, yang berpotensi menyebabkan pemadaman listrik.

Menurut IEEE 1547-2018, batas maksimum tegangan yang diizinkan untuk sistem distribusi dengan penetrasi energi terbarukan adalah sekitar 1,05 hingga 1,1 per unit tegangan nominal. Untuk mengatasi overvoltage akibat penetrasi PLTS, solusi yang dapat diterapkan meliputi penggunaan kontrol tegangan adaptif pada inverter, pemasangan peralatan penyerapan daya reaktif seperti STATCOM atau SVC, serta koordinasi dengan sistem kendali tegangan otomatis pada transformator distribusi.

2.8.4. Reverse Power Flow (Aliran Daya Balik)

Daya yang dihasilkan oleh PLTS dapat sering kali melebihi konsumsi lokal dan mengalir kembali ke jaringan PLN. Aliran daya balik ini dapat menyebabkan perubahan arah aliran daya yang mempengaruhi kinerja transformator dan proteksi jaringan.

Reverse Power Flow (aliran daya balik) terjadi ketika daya yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap melebihi kebutuhan konsumsi listrik lokal. Dalam situasi ini, kelebihan daya akan mengalir kembali ke jaringan listrik PLN, yang dapat menyebabkan perubahan arah aliran daya.

PLTS yang menghasilkan daya aktif melebihi kebutuhan lokal dapat menyebabkan aliran daya balik (*reverse power*) ke jaringan utama PLN. Fenomena ini dapat mempengaruhi kerja transformator (misalnya meningkatkan rugi-rugi atau overload), menyebabkan pengoperasian proteksi menjadi tidak sesuai arah arus, serta memerlukan penyesuaian sistem proteksi dan koordinasinya.

Penetrasi tinggi PLTS pada jaringan tegangan rendah dapat menyebabkan aliran daya balik ke transformator distribusi. Hal ini berpotensi menyebabkan kelebihan beban (*overload*), peningkatan rugi-rugi daya, dan penurunan umur teknis transformator. Simulasi penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pada tingkat penetrasi PLTS sebesar 88,3%, terjadi aliran daya balik yang signifikan, dengan batas beban balik transformator mencapai 78,04 kVA atau 24,77% dari kapasitasnya (Majeed & Nwulu, 2022).

2.8.5. Koordinasi Proteksi yang Tidak Optimal

PLTS dapat mengubah konfigurasi aliran daya dalam jaringan, sehingga proteksi yang sudah ada seperti relay arus lebih dan pemutus sirkuit perlu dikaji ulang. Hal ini untuk mencegah adanya zona yang tidak terdeteksi oleh sistem proteksi (non-detection zone/NDZ).

Sistem kelistrikan modern mengandalkan koordinasi proteksi yang efektif untuk memastikan bahwa gangguan dapat dideteksi dan diisolasi dengan cepat. Dengan adanya penetrasi sumber energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap, arah dan konfigurasi aliran daya dalam jaringan dapat berubah. Perubahan

ini dapat memengaruhi operasi sistem proteksi yang ada, terutama saat aliran daya balik terjadi. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa integrasi PV atap secara signifikan mengubah profil arus hubung singkat dan bisa menyebabkan mis-koordinasi proteksi. (Rehman et al., 2020)

Proteksi jaringan listrik melibatkan penggunaan perangkat seperti relay, pemutus sirkuit, dan fuse. Tujuannya adalah untuk mendeteksi kondisi abnormal (seperti arus lebih atau korsleting) dan memutuskan aliran listrik sebelum kerusakan lebih lanjut terjadi.

NDZ adalah area di dalam jaringan listrik di mana sistem proteksi tidak dapat mendeteksi gangguan karena konfigurasi aliran daya yang tidak terduga. Ketika PLTS atap diintegrasikan, ada kemungkinan terjadi perubahan pada profil arus dalam jaringan, yang dapat menciptakan NDZ. Zona ini berisiko tinggi karena gangguan mungkin tidak terdeteksi, sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan dan meningkatkan risiko keselamatan.

Untuk memastikan koordinasi proteksi memerlukan penyesuaian perangkat proteksi untuk memastikan bahwa mereka dapat berfungsi dengan baik dalam skenario aliran daya yang baru. Evaluasi terhadap relay arus lebih dan pemutus sirkuit diperlukan untuk memastikan bahwa mereka dapat dengan efektif mendeteksi dan merespon perubahan aliran daya selama dan setelah integrasi PLTS atap. Penerapan algoritma dan teknologi berbasis informasi untuk analisis performa proteksi sangat diperlukan.

2.8.6. Islanding Effect (Islanding Mode)

Islanding terjadi ketika jaringan utama PLN mengalami gangguan atau pemadaman, tetapi PLTS atap masih tetap memasok daya ke sebagian jaringan. Situasi ini berbahaya karena dapat membahayakan teknisi yang bekerja di jaringan dan menyebabkan ketidakstabilan sistem.

Islanding effect terjadi ketika bagian dari sistem kelistrikan beroperasi secara independen dari jaringan utama, setelah pemutusan dari jaringan tersebut. Hal ini dapat terjadi secara tidak sengaja ketika sistem distribusi terputus dari jaringan utama, tetapi pembangkit terdistribusi, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), tetap aktif dan menyuplai energi ke area tertentu. Islanding menciptakan risiko bagi keselamatan serta kemandekan operasional sistem kelistrikan yang terhubung.

Saat terjadi gangguan dalam jaringan utama, beberapa sumber energi terbarukan seperti PLTS dapat tetap beroperasi dan mensuplai daya ke area lokal. Ini menciptakan kondisi di mana grid lokal berfungsi terpisah dari grid utama. Islanding effect dapat mengganggu stabilitas sistem dan mengarah pada kondisi tidak aman, terutama jika tidak dapat terdeteksi oleh sistem proteksi yang ada.

2.9 Komponen dan Prinsip Kerja Sistem PLTS Terhubung Jaringan

Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap yang terhubung ke jaringan PLN (grid-connected system), terdapat beberapa komponen utama yang berfungsi untuk pengukuran, konversi energi, serta sinkronisasi dengan sistem distribusi listrik. Komponen-komponen tersebut antara lain Current Transformer (CT), Potential Transformer (PT), kWh Meter Ekspor-Impor, Inverter, dan Panel Surya (Photovoltaic Module).

2.9.1 Current Transformer (CT)

Current Transformer (CT) adalah transformator arus yang digunakan untuk menurunkan arus besar pada sistem tenaga menjadi arus kecil yang proporsional, sehingga aman diukur dengan instrumen pengukuran seperti kwh meter atau *power quality meter*. CT bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Hubungan arus dapat dituliskan:

$$I_p \times N_p = I_n \times N_n \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan I_p adalah arus primer, I_s arus sekunder, N_p jumlah lilitan primer, dan N_s jumlah lilitan sekunder. Rasio CT biasanya dinyatakan sebagai:

$$\text{Rasio CT (faktor kali CT)} = I_p / I_s \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan I_p adalah arus primer, I_s arus sekunder.

Contoh: CT 25/5 A berarti arus primer 25 A diturunkan menjadi 5 A di sisi sekunder sehingga faktor kali CT adalah 5.

2.9.2 Potential Transformer (PT)

Potential Transformer (PT) digunakan untuk menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah yang proporsional agar dapat diukur oleh instrumen. Rumus umum:

$$V_p / V_s = N_p / N_s \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan V_p tegangan primer, V_s tegangan sekunder, N_p jumlah lilitan primer, dan N_s jumlah lilitan sekunder.

$$\text{Rasio PT (faktor kali PT)} = V_p / V_s \dots\dots\dots (2.7)$$

dengan V_p adalah arus primer, V_s arus sekunder

Contoh: PT 20000/100 V berarti arus primer 20000 V diturunkan menjadi 100 V di sisi sekunder sehingga faktor kali PT adalah 200.

2.9.3 kWh Meter Ekspor–Impor

kWh meter ekspor–impor digunakan untuk mengukur energi listrik yang digunakan pelanggan dari PLN (impor) dan energi listrik yang dikirim kembali ke jaringan PLN (ekspor) dari PLTS. Energi listrik dihitung dengan:

$$E = P \times t \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan E adalah energi (kWh), P adalah daya (kW), dan t adalah waktu (jam).

2.9.4 Inverter

Inverter adalah perangkat yang mengubah arus searah (DC) dari panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan oleh beban atau disalurkan ke jaringan PLN. Efisiensi inverter dapat dirumuskan:

$$\eta = (P_{\text{out}} / P_{\text{in}}) \times 100\% \dots \dots \dots (2.9)$$

dengan P_{out} adalah daya keluaran AC dan P_{in} adalah daya masukan DC.



BAB III

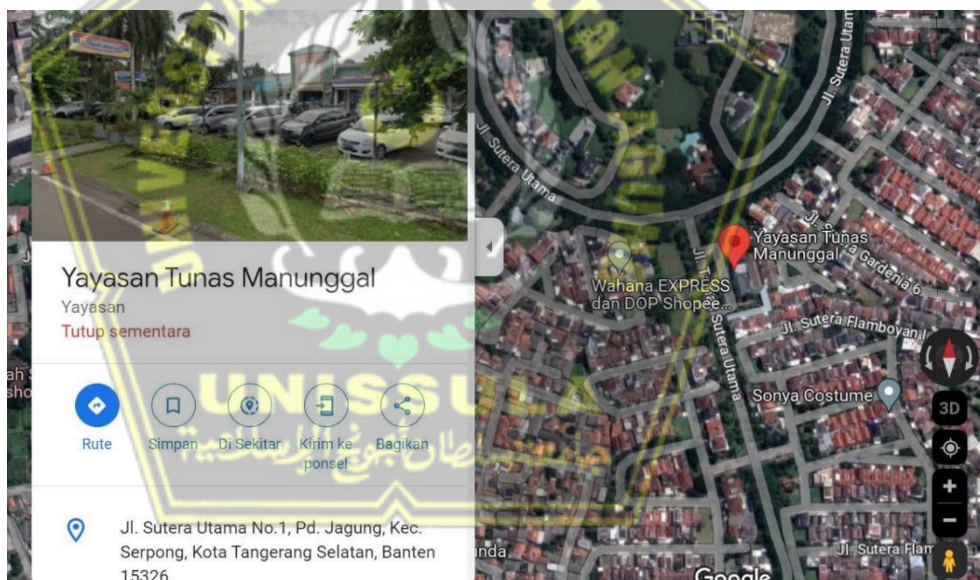
METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

3.1.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Adapun lokasi penelitian yang akan dilaksanakan adalah di Yayasan Manunggal dengan data sebagai berikut :

- a. Nama Tempat : Yayasan Tunas Manunggal
- b. Lokasi : Jl Alam Sutra Serpong Tangerang
- c. ID Pelanggan :546200320811



Gambar 3. 1 Lokasi yayasan Tunas Manunggal

Waktu pengukuran dilakukan pada 4 waktu yaitu saat kondisi berbeban dan kondisi tidak berbeban dengan membandingkan ketika PV off dan PV on. Adapun detail waktunya adalah sebagai berikut:

1. Kondisi tidak berbeban (*weekend*) dalam kondisi PV On dilakukan pada hari minggu tanggal 26 Maret 2023

2. Kondisi tidak berbeban (*weekend*) dalam kondisi PV Off dilakukan pada hari minggu tanggal 21 Mei 2023
3. Kondisi berbeban (*weekday*) dalam kondisi PV On dilakukan pada hari senin tanggal 27 Maret 2023
4. Kondisi berbeban (*weekday*) dalam kondisi PV Off dilakukan pada hari senin tanggal 21 Mei 2023

3.1.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah: Alat tulis, Laptop, power Quality Meter. Sedangkan untuk software yang digunakan adalah software microsoft office dan energy analyze

3.2 Metode Pengumpulan Data

3.2.1 Metode Studi *Literature*

Data simulasi dilakukan berdasarkan data real lapangan yang sudah terpasang di lokasi yayasan Tunas manunggal, baik kapasitas PLTS Atap maupun kapasitas PLTS atap.

3.2.2 Metode Observasi Non-Partisipasi

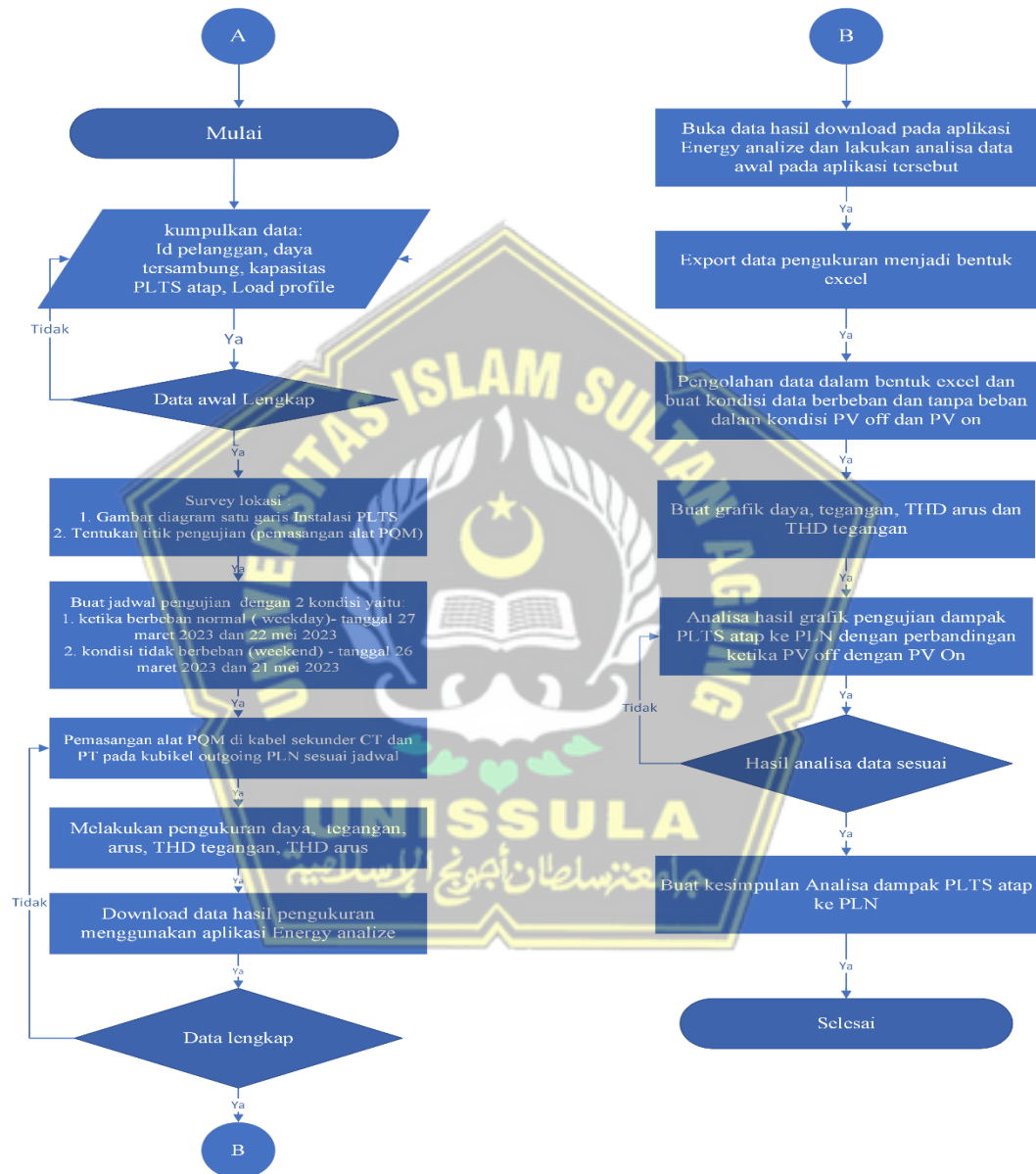
Data dikumpulkan dari data induk lapangan PLN dengan melakukan observasi secara langsung ke lokasi pelanggan untuk disusun menjadi Tugas Akhir ini.

3.3 Tahapan penelitian

Penelitian diawali dengan proses studi literatur, diantaranya identifikasi masalah, menentukan masalah dan meninjau penelitian terkait dengan penelitian yang dilakukan. Kemudian observasi terkait objek penelitian, dalam proses ini penulis mengumpulkan data yang diperlukan dalam penelitian seperti data awal berupa lokasi pelanggan yang akan dijadikan studi kasus, daya tersambung , kapasitas PLTS atap terpasang dan load profil pelanggan tersebut. Setelah data tersebut terkumpul, maka dilakukan survey ke lokasi pelanggan dan membuat jadwal untuk melakukan pengukuran.

Setelah itu penulis melakukan pengukuran sesuai jadwal yang sudah ditetapkan dan melakukan *wiring* alat PQM di jaringan PLN. Data hasil pengukuran tersebut diunduh melalui aplikasi energy analyze dan diexport ke excel.

Data yang sudah menjadi excel tersebut dianalisa dan dibuat grafik untuk mempermudah melakukan analisa, setelah itu, dibuat kesimpulan hasil analisa dari penetrasi PLTS atap ke jaringan PLN. Adapun diagram alur dari penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 3. 2 Diagram alir tahapan penelitian

3.4 Studi pustaka

Dalam studi literatur, penulis melakukan pengumpulan sejumlah sumber referensi terkait jurnal penelitian terdahulu dan buku yaitu

1. studi Dampak Level Penetrasi Pembangkit Listrik Fotovoltaik pada Jaringan Distribusi . Penelitian ini memodelkan jaringan distribusi 400V dengan berbagai tingkat penetrasi PLTS hingga 100%. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi PLTS dapat menyebabkan kenaikan tegangan pada jaringan, terutama saat iradiasi matahari tinggi.
2. Analisis Dampak Penetrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya pada Jaringan Distribusi. Penelitian ini menggunakan metode aliran daya untuk menganalisis dampak dan batasan penetrasi PLTS terhadap kondisi operasi jaringan distribusi. Fokus pada bagaimana kapasitas maksimal PLTS yang diintegrasikan mempengaruhi standar layanan dan operasi sistem

3.5 Pengumpulan data

Data-data yang akan dikumpulkan merupakan data sekunder milik PLN dan data yang didapat dari Yayasan Tunas manunggal . Beberapa data tersebut berupa:

1. Data pelanggan Yayasan Tunas manunggal

Nama Pelanggan : Yayasan Tunas Manunggal

ID Pelanggan : 546200320811

Tarif/Daya Tersambung : B2/865 KVA

Lokasi : Jl Alam Sutra Serpong Tangerang

Pelanggan : Tegangan Menengah (TM/TM/TM)

2. Spesifikasi PLTS

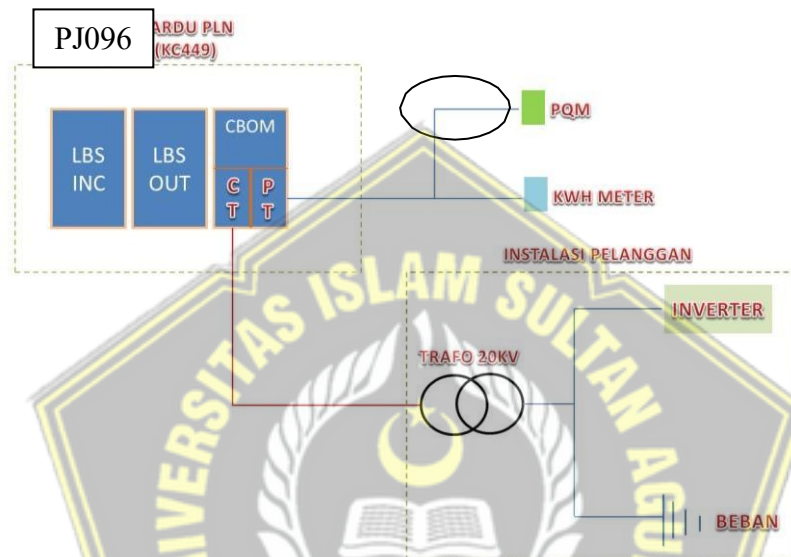
PLTS atap yang dipasang pada Yayasan Tunas Manunggal adalah sebagai berikut :

Panel Surya : 107,38 KWp

Inverter : 91 KWp

3. Single line diagram pengukuran

Gambar dibawah ini menunjukkan single line diagram yang menggambarkan keseluruhan serta konfigurasi jaringan listrik yang akan dilakukan pengukuran di Yayasan Tunas Manunggal untuk mempermudah instalasi pemasangan pengukuran Yayasan Tunas Manunggal.



Gambar 3. 3 Titik pengukuran yayasan tunas manunggal

Pada single line diagram terlihat bahwa Yayasan Tunas Manunggal di supply dari Gardu PJ096 yang didalamnya terdapat 3 buah Medium Voltage cell (MV Cell) yaitu kubikel Incoming, kubikel outgoing dan kubikel circuit breaker busbar open metering (kubikel CBOM).

Pada kubikel CBOM terdapat alat yaitu Current Transformer (CT) dan Potensial transformer (PT) untuk menurunkan arus dan tegangan menengah sehingga bisa dilakukan pengukuran oleh alat ukur lain seperti KWH Meter maupun alat Power Quality Meter (PQM).

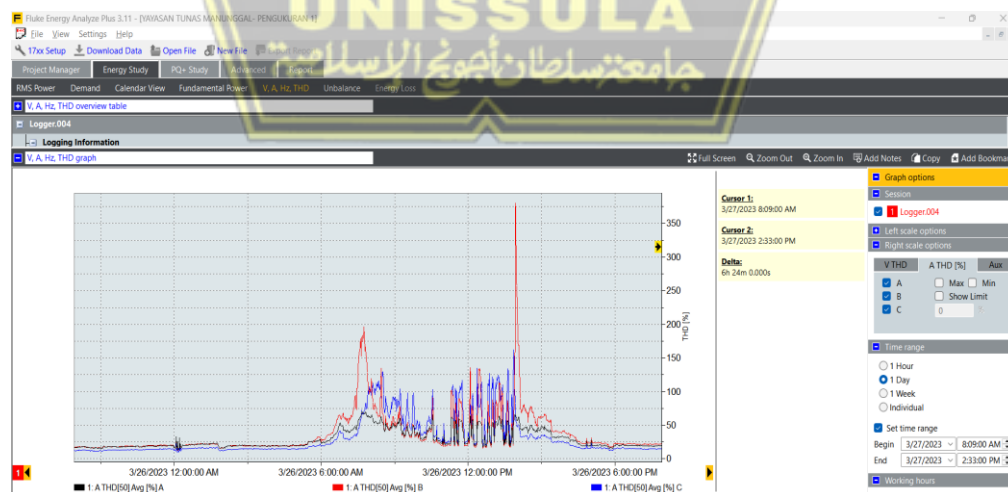
Penulis menggunakan PQM untuk mengukur pelanggan tersebut yang dipasang di sisi sekunder output dari CT dan PT sehingga data yang didapat harus dilakukan konversi ke sisi primer. CT yang dipasang adalah rasio 25/5 A dan PT yang dipasang adalah 20.000/100 volt.

Di sistem PLTS atap Yayasan Tunas Manunggal tidak ada panel sinkron manual seperti di pembangkit konvensional (misalnya sinkronisasi genset ke PLN). Kalau genset, perlu sinkron panel untuk menyamakan frekuensi, tegangan, sudut fasa sebelum bisa paralel dengan grid. Sedangkan PLTS atap sudah ditangani otomatis oleh inverter grid-tied. Inverter grid-tied berfungsi sebagai "sinkronisasi otomatis" dengan jaringan PLN. Inverter akan membaca tegangan dan frekuensi PLN sebagai referensi. Output inverter disesuaikan (phase lock) supaya sinkron dengan grid. Jadi, PLTS atap tidak bisa hidup sendiri tanpa jaringan PLN.

Panel yang ada hanya AC Distribution Panel / MDB (Main Distribution Board) untuk mengatur aliran daya dari PLN dan PLTS, lengkap dengan MCCB/ACB, proteksi, dan kWh meter ekspor-impor yang berfungsi untuk proteksi & distribusi. Sinkronisasi PLTS ke PLN dilakukan otomatis oleh inverter grid-tied

4. Data hasil pengukuran

Setelah dilakukan pengukuran di lokasi pelanggan, maka penulis melakukan pengunduhan data dari PQM menggunakan aplikasi Energy analyze . berikut contoh tampilan data pada aplikasi tersebut:



Gambar 3. 4 Tampilan aplikasi PQM

Data tersebut kemudian diolah pada aplikasi excel, yaitu berupa data daya, tegangan, cosphi, Total harmonik distortion (THD) arus dan Total harmonik distortion (THD) tegangan ketika kondisi berbeban dan tanpa berbeban dengan membandingkan PV on dan PV off.

3.6 Teknik Analisa Data

Teknik analisa data yang digunakan dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah menggunakan metode analisa data deskriptif yaitu dengan cara mendiskripsikan dan menggambarkan data yang diperoleh dari PQM kemudian diubah menjadi data pada excel. Untuk mempermudah menganalisa data tersebut, data nya disajikan dalam bentuk diagram.

Pada diagram dapat terlihat perubahan yang terjadi ketika PV off dan PV on berupa data daya, tegangan, cosphi, Total harmonik distortion (THD) arus dan Total harmonik distortion (THD) tegangan ketika kondisi berbeban dan tanpa berbeban dengan membandingkan PV on dan PV off. Adapun standar yang digunakan penulis adalah standar grid code berdasarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 20 tahun 2020.

Menarik kesimpulan dari rumusan masalah dan data yang didapatkan/diperoleh sehingga didapatkan kesimpulan dari adanya penetrasi PLTS atap ke jaringan PLN. Dari hasil analisa, akan didapatkan kesimpulan bahwa adanya paralel PLTS atap dengan jaringan PLN dapat mempengaruhi beberapa parameter kualitas daya. Adapun pengaruhnya bisa berbeda ketika kondisi di Yayasan Tunas manunggal dalam keadaan berbeban dan tidak berbeban sehingga akan dilakukan perbandingan dalam kondisi tersebut.

BAB IV

DATA DAN ANALISA

4.1 Data kondisi Beban PT Yayasan Tunas Manunggal

Sebelum melakukan pengukuran di lokasi pelanggan, penulis harus mengetahui karakteristik beban pelanggan Yayasan Tunas manunggal berupa beban puncak selama setahun dan beban harian sehingga bisa menentukan metode pengukuran atau pengujian yang tepat untuk menganalisa dampak penetrasi PLTS atap yayasan Tunas Manunggal ke Jaringan PLN.

Data load profile PT Yayasan Tunas Manunggal yang diambil dari data kwh meter PLN yang sudah terpasang berupa data beban puncak selama setahun sebelum proses penelitian ini dibuat yaitu pada bulan Mei 2022 sampai dengan bulan April 2023.

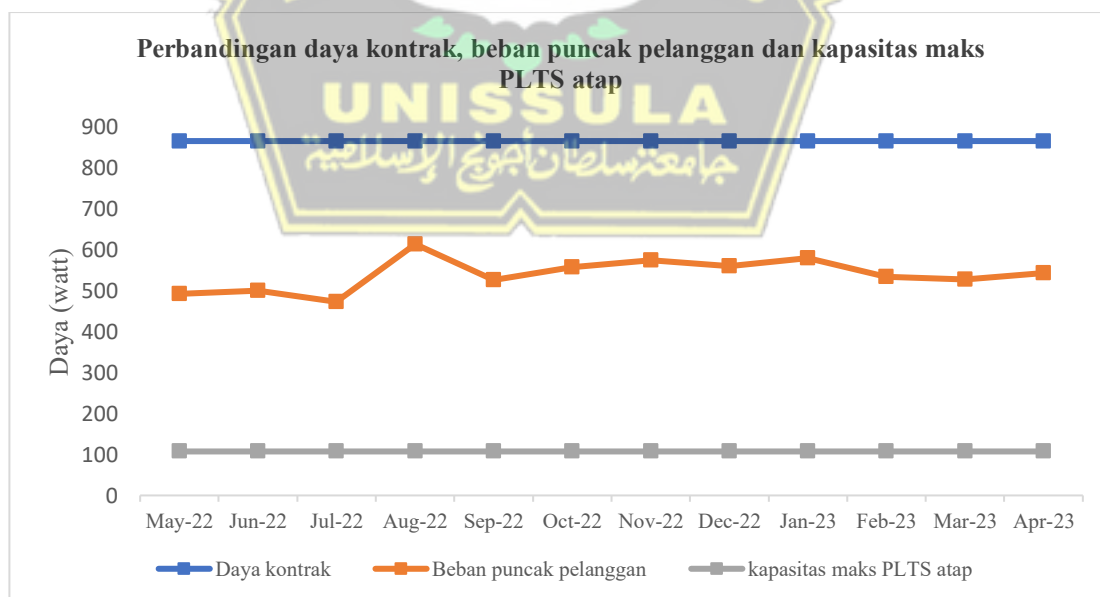
Tabel 4. 1 data beban puncak dan energi bulanan

Bulan	Daya Maks (kW)	Energi bulanan (kWh)	Energi harian (kWh)	Energi PLTS (kWh/hari)	% Energi dipenuhi PLTS
Mei 2022	491,872	85,030	2,743	535	20
Juni 2022	499,957	86,040	2,868	535	19
Juli 2022	472,627	83,900	2,706	535	20
Agustus 2022	613,346	97,410	3,142	535	17
September 2022	526,428	130,690	4,356	535	12
Oktober 2022	557,075	113,250	3,653	535	15
November 2022	574,615	126,420	4,214	535	13
Desember 2022	560,341	128,940	4,159	535	13
Januari 2023	579,404	90,880	2,932	535	18
Februari 2023	533,880	118,640	4,237	535	13
Maret 2023	527,846	113,130	3,649	535	15

Bulan	Daya Maks (kW)	Energi bulanan (kWh)	Energi harian (kWh)	Energi PLTS (kWh/hari)	% Energi dipenuhi PLTS
April 2023	527,846	116,010	3,867	535	14
Maksimal	613,346	130.690	4356	535	20
Rata- rata	544.506	109.310	3606	535	16

Tabel 4.1 menunjukkan Data load profile Yayasan tunas manunggal selama satu tahun dari bulan Mei 2022 sampai dengan bulan April 2023. Pada data tersebut, daya aktif tertinggi (Beban puncak) terjadi pada tanggal 12 Agustus 2022 jam 10.30 sebesar 613,346 kWp, sedangkan pemakaian energi bulanan yang dikonsumsi yayasan tunas manunggal tertinggi yaitu sebesar 130.690 kwh dengan energi harian sebesar 4.356 kwh.

PLTS atap yang terpasang dengan kapasitas 107,38 kWp memiliki asumsi beroperasi selama 5 jam dan mampu menghasilkan energi harian sebesar 535 kwh atau sekitar 20% dari pemakaian energi harian.



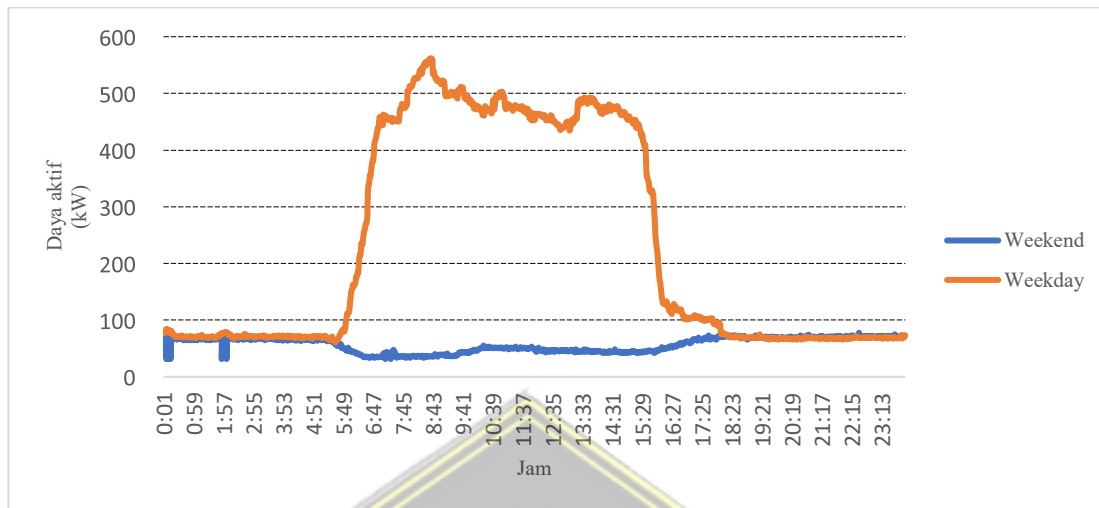
Gambar 4. 1 Grafik perbandingan daya kontrak, beban puncak pelanggan dan kapasitas maks PLTS atap

Gambar 4.1 menjelaskan tentang perbandingan daya kontrak dan kapasitas maksimal PLTS atap. PLTS atap yang terpasang di Yayasan Tunas Manunggal memiliki kapasitas 107,38 kWp atau sebesar 12.41% dari daya kontrak PLN 865 kVa. Menurut Permen ESDM No. 26 Tahun 2021 tentang kapasitas maksimal PLTS Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang IUPTL untuk Kepentingan Umum adalah 100% dari daya kontrak yang dapat terkoneksi ke grid PLN (kementrian ESDM, 2021).

Selain itu, gambar diatas menunjukkan perbandingan kapasitas PLTS atap dengan beban aktif maksimal bulanan (beban puncak) yaitu sebesar 17.51%. Pada saat PLTS atap beroperasi, maka kebutuhan pelanggan akan disupply terlebih dahulu oleh PLTS atap. Jika daya yang dihasilkan PLTS atap lebih kecil dibandingkan kebutuhan beban, maka kekurangannya akan disupply oleh PLN sehingga PLN harus selalu siap untuk mencukupi kekurangan daya atau intermitensi dari PLTS atap. Namun jika daya yang dihasilkan PLTS atap lebih besar dibandingkan kebutuhan beban, maka kelebihanannya akan dikirim ke jaringan PLN.

Secara umum gambar diatas menggambarkan kondisi yang aman karena besar kapasitas PLTS atap yang terpasang jauh dibawah daya kontrak sesuai batasan maksimal yang dijelaskan permen ESDM No. 26 Tahun 2021 dan energi harian yang dihasilkan PLTS atap hanya 20% dari kebutuhan energi harian Yayasan tunas manunggal sehingga kecil kemungkinan adanya *reverse power*.

Akan tetapi, ada kondisi lain yang harus dipertimbangkan karena beban pada pelanggan tidak selalu konstan, apalagi ada perbedaan yang sangat signifikan di hari kerja (*weekday*) dengan hari libur (*weekend*) dikarenakan peruntukannya untuk sekolah sehingga perlu menganalisa tipe beban harian di Yayasan tunas manunggal



Gambar 4. 2 Beban harian hari kerja (*weekday*)

Gambar 4.2 menunjukkan grafik perbandingan beban harian pada hari kerja (*weekday*) dan hari libur atau (*weekend*). Perbedaan tersebut terjadi mulai pukul 05.49 sampai dengan pukul 17.54. Pada hari kerja (*weekday*), kenaikan beban dimulai dari pukul 05.53. Beban terus menaik dan mengalami puncak beban terjadi pada pukul 08.40 yaitu sebesar 561.96 kW. Pada sore hari, setelah jam belajar selesai maka beban di Yayasan Tunas manunggal kembali menurun.

Sedangkan pada hari libur (*weekend*), beban pada pagi hari sampai sore hari justru lebih kecil dibandingkan dengan malam hari dikarenakan pada waktu tersebut tidak ada kegiatan belajar sehingga beban listrik dimatikan. Perbedaan karakteristik beban ini terjadi justru pada rentang PLTS atap ini beroperasi, sehingga perlu dilakukan analisa untuk membandingkan kedua kondisi ini jika adanya PLTS atap terhubung paralel ke jaringan PLN.

Dari grafik diatas terlihat jelas bahwa ada perbedaan perbedaan karakteristik beban harian pada hari kerja (*weekday*) dan hari libur atau (*weekend*). Perbedaan tersebut terjadi mulai pukul 05.49 sampai dengan pukul 17.54.

Tabel 4. 2 Perbandingan Beban harian hari kerja (*weekday*) dan hari libur (*weekend*)

Beban	Weekday (kW)	Weekend (kW)
Minimum	60.85	31.35
Rata- rata	57.05	232.66
Maksimum	561.96	79.77

Tabel 4.2 menunjukkan perbedaan karakteristik beban ini terjadi justru pada rentang PLTS atap ini beroperasi, sehingga inilah yang membuat penulis tertarik untuk membandingkan kedua kondisi ini jika adanya PLTS atap terhubung paralel ke jaringan PLN.

Penulis yakin akan ada perbedaan dampak yang terjadi dari adanya PLTS atap terhubung paralel ke jaringan PLN saat kondisi hari kerja (*weekday*) dengan hari libur (*weekend*)

4.2 Analisa Perbandingan Daya

Analisa perbandingan daya dilakukan untuk mengetahui besarnya daya yang diukur ketika kondisi hari kerja dan hari libur untuk mengetahui apakah terjadi aliran daya balik (*reverse power* atau tidak). Berikut ditampilkan hasil data export dari PQM berupa data tegangan per fasa (V_{rms}), data arus per fasa (I_{rms}) dan pf per fasa.

Tabel 4. 3 Data pengukuran aru tegangan, arus dan cosphi pada PQM

Jam	V_AN	V_BN	V_CN	I_A	I_B	I_C	Pf_A	Pf_B	Pf_C
1:00	58.39	59.00	59.01	0.37	0.33	0.46	0.82	0.95	0.93
2:00	58.53	59.15	59.16	0.43	0.39	0.53	0.75	0.92	0.88
3:00	58.56	59.21	59.21	0.40	0.33	0.49	0.80	0.95	0.94
4:00	58.56	59.18	59.19	0.38	0.33	0.47	0.80	0.95	0.93
5:00	58.55	59.17	59.17	0.38	0.32	0.47	0.80	0.95	0.94
6:00	58.46	59.01	58.99	0.80	0.79	0.88	0.90	0.94	0.93
7:00	58.49	58.97	58.96	2.55	2.80	2.76	0.94	0.94	0.91

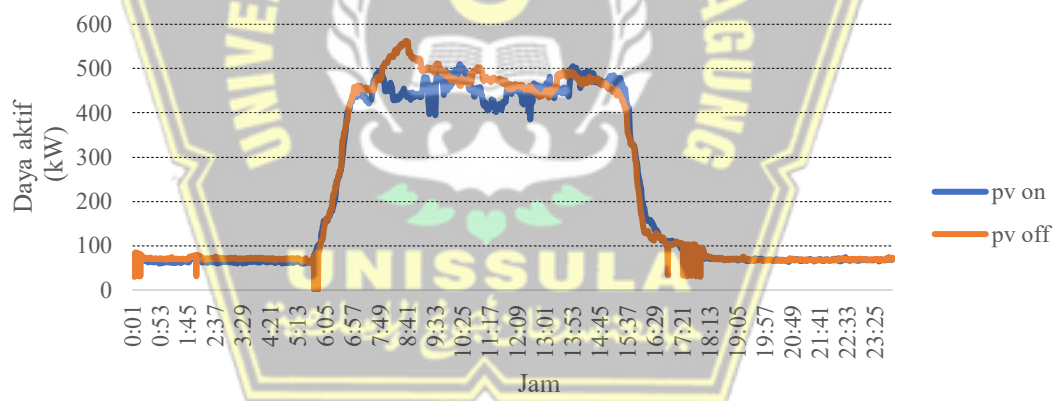
Jam	V_AN	V_BN	V_CN	I_A	I_B	I_C	Pf_A	Pf_B	Pf_C
8:00	58.38	58.88	58.86	2.61	2.81	2.79	0.94	0.94	0.92
9:00	58.35	58.86	58.82	2.50	2.66	2.72	0.96	0.97	0.95
10:00	58.44	58.93	58.87	2.80	2.97	3.01	0.95	0.95	0.94
11:00	58.09	58.53	58.50	2.52	2.72	2.70	0.96	0.96	0.94
12:00	58.83	59.33	59.32	2.57	2.82	2.76	0.95	0.95	0.92
13:00	58.25	58.75	58.72	2.53	2.80	2.75	0.96	0.96	0.93
14:00	58.04	58.55	58.53	2.93	3.09	3.06	0.96	0.95	0.94
15:00	58.28	58.79	58.76	2.74	2.89	2.86	0.96	0.95	0.95
16:00	58.89	59.42	59.38	1.38	1.44	1.46	0.98	0.98	0.97

Data tabel 4.3 adalah data hasil pengukuran yang ditampilkan oleh Power Quality Meter (PQM) yang merupakan nilai pada sisi sekunder dari Current Transformer (CT) dan Potential Transformer (PT). Oleh karena itu, untuk memperoleh nilai sebenarnya pada sisi primer, hasil pengukuran tersebut perlu dikalikan dengan rasio CT dan rasio PT yang digunakan. Dengan demikian, nilai arus, tegangan, maupun daya yang dianalisis pada laporan ini merupakan hasil perhitungan setelah dikonversi ke sisi primer. Contoh perhitungan daya dari tabel tersebut pada jam 12.00:

- Data sekunder pada PQM sebagai berikut:
 - Tegangan $V_{AN} = 58.83$ volt ; $V_{BN} = 59.33$ volt; $V_{CN} = 59.32$ volt
 - Arus $I_A = 2,57$ ampere; $I_B = 2,57$ ampere; $I_C = 2,76$ ampere
 - Faktor daya $Pf_A = 0,95$ $Pf_B = 0,95$ $Pf_C = 0,92$
 - Rasio CT = $25/5 = 5$
 - Rasio PT = $20000/100 = 200$
- Data sekunder tersebut dikonversi ke primer untuk mendapatkan nilai sebenarnya dengan cara sebagai berikut:
 - $V_{p_AN} = V_A \times \text{Rasio PT} = 58.83 \times 200 = 11766$ v

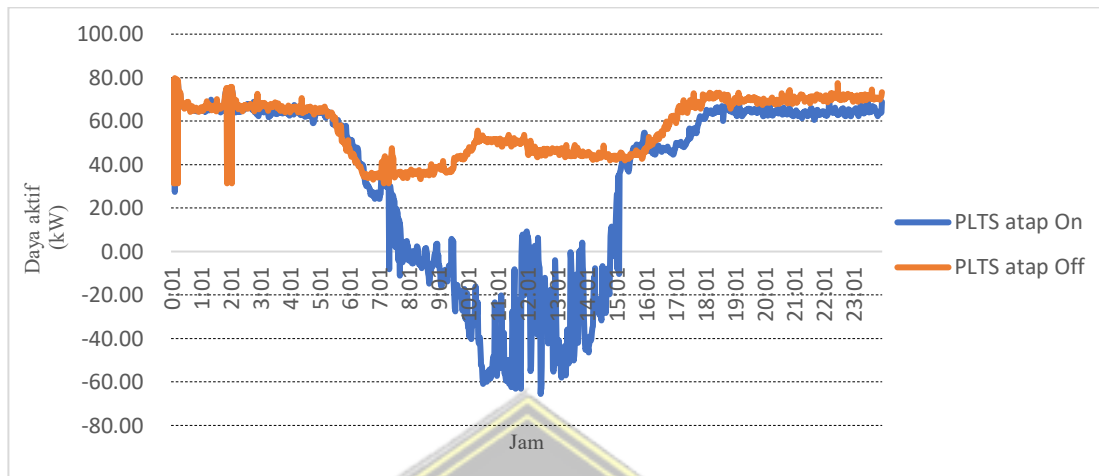
- $V_{p_BN} = V_B \times \text{Rasio PT} = 58.83 \times 200 = 11866 \text{ v}$
- $V_{p_CN} = V_B \times \text{Rasio PT} = 58.83 \times 200 = 11863 \text{ v}$
- $I_{p_A} = I_A \times \text{Rasio CT} = 2,57 \times 5 = 12,85 \text{ A}$
- $I_{p_B} = I_B \times \text{Rasio CT} = 2,57 \times 5 = 14,11 \text{ A}$
- $I_{p_C} = I_B \times \text{Rasio CT} = 2,57 \times 5 = 13,80 \text{ A}$
- Perhitungan daya menggunakan rumus : $P = V_LN \times I \times pf$
 - $P_A = 11766 \times 12,85 \times 0,95 = 143837 \text{ W}$
 - $P_B = 11866 \times 14,11 \times 0,95 = 158509 \text{ W}$
 - $P_C = 11863 \times 12,85 \times 0,95 = 151285 \text{ W}$
 - **$P_{\text{total}} = P_A + P_B + P_C = 453632 \text{ W} = 453.64 \text{ kW}$**

Nilai daya aktif pada jam 12.00 sebesar 453,64 kW. Dengan menggunakan perhitungan yang sama pada periode waktu lain, maka diperoleh data yang penulis buat grafik untuk memudahkan pembaca pada gambar 4.3 dan gambar 4.4 sebagai berikut:



Gambar 4.3 Grafik perbandingan daya hari kerja (*weekday*)

Gambar 4.3 menunjukkan grafik hasil pengukuran pada hari kerja (*weekday*). Pada hari kerja, beban di yayasan tunas manunggal cukup besar dan melebihi daya yang dihasilkan PLTS atap, sehingga ketika PLTS atap dihidupkan tidak terjadi *reverse power* (aliran daya balik) di jaringan PLN dan hanya mengalami penurunan daya yang dikirim PLN ke Yayasan Tunas Manunggal.



Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan daya saat hari libur (*weekend*)

Gambar 4.4 menunjukkan grafik hasil pengukuran pada hari libur (*weekend*), terjadi dua kondisi berbeda ketika PLTS atap kondisi mati dan hidup. Ketika PLTS atap mati, beban pelanggan yayasan Tunas manunggal pada jam 07.00 - 17.00 mengonsumsi daya aktif 40.000 watt sampai dengan 60.000 watt. Adapun kondisi kedua yaitu ketika PLTS atap dihidupkan, maka pelanggan yayasan Tunas manunggal pada jam 07.22 sampai dengan 15.07 mengalami *reverse power*/ aliran daya balik.

Aliran daya balik yang dikirim oleh PV yayasan Tunas Manunggal ke jaringan PLN bervariasi dengan nilai yang fluktuatif. Hasil pengukuran PQM aliran daya balik yang masuk ke PLN terjadi paling tinggi sebesar 65,54 kW pada jam 12.28 atau sebesar 59,5% dari kapasitas maksimal PLTS atap yayasan tunas manunggal 110 kWp dan 7,5% dari daya kontrak 865 kVA.

Nilai besarnya daya yang dikirim PLTS atap tergantung pada berbagai faktor seperti cahaya matahari dan lain-lain. Dengan aliran balik yang masih kecil, maka trafo akan mengalami pembebanan tapi tidak terlalu signifikan (masih kategori aman).

4.3 Analisa Tegangan

Analisa tegangan dilakukan untuk mengetahui nilai fluktuasi tegangan ketika penetrasi PLTS atap ke jaringan PLN apakah masih dalam batas standar atau melebihi batas

standar yang diizinkan yaitu $\pm 5\%$ dari tegangan nominal. Berikut ditampilkan hasil data export dari PQM berupa data tegangan per fasa (Vrms)

Tabel 4. 4 Data pengukuran tegangan pada PQM

Jam	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
V_AN	58.5	58.4	58.3	58.4	58.1	58.8	58.3	58.0	58.3	58.9
V_BN	59.0	58.9	58.9	58.9	58.5	59.3	58.7	58.5	58.8	59.4
V_CN	59.0	58.9	58.8	58.9	58.5	59.3	58.7	58.5	58.8	59.4

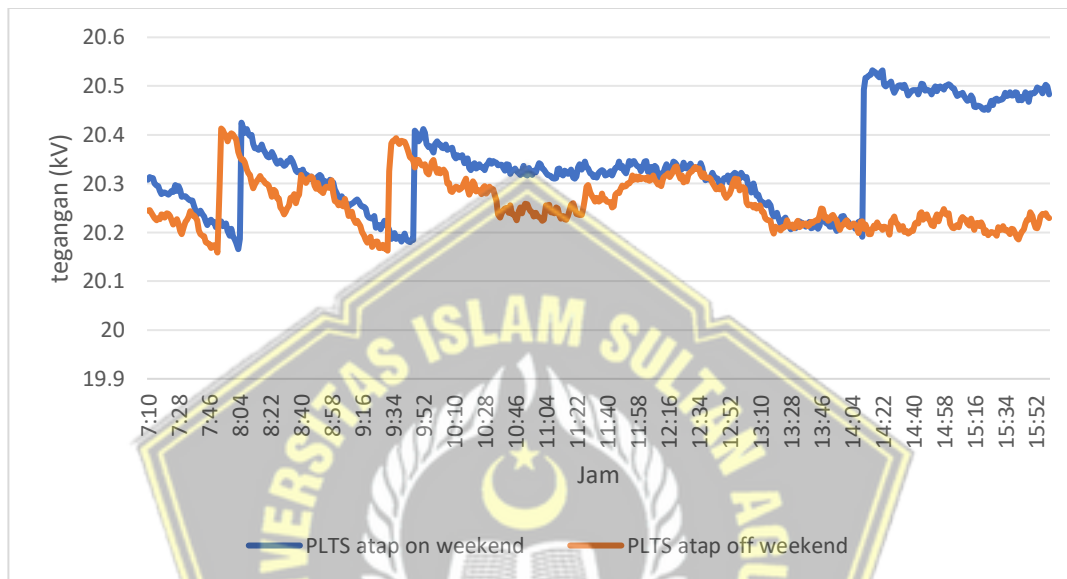
Data tabel 4.4 adalah data hasil pengukuran yang ditampilkan oleh Power Quality Meter (PQM) yang merupakan nilai pada sisi sekunder dari Potential Transformer (PT). Oleh karena itu, untuk memperoleh nilai sebenarnya pada sisi primer, hasil pengukuran tersebut perlu dikalikan dengan rasio PT yang digunakan. Dengan demikian, nilai arus, tegangan, maupun daya yang dianalisis pada laporan ini merupakan hasil perhitungan setelah dikonversi ke sisi primer. Penulis akan memberikan contoh perhitungan daya dari tabel tersebut pada jam 12.00

Contoh perhitungan daya dari tabel tersebut pada jam 12.00:

- Data sekunder pada PQM sebagai berikut:
 - Tegangan $V_{AN} = 58.83$ volt ; $V_{BN} = 59.33$ volt; $V_{CN} = 59.32$ volt
 - Rasio PT = $20000/100 = 200$
- Data sekunder tersebut dikonversi ke primer untuk mendapatkan nilai sebenarnya dengan cara sebagai berikut:
 - $V_{p_AN} = V_{A} \times \text{Rasio PT} = 58.83 \times 200 = 11766$ v
 - $V_{p_BN} = V_{B} \times \text{Rasio PT} = 58.83 \times 200 = 11866$ v
 - $V_{p_CN} = V_{C} \times \text{Rasio PT} = 58.83 \times 200 = 11863$ v
- Perhitungan tegangan fasa ke fasa adalah sebagai berikut : $V_{LL} = V_{LN} \times \sqrt{3}$
 - $V_{p_A} = 11766 \times \sqrt{3} = 20335$ volt
 - $V_{p_B} = 11866 \times \sqrt{3} = 20528$ volt

$$- V_{p_C} = 11863 \times \sqrt{3} = 20523 \text{ volt}$$

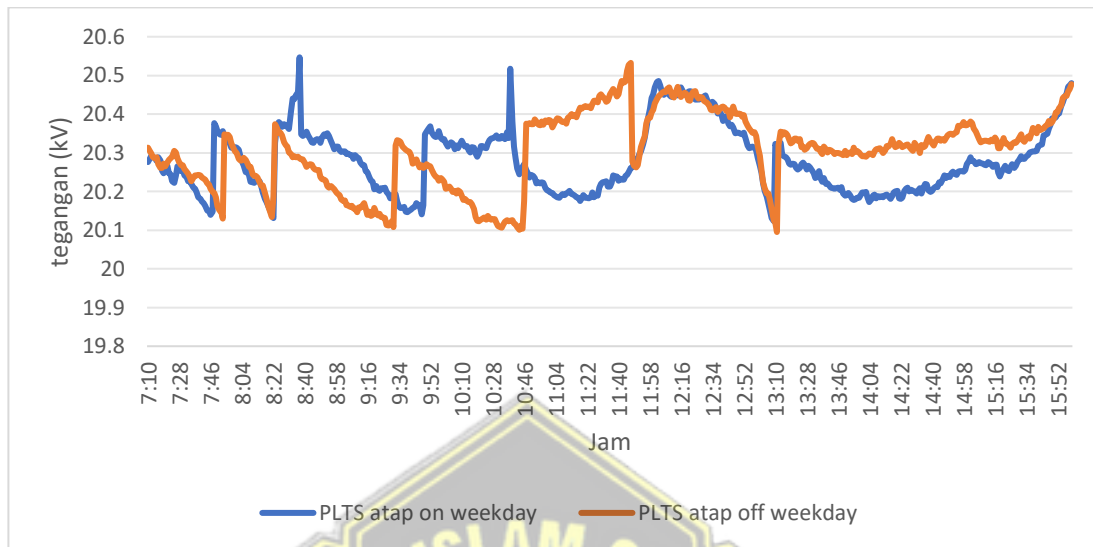
Nilai tegangan pada jam 12.00 sebesar 20,33 kV. Dengan menggunakan perhitungan yang sama pada periode waktu lain, maka diperoleh data yang penulis buat grafik untuk memudahkan pembaca pada gambar 4.5 dan gambar 4.6 sebagai berikut:



Gambar 4. 5 Grafik perbandingan Nilai tegangan ketika weekend

Gambar 4.5 menunjukkan grafik perbandingan nilai tegangan pada kondisi *weekend*. ketika PLTS atap off, tegangan rata- rata di yayasan tunas manunggal sebesar 20,25 kV dan tegangan maksimalnya sebesar 20,41 kV.

Adapun ketika PLTS atap on, tegangan rata- ratanya menjadi 20,34 kV dan tegangan maksimalnya sebesar 20,53 kV. Penetrasi PLTS atap pada *weekend* menaikkan tegangan pada periode jam 07.00 sampai jam 16.00 dengan rata-rata kenaikan sebesar sebesar 70 Volt atau 0,35% dari tegangan sebelum PLTS atap beroperasi.



Gambar 4. 6 Grafik perbandingan Nilai tegangan ketika weekday

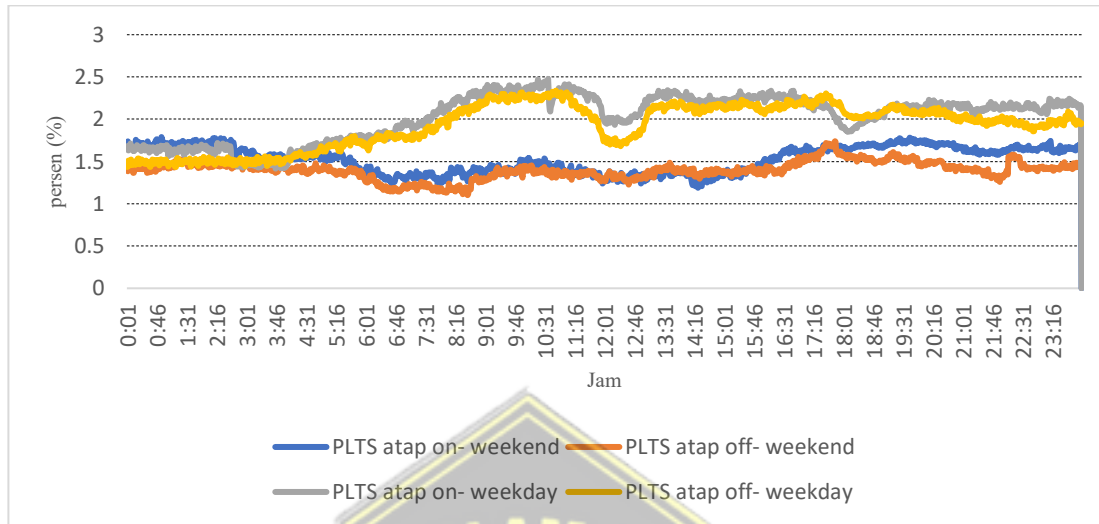
Gambar 4.6 menunjukkan grafik perbandingan nilai tegangan pada kondisi *weekday*. ketika PLTS atap off, tegangan rata- rata di yayasan tunas manunggal sebesar 20,30 kV dan tegangan maksimalnya sebesar 20,53 kV. sedangkan ketika PLTS atap on, tegangan rata- ratanya menjadi 20,27 kV dan tegangan maksimalnya sebesar 20,54 kV. Penetrasi PLTS atap pada *weekday* tidak membuat adanya kenaikan tegangan.

Hasil untuk analisa tegangan yaitu ketika PLTS atap on pada kondisi *weekend*, membuat kenaikan tegangan sebesar 70 volt atau kenaikan sebesar 0,35% dari tegangan sebelumnya, sedangkan ketika PLTS atap on kondisi *weekday* tidak membuat terjadinya kenaikan tegangan.

Hasil analisa menunjukkan bahwa pengaruh tegangan ketika PLTS atap dihidupkan, baik kondisi *weekend* maupun *weekday* tidak menimbulkan dampak berbahaya terhadap tegangan (masih dalam kategori aman)

4.4 Analisa THD Tegangan (THD V)

Analisa besarnya nilai total harmonik tegangan (THD V) dilakukan untuk mengetahui nilai harmonisa tegangan ketika penetrasi PLTS atap ke jaringan PLN apakah masih dalam batas standar atau melebihi batas standar yang diizinkan yaitu $\leq 5\%$



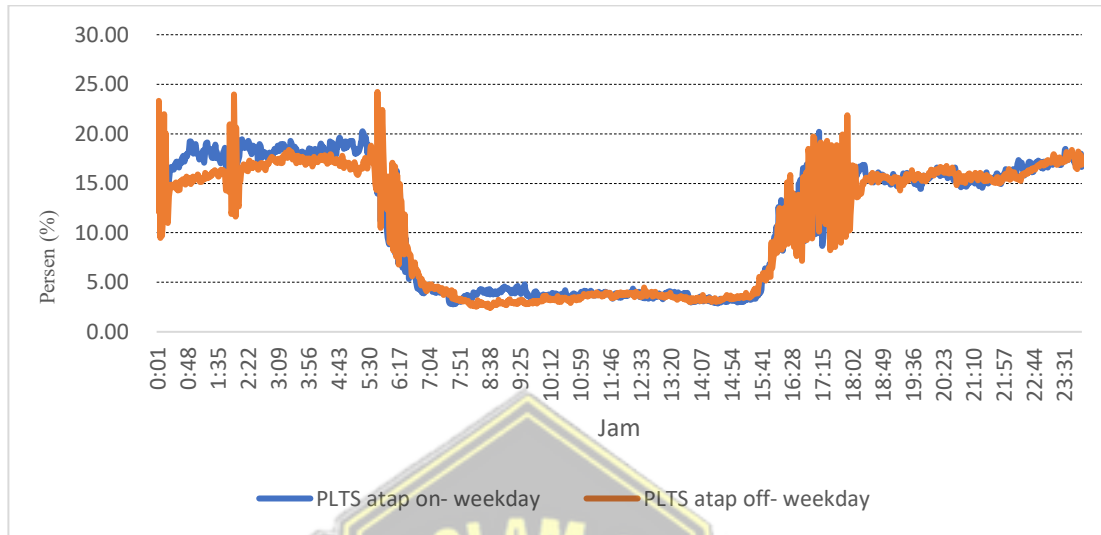
Gambar 4. 7 perbandingan Nilai THD tegangan (THD V)

Gambar 4.7 menunjukkan hasil pengukuran di yayasan tunas manunggal terhadap pengaruh analisa THD tegangan menunjukkan bahwa pada 4 kondisi tersebut, semuanya masih dalam batas normal. nilai THD V paling tinggi terjadi ketika waktu *weekday* atau berbeban yaitu sebesar 2,47%. nilai tersebut masih dibawah batas yang diizinkan.

Dengan kata lain, penetrasi PV ke jaringan PLN tidak berdampak signifikan terhadap peningkatan THD tegangan. tegangan ketika PLTS atap dihidupkan, menunjukkan bahwa THD tegangan nilainya masih dibawah 5%.

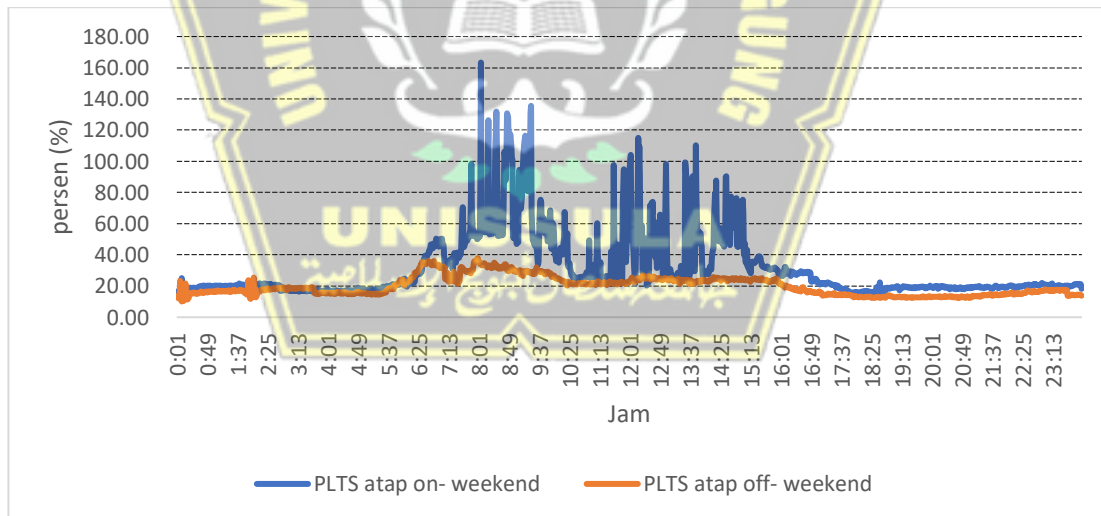
4.5 Analisa THD Arus (THD I)

Pada analisa THD arus ini, analisa dilakukan dengan membandingkan saat waktu *weekend* kondisi PLTS atap off dan inverter on (dalam kondisi tidak berbeban), serta membandingkan waktu *weekday* kondisi PLTS atap off dan PLTS atap on.



Gambar 4. 8 Grafik perbandingan Nilai THD arus (THD I) pada hari kerja (*weekday*)

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa ketika *weekday* atau berbeban, nilai THD arus (THD I) ketika PLTS atap on maupun off, tidak terjadi perbedaan signifikan. Dan nilai saat siang hari, menunjukkan nilai yang masih dibawah 5%.



Gambar 4. 9 Grafik perbandingan Nilai THD arus (THD I) pada hari libur (*weekend*)

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa hasil pengukuran ketika hari libur (*weekend*) atau tidak berbeban, nilai THD arus (THD I) melonjak tinggi ketika inverter on dan adanya *reverse power* ke jaringan PLN. Nilai lonjakan tertinggi mencapai 150%, dan harmonisa ini akan mengakibatkan gangguan frekuensi pada jaringan PLN

Tabel 4. 5 Hasil analisa PLTS atap Yayasan Tunas Manunggal

No	Parameter	PLTS off-weekend	PLTS on-weekend	PLTS off-weekday	PLTS on-weekday
1	Daya	Normal	Terjadi reverse power	Normal	Ada penurunan daya PLN, tapi tidak terjadi <i>reverse power</i>
2	Tegangan	Normal	Normal	Normal	Normal
3	THD V	Normal	Normal	Normal	Normal
4	THD I	Tinggi	Sangat tinggi	Normal	Normal

Tabel 4.5 menunjukkan hasil analisa secara keseluruhan terkait dengan pengaruh PLTS atap yayasan Tunas Manunggal ditunjukkan pada tabel 4 yaitu adanya *reverse power* ke jaringan PLN ketika PLTS hidup pada waktu hari libur mengakibatkan adanya peningkatan nilai THD Arus (THD I). Sedangkan ketika hari kerja hanya mengakibatkan penurunan penjualan PLN, tetapi tidak mengganggu parameter kualitas daya.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

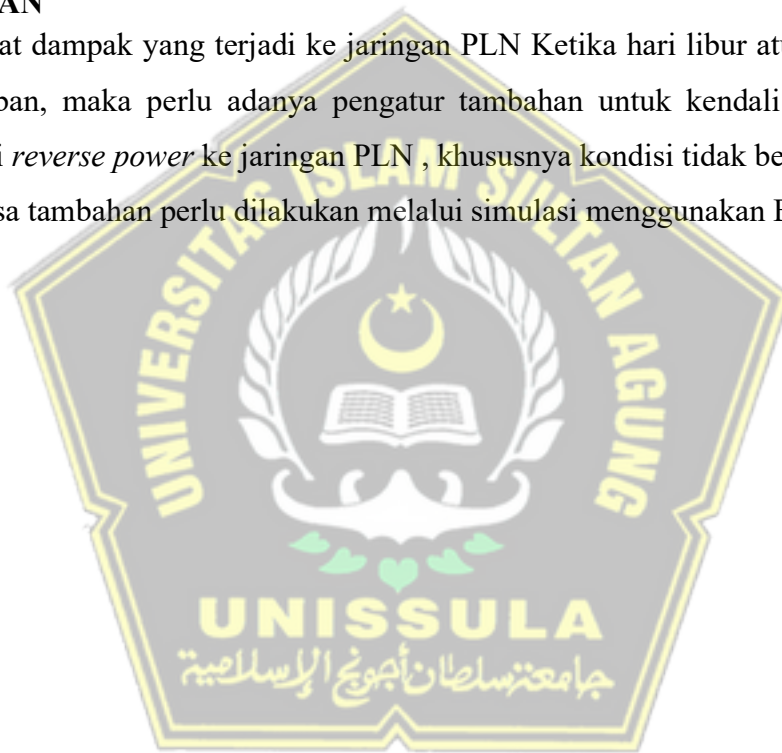
5.1 KESIMPULAN

1. Hasil pengukuran pada hari kerja (*weekday*), beban di yayasan tunas manunggal cukup besar dan melebihi daya yang dihasilkan PLTS atap, sehingga ketika PLTS atap dihidupkan tidak terjadi *reverse power* (aliran daya balik) di jaringan PLN.
2. Hasil pengukuran pada hari libur (*weekend*) ketika PLTS atap dihidupkan, maka pelanggan yayasan Tunas manunggal pada jam 07.22 sampai dengan 15.07 mengalami *reverse power*/ aliran daya balik. Aliran daya balik yang dikirim oleh PV yayasan Tunas Manunggal ke jaringan PLN bervariasi dengan nilai yang fluktuatif dengan nilai paling tinggi sebesar 65,54 kW pada jam 12.28 atau sebesar 59,5% dari kapasitas maksimal PLTS atap yayasan tunas manunggal 110 kWp dan 7,5% dari daya kontrak 865 kVA.
3. Hasil untuk analisa tegangan yaitu ketika PLTS atap on pada kondisi *weekend*, membuat kenaikan tegangan sebesar 70 volt atau kenaikan sebesar 0,35% dari tegangan sebelumnya, sedangkan ketika PLTS atap on kondisi *weekday* tidak membuat terjadinya kenaikan tegangan sehingga dapat disimpulkan bahwa adanya penetrasi PLTS atap baik kondisi *weekend* maupun *weekday* tidak menimbulkan dampak berbahaya terhadap tegangan (masih dalam kategori aman).
4. Hasil pengukuran di yayasan tunas manunggal terhadap pengaruh analisa THD tegangan menunjukkan bahwa pada 4 kondisi tersebut, semuanya masih dalam batas normal. nilai THD V paling tinggi terjadi ketika waktu *weekday* atau berbeban yaitu sebesar 2,47%. nilai tersebut masih dibawah batas yang diizinkan yaitu dibawah 5%.
5. Hasil pengukuran di yayasan tunas manunggal terhadap pengaruh analisa THD arus menunjukkan bahwa ketika *weekday* atau berbeban, nilai THD arus (THD I) ketika PLTS atap on maupun off, tidak terjadi perbedaan signifikan. Dan nilai saat

siang hari, menunjukkan nilai yang masih dibawah 5%. Adapun ketika hari libur (*weekend*) atau tidak berbeban, nilai THD arus (THD I) melonjak tinggi ketika inverter on dan adanya *reverse power* ke jaringan PLN. Nilai lonjakan tertinggi mencapai 150%, dan harmonisa ini akan mengakibatkan gangguan frekuensi pada jaringan PLN

5.2 SARAN

1. Melihat dampak yang terjadi ke jaringan PLN Ketika hari libur atua kondisi tidak berbeban, maka perlu adanya pengatur tambahan untuk kendali sehingga tidak terjadi *reverse power* ke jaringan PLN , khususnya kondisi tidak berbeban.
2. Analisa tambahan perlu dilakukan melalui simulasi menggunakan ETAP



DAFTAR PUSTAKA

- Alam, M. J. E., Muttaqi, K. M., & Sutanto, D. (2014). An approach for online assessment of rooftop solar PV impacts on low-voltage distribution networks. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(2), 663–672. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2013.2280635>
- Artema. (2020). *Saluran distribusi listrik*. Artema.
- Barrero-González, F., Pires, V. F., Sousa, J. L., Martins, J. F., Milanés-Montero, M. I., González-Romera, E., & Romero-Cadaval, E. (2019). Photovoltaic Power Converter Management in Unbalanced Low Voltage Networks with Ancillary Services Support. *Energies*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/en12060972>
- Budiman, F. N., & Ramadhani, M. R. (2018). Total Harmonic Distortion Comparison between Sinusoidal PWM Inverter and Multilevel Inverter in Solar Panel. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*, 191–202. <https://doi.org/10.22219/kinetik.v3i3.617>
- Chandra, A. , I. E. , Z. S. , & I. S. (2019). *Simulasi Grid Connected PV Dengan Fungsi Kompensasi Daya Reaktif PV-Inverter Menggunakan Kontrol ANN*. <https://journal.unesa.ac.id/index.php/inajeee/article/view/4777/2616>
- Harmini, H. , & N. T. (2020). Desain Solar Power Inverter pada Sistem Photovoltaic. In *Tahun* (Vol. 12, Issue 1). <https://journals.usm.ac.id/index.php/elektrika/article/view/1863>
- IEEE Std 1547-2003. (2003). *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*.
- Iskandar, A., Firmansyah, R. F., & Hidayat, L. (2022). Harmonics analysis of PV rooftop inverter in distribution grid. *Jurnal Tenaga Listrik Dan Energi Baru*, 5(1), 25–33.
- Jaya, A., & Ashad, B. A. (2020). Analisis Rugi-Rugi Daya Jaringan Distribusi Penyulang POLDA Area Makassar Utara dengan Menggunakan ETAP 12.6 Sugianto. In *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro* (Vol. 7, Issue 1).
- Kementrian ESDM. (2020). *Peraturan Menteri Energi dan sumber daya Mineral tentang aturan jaringan sistem tenaga listrik (Grid Code)*.

kementrian ESDM. (2021). *MENTERI ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA*.

Kementrian ESDM. (2024). *Permen ESDM Nomor 2 tahun 2024*.

Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.

Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., & Vittal, V. (2004). Definition and classification of power system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(3), 1387–1401. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.825981>

Kurniawan, R., Daud, M., & Hasibuan, A. (2022). Impact of Intermittent Renewable Energy Generations Penetration on Harmonics in Microgrid Distribution Networks. *Proceeding - ELTICOM 2022: 6th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering 2022*, 30–37. <https://doi.org/10.1109/ELTICOM57747.2022.10038200>

Li, Z., Song, Q., An, F., Zhao, B., Yu, Z., & Zeng, R. (2021). Review on DC transmission systems for integrating large-scale offshore wind farms. *Energy Conversion and Economics*, 2(1), 1–14. <https://doi.org/10.1049/enc2.12023>

Majeed, I., & Nwulu, N. (2022). Impact of Reverse Power Flow on Distributed Transformers in a Solar-Photovoltaic-Integrated Low-Voltage Network. *Energies*, 15, 9238. <https://doi.org/10.3390/en15239238>

Mudakir, Aripriharta, & Wibawa, A. P. (2024). Analysis of battery energy storage system (BESS) performance in reducing the impact of variable renewable energy generation intermittency on the electricity system. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 15(2), 158–176. <https://doi.org/10.55981/j.mev.2024.1032>

Neumann, T. (2012). Short Circuit Current Contribution of a Photovoltaic Power Plant. In *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 45). <https://doi.org/10.3182/20120902-4-FR-2032.00061>

Nugroho, D. (2021). Analisis harmonisa akibat penetrasi PLTS atap 80 kWp pada jaringan distribusi PLN. *Jurnal Energi Terbarukan*, 9(1), 33–41.

Pratama, Y. (2020). Studi penetrasi PLTS 100 kWp terhadap kualitas daya jaringan distribusi 20 kV. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 7(2), 77–85.

- Putra, I. (2021). Simulation of PV rooftop integration in 20 kV distribution system using ETAP. *Proceedings of the 2021 International Conference on Power Engineering*, 210–215.
- Rahman, M., Ismail, A. F., & Abdullah, T. (2019). Analysis of reverse power due to rooftop PV penetration in distribution system. *IEEE Access*, 7, 12211–12219.
- Rashid, M. H. (2015). *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications* (4th ed.). Pearson.
- Ravaghi Ardabili, H. A., Haghifam, M. R., & Abedi, S. M. (2021). A probabilistic reliability-centred maintenance approach for electrical distribution networks. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 15(6), 1070–1080. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12081>
- Rehman, W. U., Bhatti, A. R., Awan, A. B., Sajjad, I. A., Khan, A. A., Bo, R., Haroon, S. S., Amin, S., Tlili, I., & Oboreh-Snapps, O. (2020). The penetration of renewable and sustainable energy in Asia: A state-of-the-art review on net-metering. In *IEEE Access* (Vol. 8, pp. 170364–170388). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022738>
- Rosyadi, G., Syahputra, R., & Mujaahid, F. (2018). Electrical Power Distribution Network Reliability: A Case Study in Wates Substation, Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY)*, 2(2).
- Samsurizal, S., & Hadinoto, B. (2020). Studi Analisis Dampak Overload Transformator Terhadap Kualitas Daya Di PT. PLN(Persero) Up3 Pondok Gede. *KILAT*, 9, 136–142. <https://doi.org/10.33322/kilat.v9i1.784>
- Sutanto, H., Rahman, A., & Santoso, D. (2020). Impact of rooftop PV on reverse power flow in distribution network. *International Journal of Renewable Energy Research*, 10(3), 1150–1158.
- Watson, N. R., & Watson, J. D. (2020). An overview of HVDC technology. In *Energies* (Vol. 13, Issue 17). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en13174342>
- Wijaya, B. (2018). Voltage rise effect due to rooftop PV integration in distribution networks. *Jurnal Energi Dan Kelistrikan*, 10(2), 45–53.

- Yin, J., Molini, A., & Porporato, A. (2020). Impacts of solar intermittency on future photovoltaic reliability. *Nature Communications*, 11(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18602-6>
- Yongning, C., Yan, L., Zhen, L., Ziyu, C., & Hongzhi, L. (2019). *Study on Grid-connected Renewable Energy Grid Code Compliance*.
<https://doi.org/10.1109/iSPEC48194.2019.8974936>

