

ANALISIS RUGI DAYA KABEL DC DAN AC PADA PLTS ROOFTOP 1,4 MWP BERDASARKAN STANDAR IEC

Muhammad Syukron^{1*}, Antika Prasetyaningtyas², Kukuh Trisna Pambudi³, Alvin Zuhair⁴, Jihad Nalindro Wening Bagas⁵

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, Teknik Mekatronika, dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik Universitas Tidar; Jl. Kapten Suparman 39 Potrobangsari, Magelang Utara, Jawa Tengah; (0293) 364113

Keywords:

Rooftop photovoltaic (PV); cable power loss; voltage drop; current carrying capacity.

Correspondent Email:

muhammadsyukron@untidar.ac.id

Abstrak. Analisis rugi daya kabel sisi DC dan AC pada system PLTS rooftop berkapasitas 1,4 MWp dilakukan dengan mengacu pada standar IEC 60364 dan IEC 62548. Perhitungan teknis berbasis data actual instalasi industri digunakan untuk mengevaluasi kapasitas hantar arus kabe;, faktor koreksi temperature dan pengelompokan, penurunan tegangan, serta koordinasi proteksi arus lebih. Pada sisi DC, kabel 1C-6 mm² memiliki kapasitas hantar arus terkoreksi sebesar 20,79 A, lebih besar dari arus operasi 17,40 A, dengan penurunan tegangan berada kisaran 1,59%-1,91%. Pada sisi AC, penurunan tegangan dari inverter ke LV Switchgear sebesar 0,18% sedangkan dari LV Switchgear ke titik interkoneksi sebesar 1,36%. Total rugi daya kabel sisi AC diperkirakan sekitar 1,5% terhadap kapasitas sistem. Seluruh hasil evaluasi menunjukkan bahwa desain kabel telah memenuhi batas keselamatan termal dan batas penurunan tegangan yang direkomendasikan standar IEC. Analisis ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat efisiensi sistem penyaluran daya serta dapat menjadi acuan teknis dalam perancangan PLTS rooftop skala industri pada kondisi iklim tropis.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. Power loss analysis of DC and AC cables in a 1.4 MWp rooftop photovoltaic (PV) system was conducted in accordance with IEC 60364 and IEC 62548 standards. Engineering calculations based on actual industrial installation data were applied to evaluate cable current carrying capacity, temperature and grouping derating factors, voltage drop, and overcurrent protection coordination. On the DC side, the 1C-6 mm² cable provided a corrected current carrying capacity of 20.79 A, exceeding the operating current of 17.40 A, with voltage drop ranging from 1.59% to 1.91%. On the AC side, the voltage drop from the inverter to the LV Switchgear was 0.18%, while from the LV Switchgear to the point of interconnection it reached 1.36%. The total AC cable power loss was approximately 1.5% of the system capacity. Overall results indicate that the cable design satisfies thermal safety requirements and voltage drop limits recommended by IEC standards. The findings provide quantitative insight into distribution system efficiency and serve as a practical reference for industrial-scale rooftop PV cable design in tropical environments.

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) rooftop pada sektor industri di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan kebijakan transisi energi dan kebutuhan

efisiensi energi listrik [1]. PLTS rooftop menjadi solusi yang menarik karena dapat memanfaatkan area atap bangunan industri tanpa memerlukan lahan tambahan serta mampu menurunkan konsumsi energi listrik

dari jaringan utilitas [2]. PLTS rooftop skala industri umumnya memiliki kapasitas daya yang besar dengan konfigurasi sistem DC dan AC yang kompleks. Kondisi ini menuntut perancangan sistem kelistrikan yang tepat, terutama pada aspek penyaluran daya listrik. Salah satu komponen utama dalam sistem tersebut adalah kabel listrik yang berfungsi menyalurkan energi dari modul fotovoltaik menuju inverter pada sisi DC, serta dari inverter menuju sistem distribusi pada sisi AC [3]. Pemilihan ukuran kabel yang tidak sesuai dapat menyebabkan rugi daya (power loss) dan penurunan tegangan (voltage drop) yang berdampak pada penurunan efisiensi sistem PLTS [4][5]. Selain itu, kesalahan dalam penentuan ukuran kabel juga dapat meningkatkan temperatur konduktor dan berpotensi menurunkan keandalan serta umur layanan instalasi listrik [6]. Oleh karena itu, perancangan kabel harus memperhatikan arus kerja, panjang lintasan kabel, metode instalasi, serta kondisi lingkungan. Standar internasional **IEC 60364** mengatur ketentuan instalasi listrik tegangan rendah, termasuk pemilihan dan pemasangan sistem pengkabelan, faktor koreksi temperatur, pengelompokan kabel, serta batas penurunan tegangan yang diizinkan [7]. Sementara itu, **IEC 62548** memberikan panduan khusus mengenai persyaratan desain dan instalasi sistem fotovoltaik [8]. Penerapan kedua standar ini menjadi sangat penting pada PLTS rooftop skala industri yang umumnya terpasang di lingkungan terbuka dengan temperatur relatif tinggi dan pengelompokan kabel yang kompleks [8][9].

Beberapa penelitian pada jurnal nasional dan internasional telah membahas performa dan efisiensi sistem PLTS [10][11][12]. Namun, sebagian besar penelitian tersebut lebih berfokus pada analisis kinerja sistem secara umum, sementara kajian rinci mengenai rugi daya kabel DC dan AC pada PLTS rooftop skala industri masih terbatas. Selain itu, penelitian yang secara khusus menggunakan data implementasi nyata di lapangan pada kondisi iklim tropis Indonesia juga masih relatif sedikit.

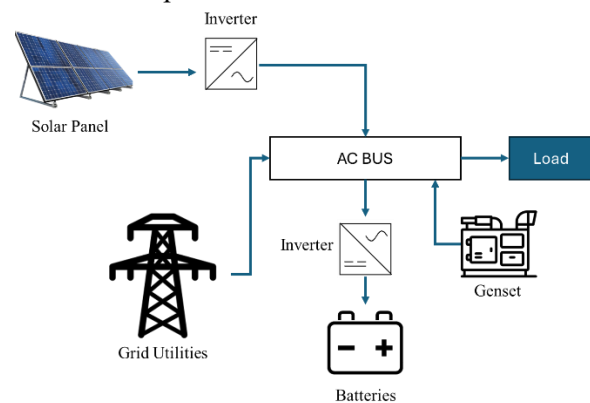
Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis rugi daya kabel DC dan AC pada PLTS rooftop berkapasitas 1,4 MWp berdasarkan standar IEC dengan menggunakan data aktual implementasi sistem.

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam perancangan sistem kabel PLTS rooftop skala industri yang efisien, aman, dan andal [13][14] [15].

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Rooftop

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) rooftop merupakan sistem pembangkitan listrik berbasis energi surya yang memanfaatkan modul fotovoltaik yang dipasang pada atap bangunan. Sistem ini umumnya terdiri dari modul PV, rangkaian DC, inverter, sistem AC, serta peralatan proteksi dan distribusi. Pada PLTS rooftop skala industri, kapasitas sistem relatif besar sehingga konfigurasi sistem DC dan AC menjadi lebih kompleks dibandingkan sistem skala kecil. PLTS rooftop skala industri umumnya menggunakan sistem *grid-connected*, di mana daya listrik yang dihasilkan disalurkan langsung ke jaringan internal beban atau ke jaringan utilitas. Oleh karena itu, keandalan dan efisiensi sistem menjadi aspek penting dalam perancangan dan pengoperasian PLTS rooftop industri.



Gambar 1. Topologi Sistem PLTS On-grid

2.2 Sistem Kabel pada PLTS

Kabel listrik merupakan komponen utama dalam sistem PLTS yang berfungsi menyalurkan daya listrik dari modul fotovoltaik menuju inverter pada sisi DC, serta dari inverter menuju panel distribusi dan titik interkoneksi pada sisi AC. Sistem kabel pada PLTS terbagi menjadi kabel DC dan kabel AC, yang masing-masing memiliki karakteristik dan persyaratan teknis yang berbeda. Kabel DC pada PLTS

beroperasi pada tegangan tinggi dan arus searah, sehingga harus memiliki ketahanan terhadap radiasi ultraviolet, temperatur lingkungan, serta kondisi pemasangan di area terbuka. Sementara itu, kabel AC berfungsi menyalurkan daya keluaran inverter menuju sistem distribusi dan harus memenuhi persyaratan keselamatan instalasi listrik tegangan rendah.

2.3 Rugi Daya dan Penurunan Tegangan pada Kabel

Rugi daya pada kabel listrik terjadi akibat resistansi konduktor ketika dialiri arus listrik. Rugi daya ini umumnya dinyatakan dalam bentuk penurunan tegangan (voltage drop) dan kehilangan daya (power loss). Besarnya rugi daya dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain arus yang mengalir, panjang kabel, luas penampang konduktor, serta material kabel. Rugi daya akibat resistansi konduktor dihitung menggunakan hukum Joule:

$$P_{loss} = I^2 \times R$$

di mana:

P_{loss}	= rugi daya (W)
I	= arus yang mengalir (A)
R	= resistansi total kabel (Ω)

Pada sistem PLTS, rugi daya kabel yang berlebihan dapat menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan dan menyebabkan daya yang diterima oleh beban menjadi lebih kecil dari daya yang dihasilkan modul fotovoltaik. Oleh karena itu, perhitungan rugi daya dan penurunan tegangan menjadi bagian penting dalam proses perancangan sistem kabel, baik pada sisi DC maupun AC.

2.4 Faktor Derating Kabel

Dalam praktik instalasi listrik, kapasitas hantar arus kabel tidak hanya ditentukan oleh luas penampang konduktor, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan metode pemasangan. Faktor-faktor seperti temperatur lingkungan, pengelompokan kabel, serta metode instalasi dapat menurunkan kemampuan kabel dalam menghantarkan arus secara aman. Penurunan kemampuan ini dikenal sebagai faktor derating.

Standar IEC 60364 memberikan panduan mengenai faktor koreksi atau faktor derating yang harus diterapkan pada perhitungan kapasitas hantar arus kabel. Penerapan faktor derating sangat penting pada PLTS rooftop skala industri, karena instalasi kabel umumnya berada di area terbuka dengan temperatur tinggi dan pengelompokan kabel dalam tray atau conduit yang padat.

2.5 Standar IEC pada Perancangan Kabel PLTS

Perancangan sistem kabel pada PLTS harus mengacu pada standar internasional untuk menjamin keselamatan, keandalan, dan performa sistem. IEC 60364 mengatur ketentuan instalasi listrik tegangan rendah, termasuk pemilihan ukuran kabel, faktor koreksi, dan batas maksimum penurunan tegangan yang diperbolehkan. Standar ini menjadi acuan utama dalam perancangan sistem kabel AC dan sebagian aspek sistem DC.

Selain itu, IEC 62548 secara khusus mengatur persyaratan desain dan instalasi sistem fotovoltaik, termasuk aspek keselamatan dan tata cara pemasangan komponen PLTS. Penggunaan standar IEC 60364 dan IEC 62548 secara bersamaan memberikan kerangka teknis yang komprehensif dalam perancangan sistem kabel PLTS rooftop skala industri.

2.6 Penelitian Terkait

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas performa dan efisiensi sistem PLTS, baik melalui pendekatan simulasi maupun analisis sistem secara umum. Namun, kajian yang secara khusus menganalisis rugi daya kabel DC dan AC dengan mempertimbangkan faktor derating dan kondisi instalasi nyata masih relatif terbatas, terutama pada PLTS rooftop skala industri di wilayah beriklim tropis.

Oleh karena itu, penelitian ini memfokuskan kajian pada analisis rugi daya kabel DC dan AC berdasarkan standar IEC dengan menggunakan data aktual implementasi PLTS rooftop industri, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi yang lebih aplikatif dan

relevan terhadap praktik perancangan sistem PLTS.

3. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini menganalisa perancangan komponen utama dalam Pembangunan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dengan kapasitas 1.4 Mwp yang dipasang secara on-grid. Dengan perhitungan ini menjelaskan hasil perhitungan penentuan ukuran peralatan utama sistem, yang meliputi spesifikasi kabel DC, rugi daya kabel DC, spesifikasi kabel AC, rugi daya kabel AC, serta spesifikasi perangkat proteksi berupa pemutus sirkit (*breaker*).

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Dalam penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif deskriptif dengan pendekatan analisis teknis berbasis standar internasional IEC. Penelitian kuantitatif digunakan karena seluruh proses analisis dilakukan melalui perhitungan numerik terhadap parameter kelistrikan sistem PLTS rooftop, meliputi arus kerja, kapasitas hantar arus kabel, faktor koreksi (*derating factor*), penurunan tegangan (*voltage drop*), serta rugi daya (*power loss*). Data yang dianalisis berupa data teknis aktual hasil implementasi sistem PLTS rooftop berkapasitas 1,4 MWp pada sektor industri.

Pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan secara sistematis karakteristik sistem kabel DC dan AC yang terpasang, serta mengevaluasi kesesuaiannya terhadap standar yang berlaku. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan kapasitas hantar arus terkoreksi dan persentase penurunan tegangan terhadap batas yang direkomendasikan dalam standar IEC 60364 dan IEC 62548. Dengan pendekatan ini, penelitian tidak hanya menghitung besar rugi daya yang terjadi, tetapi juga menganalisis tingkat keamanan dan keandalan desain instalasi kabel.

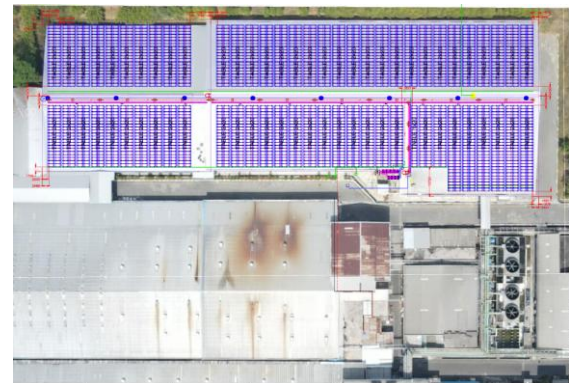
Secara metodologis menggunakan pendekatan *engineering calculation method*, yaitu, metode analisis berbasis persamaan dasar kelistrikan yang mengacu pada hukum ohm dan prinsip daya listrik. Proses analisis dilakukan melalui tahapan identifikasi parameter sistem, perhitungan kapasistas hantar arus kabel dengan mempertimbangkan faktor temperatur dan pengelompokkan kabel, perhitungan

tegangan pada sisi DC dan AC, serta evaluasi pemilihan perangkat proteksi berdasarkan arus maksimum dan kapasitas kabel.

Dengan pendekatan tersebut diharapkan hasil penelitian mampu memberikan gambaran kuantitatif mengenai besarnya rugi daya kabel pada sistem PLTS rooftop skala industri serta tingkat kesesuaian desain terhadap standar keselamatan dan efisiensi sistem tenaga listrik.

3.2 Objek dan Lokasi Penelitian

Pemasangan PLTS rooftop terletak pada sebuah Perusahaan industri tekstil dengan kapasitas terpasang sebesar 1,4 MWp di wilayah Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah. Sistem PLTS rooftop tersebut digunakan sebagai objek penelitian untuk menganalisis karakteristik sistem kelistrikannya, terkhusus pada sisi penyaluran daya yang disambungkan pada kabel AC dan DC. Data teknis yang digunakan merupakan dokumen perencanaan dan perhitungannya sistem PLTS, yang selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi rugi daya dan kesesuaian perancangan kabel berdasarkan standar yang berlaku



Gambar 2. Layout Pemasangan PLTS rooftop

Gambar 2 diatas merupakan *layout site plan* pemasangan PLTS yang akan diimplementasikan. Objek penelitian ini meliputi kabel DC dari rangkaian modul fotovoltaik (PV string) menuju inverter dan Kabel AC dari inver menuju panel distribusi dan titik interkoneksi sistem.

3.3 Data Penelitian

3.3.1 Spesifikasi data pemasangan PLTS

Design Specification				
Area No	TFO North	TFO South	TWT North	TWT South
Roof Type	Metal Trapezoid	Metal Trapezoid	Metal Trapezoid	Metal Trapezoid
Titl Angle	10°	10°	10°	10°
Azimuth	-9°	171°	-9°	171°
Roof Height	10	10	16	16
No. of module	400	400	880	956
Total Moduls	2636 pcs			
Modul Cap / Unit	550 Wp			
Total DC Capacity	1449.8 kWp			
Total AC Capacity	1250 kW			

Tabel 1 Desain spesifikasi pemasangan PLTS

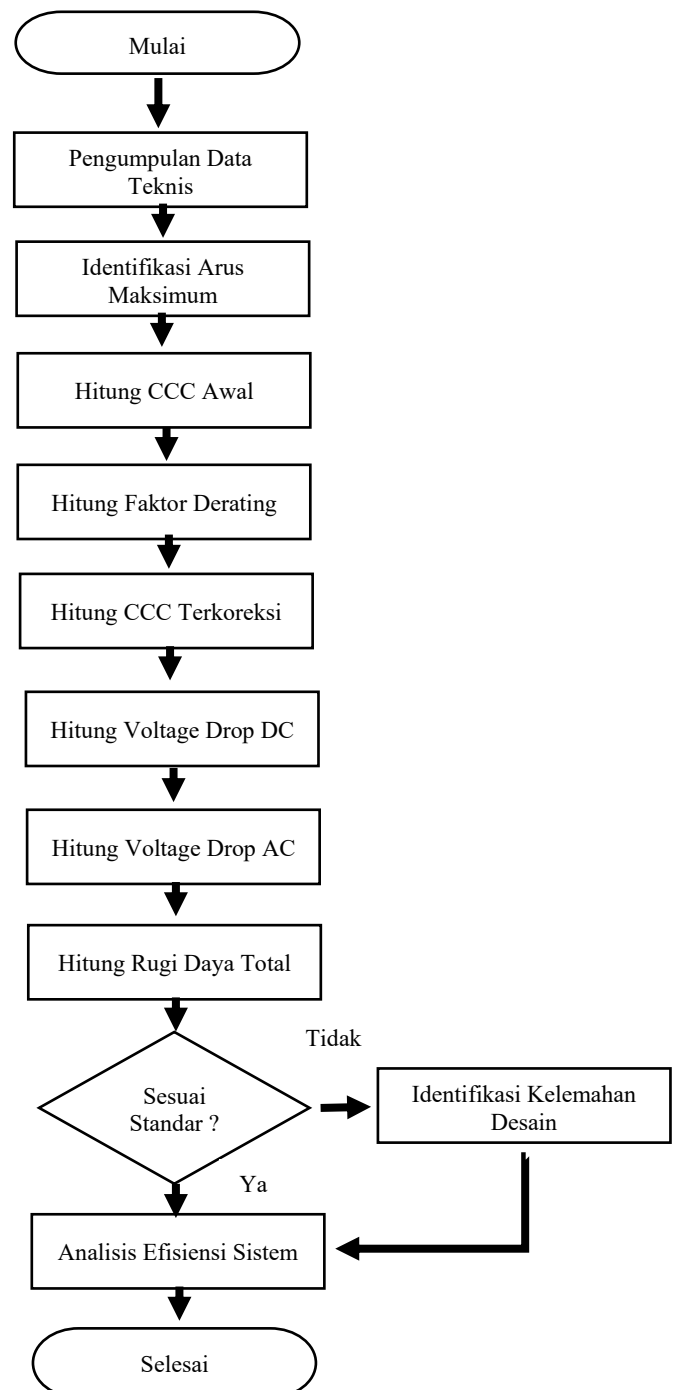
Pemasangan PLTS dalam penelitian dirancang dan dipasang pada empat sisi area bangunan yaitu *TFO North*, *TFO South*, *TWT North* dan *TWT South*, dengan jenis atap *metal trapezoid* pada sudut kemiringan modul sebesar 10°. Orientasi modul pada area *TFO North* dan *TWT North* memiliki *azimuth* -9°, sedangkan area *TFO South* dan *TWT South* memiliki *azimuth* 171°, yang mencerminkan perbedaan arah hadap modul terhadap matahari. Ketinggian atap pada area TFO adalah 10 m, sementara area TWT memiliki ketinggian atap sebesar 16 m. Jumlah modul yang terpasang pada masing-masing area adalah 400 modul pada *TFO North*, 400 modul pada *TFO South*, 880 modul pada *TWT North*, dan 956 modul pada *TWT South*, sehingga total modul yang digunakan dalam sistem ini berjumlah 2.636 unit. Setiap modul memiliki kapasitas terpasang sebesar 550 Wp, sehingga total kapasitas sisi arus searah (DC) sistem PLTS mencapai 1.449,8 kWp, sedangkan total kapasitas sisi arus bolak-balik (AC) sistem sebesar 1.250 kW.

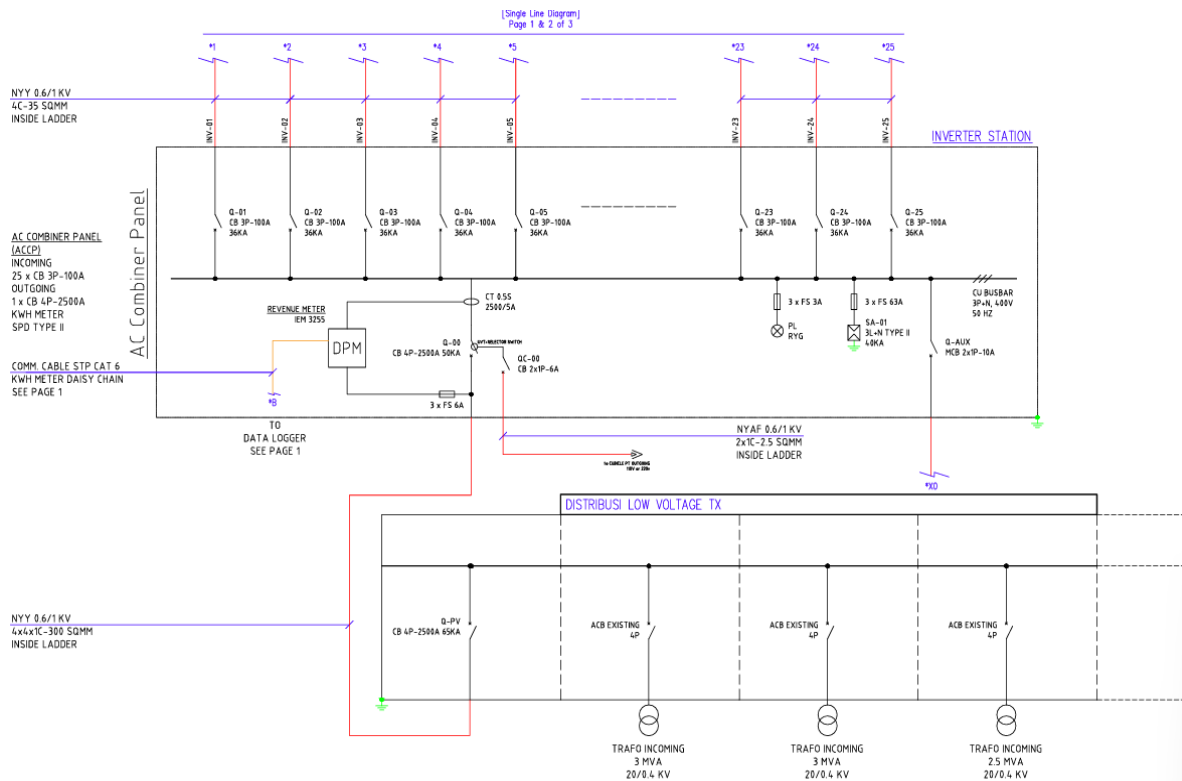
3.3.2 Single Line Diagram Instalasi PLTS

Berdasarkan *Single Line Diagram (SLD)* sistem PLTS rooftop yang dianalisis, konfigurasi sistem kelistrikan dirancang sebagai sistem *on-grid* yang terdiri dari rangkaian modul fotovoltaik, inverter, panel penggabung AC, sistem distribusi tegangan rendah, serta perangkat proteksi dan monitoring.

Setiap PV string dihubungkan ke inverter melalui jalur kabel DC yang dilengkapi dengan proteksi, sedangkan keluaran inverter disalurkan melalui kabel AC menuju AC Combiner Panel sebelum terhubung ke sistem distribusi dan transformator eksisting. Konfigurasi sistem yang ditunjukkan dalam SLD ini digunakan sebagai acuan dalam penentuan jalur kabel DC dan AC, identifikasi titik analisis, serta perhitungan kapasitas hantar arus, penurunan tegangan, dan rugi daya kabel berdasarkan kondisi instalasi aktual dan standar yang berlaku.

3.4 Diagram Alir Penelitian





Gambar 4 Single Line Diagram Instalasi Sistem PLTS

Diagram alir penelitian menggambarkan urutan sistematis tahapan analisis yang dilakukan dalam evaluasi rugi daya kabel pada system PLTS rooftop 1,4 MWp. Proses penelitian diawali dengan studi literatur terhadap standar instalasi listrik dan sistem fotovoltaik sebagai dasar normatif perhitungan. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data teknis sistem, meliputi parameter kelistrikan modul, inverter, spesifikasi kabel, serta panjang lintasan instalasi.

Tahap berikutnya adalah identifikasi arus maksimum pada sisi DC dan AC yang digunakan sebagai dasar perhitungan kapasitas hantar arus kabel. Perhitungan dilanjutkan dengan penerapan faktor koreksi temperatur dan pengelompokkan untuk memperoleh kapasitas hantar arus terkoreksi. Setelah itu dilakukan analisis penurunan tegangan dan rugi daya pada masing-masing segmen sistem.

Hasil perhitungan kemudian dievaluasi terhadap batas yang direkomendasikan standar. Apabila memenuhi kriteria teknis, analisis dilanjutkan pada evaluasi system secara keseluruhan. Diagram alir tersebut menunjukkan bahwa penelitian dilakukan

secara terstruktur, logis dan dapat direplikasi untuk sistem dengan karakteristik serupa.

3.5 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis melalui proses perhitungan rekayasa (engineering calculation) untuk mengevaluasi kinerja sistem kabel pada PLTS rooftop berkapasitas 1,4 MWp. Analisis meliputi perhitungan kapasitas hantar arus, penurunan tegangan, rugi daya, serta evaluasi kesesuaian terhadap standar instalasi listrik.

3.5.1 Identifikasi Parameter Sistem

Tahap awal adalah menentukan parameter kelistrikan maksimum pada sisi DC dan AC. Pada sisi DC, arus desain ditentukan berdasarkan arus hubung singkat (I_{sc}) dan arus pada titik daya maksimum (I_{mp}) modul fotovoltaik.

Pada sisi AC, arus maksimum inverter dihitung berdasarkan daya keluaran inverter terhadap tegangan sistem tiga fasa, yang secara umum dapat dinyatakan sebagai:

$$I_{AC} = \frac{P}{\sqrt{3} \times V_{LL} \times \cos \phi}$$

dimana:

P = daya keluaran inverter (W)

V_{LL} = tegangan antar fasa (V)

$\cos \phi$ = faktor daya sistem

Arus maksimum inilah yang digunakan sebagai dasar perancangan kabel dan proteksi.

3.5.2 Perhitungan Kapasitas Hantar Arus Kabel

Kapasitas hantar arus kabel terkoreksi dihitung dengan mempertimbangkan faktor temperatur dan faktor pengelompokan kabel.

Faktor koreksi total dirumuskan sebagai:

$$F_{total} = F_{temp} \times F_{group}$$

Kapasitas hantar arus terkoreksi dihitung menggunakan persamaan:

$$CCC_{corr} = CCC_{nom} \times F_{total}$$

Dimana:

CCC_{nom} = kapasitas hantar arus nominal dari datasheet kabel

CCC_{corr} = kapasitas hantar arus setelah koreksi

Kabel dinyatakan memenuhi syarat apabila:

$$CCC_{corr} > I_{maks}$$

3.5.3 Perhitungan Penurunan Tegangan Sisi DC

Penurunan tegangan pada sisi DC dihitung berdasarkan hukum Ohm. Resistansi total kabel dinyatakan sebagai:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

atau berdasarkan nilai resistansi per kilometer dari datasheet:

$$R_{total} = \frac{R_c \times L}{1000}$$

Penurunan tegangan DC untuk dua penghantar (positif dan negatif) dihitung dengan:

$$V_d = 2 \times I \times R_{total}$$

Persentase penurunan tegangan dihitung sebagai:

$$\%V_d = \frac{V_d}{V_{string}} \times 100\%$$

3.5.4 Perhitungan Penurunan Tegangan Sisi AC Tiga Fasa

Untuk sistem AC tiga fasa, penurunan tegangan dihitung dengan:

$$V_d = \frac{I \times R_c \times L}{n \times 1000}$$

dimana:

n = jumlah kabel paralel

Persentase penurunan tegangan sistem tiga fasa dihitung menggunakan:

$$\%V_d = \frac{V_d}{V_{LL} \times \sqrt{3}} \times 100\%$$

Pendekatan ini digunakan karena tegangan sistem dinyatakan dalam bentuk tegangan garis-ke-garis (line-to-line).

3.5.5 Perhitungan Rugi Daya Kabel

Rugi daya akibat resistansi konduktor dihitung menggunakan persamaan dasar:

$$P_{loss} = I^2 \times R_{total}$$

Untuk kabel paralel, resistansi ekuivalen dihitung sebagai:

$$R_{eq} = \frac{R_{total}}{n}$$

sehingga rugi daya menjadi:

$$P_{loss} = I^2 \times R_{eq}$$

Perhitungan ini memberikan estimasi besarnya daya listrik yang hilang pada sistem penyaluran akibat disipasi panas pada konduktor.

3.5.6 Evaluasi Kesesuaian Standar

Hasil perhitungan dievaluasi berdasarkan kriteria berikut:

1. $CCC_{corr} > I_{maks}$
2. $\%V_d \leq$ batas maksimum standar instalasi
3. Rating breaker memenuhi:

$$I_{maks} < I_n < CCC_{corr}$$

dengan I_n adalah arus nominal perangkat proteksi.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Perhitungan Kabel DC

4.1.2. Parameter Kunci

Sebelum melakukan perhitungan penentuan ukuran kabel, kita perlu mengetahui arus keluaran DC maksimum (I_{sc}) dari modul PV serta kapasitas hantar arus (CCC) dari kabel yang dipilih.

Untuk perhitungan penurunan tegangan pada kondisi tunak (*steady state*), kita perlu mengetahui arus maksimum titik daya DC (I_{mp}) dari modul PV serta nilai resistansi dari kabel yang dipilih.

Parameter-parameter tersebut dapat dilihat pada lembar data (datasheet) komponen seperti ditunjukkan di bawah ini.

Spesifikasi		
Tipe Modul : JKM550M-72HL4		
STC		NOCT
Daya Maksimum(Pmax)		
550 Wp		409 Wp
Tegangan pada Daya Maksimum (Vmp)		
40,90 V		38,42 V
Arus pada Daya Maksimum (Imp)		
13,45 A		10,65 A
Tegangan Rangkaian Terbuka (Voc)		
49,65 V		46,84 V
Arus Hubung Singkat (Isc)		
14,03 A		11,33 A

Tabel 2 datasheet modul PV

STC (Standard Test Condition) adalah kondisi uji standar : radiasi 1000 W/m², suhu sel 25°C. *NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)* adalah kondisi operasi nyata di lapangan.

Diameter nominal (mm ²)	Kabel tunggal di udara bebas (A)	Kabel tunggal di permukaan (A)	Kabel berdekatan di permukaan (A)
1,5	30	29	24
2,5	41	39	33
4	55	52	44
6	70	67	57
10	98	93	79
16	132	125	107
25	176	167	142
35	218	207	176

Tabel 3 Kapasitas hantar arus kabel PV / Current carrying capacity (CCC) dari datasheet kabel

4.1.3 Faktor Koreksi untuk Penentuan Ukuran Kabel

Terdapat beberapa faktor koreksi yang perlu dipertimbangkan dalam perhitungan penentuan ukuran kabel. Faktor koreksi yang paling sering digunakan dalam perhitungan adalah faktor temperature lingkungan dan faktor

pengelompokkan (metode instalasi). Di bawah ini adalah tabel faktor koreksi untuk temperature udara sekitar dan pengelompokkan kabel sesuai dengan IEC 60364-5-52

Temperatur udara sekitar (°C)	PVC	XLPE dan EPR
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
30	1	1
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,5	0,71
65	–	0,65
70	–	0,58
75	–	0,5
80	–	0,41

Tabel 4 Faktor koreksi untuk temperatur udara sekitar selain 30°C yang diterapkan pada kapasitas hantar arus kabel di udara (IEC 60364-5-52)

Jumlah sirkuit atau kabel multi-inti	Digabung di udara, di permukaan, atau tertanam/tertutup	Satu lapis di dinding, lantai, atau tray tanpa perforasi	Satu lapis dipasang langsung di bawah plafon kayu
1	1	1	0,95
2	0,8	0,85	0,81
3	0,7	0,79	0,72
4	0,65	0,75	0,68
5	0,6	0,73	0,66
6	0,57	0,72	0,64
7	0,54	0,72	0,63
8	0,52	0,71	0,62
9	0,5	0,7	0,61
12	0,45	—	—
16	0,41	—	—
20	0,38	—	—

Jumlah sirkuit atau kabel multi-inti	Satu lapis pada tray horizontal berlubang (perforated tray)	Satu lapis pada penyangga tangga (ladder support) atau cleats
1	1	1
2	0,88	0,87
3	0,82	0,82
4	0,77	0,8
5	0,75	0,8
6	0,73	0,79
7	0,73	0,79
8	0,72	0,78
9	0,72	0,78
12	—	—
16	—	—
20	—	—

Tabel 5 Faktor reduksi untuk kelompok lebih dari satu sirkuit atau lebih dari kabel multi-inti (IEC 60364-5-52)

4.1.4 Perhitungan Penentuan Ukuran Kabel DC

Penentuan ukuran kabel DC pada system PLTS rooftop dilakukan berdasarkan arus maksimum yang mungkin mengalir pada sisi keluaran modul fotovoltaik. Parameter utama yang digunakan adalah arus hubung singkat modul (I_{sc}) sebesar 14,03 A pada kondisi Standard Test Condition (STC). Nilai ini merepresentasikan arus maksimum yang harus mampu dihantarkan oleh kabel dalam kondisi ekstrem.

Kabel yang dipilih untuk sisi DC adalah kabel PV tipe 1C-6 mm² dengan kapasitas hantar arus nominal (current carrying capacity/CCC) sebesar 57 A pada kondisi referensi pabrikan. Namun demikian, sesuai ketentuan IEC 60364-5-52, kapasitas hantar arus nominal harus dikoreksi terhadap kondisi instalasi actual, khususnya temperature lingkungan dan metode pengelompokan kabel. Pada temperature lingkungan 35°C, faktor koreksi temperature untuk kabel di udara adalah sebesar 0,96. Selain itu, karena instalasi dilakukan pengelompokan lebih dari 20 kabel dalam satu jalur (bunched in air/on surface), digunakan faktor reduksi sebesar 0,38. Dengan demikian, faktor derating total diperoleh dari

$$F_{total} = 0,96 \times 0,38 = 0,365$$

Kapasitas hantar arus kabel setelah koreksi dihitung sebagai:

$$CCC_{corr} = 57 \times 0,365 = 20,79 \text{ A}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kapasitas hantar arus terkoreksi sebesar 20,79 A masih lebih besar dibandingkan arus maksimum nominal sistem (17,40 A). Secara sistematis, kondisi ini memenuhi kriteria keselamatan:

$$CCC_{corr} > I_{maks}$$

Dengan demikian, kabel 1C-6 mm² dinyatakan memenuhi persyaratan termal dan aman digunakan pada sisi DC sistem PLTS rooftop 1,4 MWp. Penerapan faktor derating yang signifikan menunjukkan bahwa perancangan telah mempertimbangkan kondisi lingkungan dan metode instalasi secara konservatif, sehingga meningkatkan keandalan sistem dalam operasi jangka panjang.

4.1.5 Analisis Penurunan Tegangan dan Rugi Daya Kabel DC

Sistem PLTS rooftop 1,4 MWp menggunakan konfigurasi rata-rata 26 modul fotovoltaik yang dirangkai seri dalam satu string. Evaluasi rugi daya pada sisi DC dilakukan dengan menghitung penurunan tegangan dari string PV menuju inverter.

Arus operasi yang digunakan dalam perhitungan adalah arus maksimum titik daya (I_{mp}) sebesar 13,45 A (nilai arus kerja pada MPP). Kabel yang digunakan adalah kabel PV 1C x 6 mm² dengan resistansi konduktor sebesar 5,09 Ω/km. Instalasi menggunakan satu jalur kabel (single run), sehingga resistansi total dihitung berdasarkan panjang actual kabel.

Persamaan penurunan tegangan pada system DC dua penghantar dinyatakan sebagai :

$$V_d = \frac{2 \times I_{mp} \times R_c \times L}{n \times 1000}$$

dengan:

I_{mp} = arus maksimum titik daya (A)

R_c = resistansi kabel (Ω/km)

L = panjang kabel (m)

n = jumlah jalur kabel (run)

Perhitungan untuk POI 1 (L = 100 m)

$$V_d = \frac{2 \times 13,45 \times 5,09 \times 100}{1 \times 1000}$$

$$V_d = \frac{(26,9) \times 5,09 \times 100}{1000}$$

$$V_d = \frac{136,92 \times 100}{1000}$$

$$V_d = 13,69 \text{ V}$$

Jumlah modul seri = 19 modul

Tegangan MPP string:

$$V_{mp} = 19 \times 40,9 = 777,1 \text{ V}$$

Persentase penurunan tegangan:

$$\%V_d = \frac{13,69}{777,1} \times 100 = 1,76\%$$

Perhitungan untuk POI 2 (L = 114 m)

$$V_d = \frac{2 \times 13,45 \times 5,09 \times 114}{1000}$$

$$V_d = 15,61 \text{ V}$$

Jumlah modul seri = 20 modul

$$V_{mp} = 20 \times 40,9 = 818 \text{ V}$$

$$\%V_d = \frac{15,61}{818} \times 100 = 1,91\%$$

Perhitungan untuk POI 3 (L = 100 m)

$$V_d = 13,69 \text{ V}$$

Jumlah modul seri = 21 modul

$$V_{mp} = 21 \times 40,9 = 858,9 \text{ V}$$

$$\%V_d = \frac{13,69}{858,9} \times 100 = 1,59\%$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penurunan tegangan pada seluruh POI berada pada rentang 1,59 – 1,91% yang masih berada dibawah batas rekomendasi umum untuk sistem fotovoltaik ($\leq 3\%$ sisi DC).

4.2 Perhitungan Kabel AC

4.2.1 Parameter Kunci

Sebelum melakukan perhitungan penentuan ukuran kabel, kita perlu mengetahui arus keluaran AC maksimum dari inverter serta kapasitas hantar arus (CCC) dari kabel yang dipilih. Untuk perhitungan penurunan tegangan, diperlukan informasi mengenai arus keluaran AC maksimum dari inverter serta nilai resistansi dari kabel yang digunakan.

Spesifikasi	Keluaran
Daya Aktif AC Terukur	50.000 W

Spesifikasi	Keluaran
Daya Semu AC Maksimum	55.000 VA
Daya Aktif AC Maksimum (cosφ = 1)	55.000 W
Tegangan Keluaran Terukur	220 V / 380 V, 230 V / 400 V, default 3W + N + PE; 3W + PE opsional pada pengaturan
Frekuensi Jaringan AC Terukur	50 Hz / 60 Hz
Arus Keluaran Terukur	76 A @ 380 V / 72,2 A @ 400 V
Arus Keluaran Maksimum	83,6 A @ 380 V / 79,4 A @ 400 V
Rentang Faktor Daya yang Dapat Diatur	0,8 leading – 0,8 lagging
Distorsi Harmonik Total Maksimum (THD)	< 3%

Tabel 6 Spesifikasi Paramater Inverter

Parameter	PVC ≤ 300 mm ²	PVC > 300 mm ²	EPR / XLPE	Karet 60°C
Temperatur awal (°C)	70	70	90	60
Temperatur akhir (°C)	160	140	250	200
Material konduktor				
Tembaga (Copper)	115	103	143	141
Aluminium	76	68	94	93

Tabel 7 Nilai Konstanta K (IEC 60364-4-43) pada isolasi konduktor

Jumlah Inti	Ukuran	Resistansi pada 20°C (Konduktor)	Resistansi Isolasi
4	35 mm ²	0,524 Ω/km	20 MΩ·km
Kapasitas Hantar Arus 30°C (Dalam Tanah)	Kapasitas Hantar Arus 30°C (Di Udara)	Arus Hubung Singkat 1 detik	Uji Tegangan AC
142 A	134 A	4,06 kA	3,5 kV / 5 menit

Tabel 8 Datasheet Kabel Keluaran Inverter (NYY 4C)

Jumlah Inti	Ukuran	Resistansi pada 20°C (Konduktor)	Resistansi Isolasi
1	300 mm ²	0,0601 Ω/km	20 MΩ·km
Kapasitas Hantar Arus 30°C (Dalam Tanah)	Kapasitas Hantar Arus 30°C (Di Udara)	Arus Hubung Singkat 1 detik	Uji Tegangan AC
730 / 745 A	710 / 724 A	34,88 kA	3,5 kV / 5 menit

Tabel 9 Datasheet Kabel Keluaran LV Switchgear (NYY 1C)

Temperatur udara sekitar (°C)	PVC	XLPE dan EPR
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
30	1	1
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,5	0,71
65	–	0,65
70	–	0,58
75	–	0,5
80	–	0,41

Tabel 10 Faktor koreksi untuk temperature udara sekitar (IEC 60364-5-52)

4.2.2 Analisa Kabel Keluaran Inverter

Arus maksimum sisi AC inverter diperoleh dari datasheet inverter. Pada system tegangan 400 V tiga fasa, arus maksimum inverter adalah

$$I = 79,4 \text{ A}$$

Kabel yang digunakan adalah NYY 4C–35 mm² dengan kapasitas hantar arus nominal pada 30°C (di udara) sebesar:

$$CCC_{nom} = 134 \text{ A}$$

Namun demikian, kapasitas hantar arus tersebut harus dikoreksi terhadap kondisi actual instalasi.

Faktor Koreksi Temperatur

Pada temperature lingkungan 35°C dan isolasi PVC di udara, faktor koreksi temperature berdasarkan IEC 60364-5-52 adalah

$$F_{temp} = 0,94$$

Faktor Koreksi Pengelompokan

Kabel dipasang dalam satu tray dengan lebih dari sembilan sirkuit, sehingga faktor reduksi pengelompokan adalah

$$F_{group} = 0,72$$

Faktor Koreksi Total

$$F_{total} = F_{temp} \times F_{group}$$

$$F_{total} = 0,94 \times 0,72$$

$$F_{total} = 0,705$$

Kapasitas Hantar Arus Terkoreksi

$$CCC_{corr} = CCC_{nom} \times F_{total}$$

$$CCC_{corr} = 134 \times 0,705$$

$$CCC_{corr} = 90,69 \text{ A}$$

Karena:

$$CCC_{corr} > I$$

$$90,69 \text{ A} > 79,4 \text{ A}$$

maka kabel NYY 4C–35 mm² dinyatakan memenuhi persyaratan termal dan aman untuk digunakan pada sisi keluaran inverter.

Margin keamanan termal dapat dihitung sebagai:

$$Margin = \frac{90,69 - 79,4}{79,4} \times 100 = 14,2\%$$

4.2.3 Analisis Kabel Keluaran LV Switchgear

Arus maksimum pada sisi LV Switchgear merupakan akumulasi arus dari seluruh inverter yang terhubung. Dengan jumlah inverter sebanyak 25 unit, maka arus total sistem adalah:

$$I_{total} = 25 \times 79,4$$

$$I_{total} = 1985 \text{ A}$$

Kabel yang dipilih adalah NYY 1C–300 mm², dengan kapasitas hantar arus nominal (di udara, 30°C) sebesar:

$$CCC_{nom} = 710 \text{ A}$$

Karena digunakan 4 jalur paralel (4 run), maka kapasitas total nominal adalah:

$$CCC_{total} = 4 \times 710$$

$$CCC_{total} = 2840 \text{ A}$$

Faktor Koreksi Temperatur

$$F_{temp} = 0,94$$

Faktor Koreksi Pengelompokan

Untuk konfigurasi 1 ladder level dengan 4 sirkuit, faktor reduksi adalah:

$$F_{group} = 0,77$$

Faktor Koreksi Total

$$F_{total} = 0,94 \times 0,77$$

$$F_{total} = 0,7238$$

Kapasitas Hantar Arus Terkoreksi

$$CCC_{corr} = CCC_{total} \times F_{total}$$

$$CCC_{corr} = 2840 \times 0,7238$$

$$CCC_{corr} = 2055,59 \text{ A}$$

Karena:

$$CCC_{corr} > I_{total}$$

$$2055,59 \text{ A} > 1985 \text{ A}$$

maka kabel **NYY 1C-300 mm² (4 run)** dinyatakan memenuhi persyaratan kapasitas hantar arus.

Margin keamanan sistem utama adalah:

$$Margin = \frac{2055,59 - 1985}{1985} \times 100$$

$$Margin = 3,55\%$$

Margin ini menunjukkan desain relatif efisien dan tidak mengalami overdesign berlebihan.

4.2.4 Penurunan Tegangan AC dari Inverter ke LV Switchgear

Arus nominal maksimum inverter pada sistem 400 V tiga fasa adalah:

$$I = 79,4 \text{ A}$$

Kabel yang digunakan adalah **NYY 4C-35 mm²** dengan resistansi konduktor pada 20°C sebesar:

$$R_c = 0,524 \Omega/\text{km}$$

Panjang kabel rata-rata berdasarkan gambar teknik adalah:

$$L = 10 \text{ m}$$

Jumlah jalur kabel:

$$n = 1$$

Perhitungan Resistansi Efektif

Resistansi efektif penghantar sepanjang L meter dihitung sebagai:

$$R_{total} = \frac{R_c \times L}{1000}$$

$$R_{total} = \frac{0,524 \times 10}{1000}$$

$$R_{total} = 0,00524 \Omega$$

Perhitungan Penurunan Tegangan

Penurunan tegangan sistem tiga fasa dihitung menggunakan pendekatan resistif:

$$V_d = I \times R_{total}$$

$$V_d = 79,4 \times 0,00524$$

$$V_d = 0,416 \text{ V}$$

Persentase Penurunan Tegangan

Untuk sistem tiga fasa dengan tegangan garis-ke-garis 400 V:

$$\%V_d = \frac{V_d}{V_{LL}} \times \sqrt{3} \times 100$$

$$\%V_d = \frac{0,416}{400} \times 1,732 \times 100$$

$$\%V_d = 0,18\%$$

Nilai ini sangat kecil dan menunjukkan bahwa panjang kabel yang pendek (10 m) tidak memberikan dampak signifikan terhadap kualitas tegangan sistem.

4.2.5 Penurunan Tegangan AC dari LV Switchgear ke POI

Arus total sistem merupakan akumulasi arus dari 25 inverter:

$$I_{total} = 25 \times 79,4$$

$$I_{total} = 1985 \text{ A}$$

Kabel yang digunakan adalah **NYY 1C-300 mm²** dengan resistansi konduktor:

$$R_c = 0,0601 \Omega/\text{km}$$

Panjang kabel rata-rata:

$$L = 105 \text{ m}$$

Jumlah jalur paralel:

$$n = 4$$

Perhitungan Resistansi Efektif

Karena digunakan 4 kabel paralel, resistansi ekuivalen menjadi:

$$R_{eq} = \frac{R_c \times L}{1000 \times n}$$

$$R_{eq} = \frac{0,0601 \times 105}{1000 \times 4}$$

$$R_{eq} = \frac{6,3105}{4000}$$

$$R_{eq} = 0,0015776 \Omega$$

Perhitungan Penurunan Tegangan

$$V_d = I_{total} \times R_{eq}$$

$$V_d = 1985 \times 0,0015776$$

$$V_d = 3,132 \text{ V}$$

Persentase Penurunan Tegangan

$$\%V_d = \frac{3,132}{400} \times 1,732 \times 100$$

$$\%V_d = 1,36\%$$

4.2.7 Analisis Rugi Daya AC

Rugi daya akibat resistansi konduktor dihitung menggunakan:

$$P_{loss} = 3 \times I^2 \times R_{eq}$$

Segmen Inverter – LV Switchgear

$$P_{loss} = 3 \times (79,4)^2 \times 0,00524$$

$$P_{loss} = 3 \times 6307,6 \times 0,00524$$

$$P_{loss} \approx 99,1 \text{ W per inverter}$$

Untuk 25 inverter:

$$P_{loss,total} = 25 \times 99,1$$

$$P_{loss,total} \approx 2,48 \text{ kW}$$

Segmen LV Switchgear – POI

$$P_{loss} = 3 \times (1985)^2 \times 0,0015776$$

$$P_{loss} = 3 \times 3.940.225 \times 0,0015776$$

$$P_{loss} \approx 18,63 \text{ kW}$$

Total Rugi Daya AC Sistem

$$P_{loss,total} = 2,48 + 18,63$$

$$P_{loss,total} \approx 21,11 \text{ kW}$$

Persentase terhadap kapasitas sistem 1,4 MW:

$$\%Loss = \frac{21,11}{1400} \times 100$$

$$\%Loss \approx 1,51\%$$

4.2.6 Penentuan Ukuran Proteksi Panel AC Combiner

Perancangan system proteksi pada sisi AC dilakukan untuk memastikan bahwa penghantar terlindungi dari kondisi arus lebih (overcurrent)

maupun arus hubung singkat (short circuit). Pemilihan rating pemutus tenaga (circuit breaker) harus memenuhi prinsip dasar proteksi arus lebih sebagaimana diatur dalam IEC 60364-4-43, yaitu arus nominal proteksi (I_n) harus berada di antara arus beban maksimum (I_b) dan kapasitas hantar arus kabel terkoreksi (I_z), sehingga memenuhi hubungan:

$$I_b < I_n < I_z$$

4.2.7 Penentuan Ukuran Breaker Input Inverter

Pemutus sirkuit antara inverter dan LV Switchgear berfungsi untuk melindungi kabel keluaran inverter tipe NYY 4C-35 mm². Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, arus maksimum keluaran inverter pada sistem 400 V tiga fasa adalah:

$$I_b = 79,4 \text{ A}$$

Kapasitas hantar arus kabel setelah dikoreksi terhadap temperatur dan faktor pengelompokan adalah:

$$I_z = 90,69 \text{ A}$$

Dengan demikian, rentang arus proteksi yang diperbolehkan adalah:

$$79,4 \text{ A} < I_n < 90,69 \text{ A}$$

Untuk memenuhi kriteria tersebut, dipilih pemutus jenis **MCCB 100 A** yang disetel pada 0,9 kali arus nominalnya. Besarnya arus setting proteksi adalah:

$$I_n = 0,9 \times 100$$

$$I_n = 90 \text{ A}$$

Nilai ini berada dalam rentang yang dipersyaratkan dan menjamin bahwa kabel akan terlindungi dari kondisi arus lebih tanpa menyebabkan trip pada kondisi operasi normal. Margin proteksi terhadap arus beban dapat dihitung sebagai:

$$Margin = \frac{90 - 79,4}{79,4} \times 100$$

$$Margin = 13,35\%$$

Nilai ini menunjukkan bahwa sistem memiliki cadangan proteksi yang memadai terhadap fluktuasi beban.

4.2.8 Penentuan Ukuran Breaker Output (LV Switchgear ke Transformator)

Pemutus sirkuit utama pada sisi keluaran LV Switchgear berfungsi melindungi kabel utama tipe NYY 1C-300 mm² (4 run paralel). Arus total sistem merupakan akumulasi dari 25 inverter, sehingga:

$$I_b = 25 \times 79,4$$

$$I_b = 1985 \text{ A}$$

Kapasitas hantar arus terkoreksi kabel utama adalah:

$$I_z = 2055,59 \text{ A}$$

Dengan demikian, batas arus proteksi yang diperbolehkan adalah:

$$1985 \text{ A} < I_n < 2055,59 \text{ A}$$

Dipilih pemutus jenis **ACB 2500 A** dengan setting arus sebesar 0,8 kali arus nominal, sehingga:

$$I_n = 0,8 \times 2500$$

$$I_n = 2000 \text{ A}$$

Nilai ini memenuhi kriteria proteksi karena berada di antara arus beban dan kapasitas hantar arus kabel.

Margin proteksi sistem utama adalah:

$$\text{Margin} = \frac{2000 - 1985}{1985} \times 100$$

$$\text{Margin} = 0,76\%$$

Margin yang relatif kecil menunjukkan bahwa desain telah dioptimalkan untuk efisiensi tanpa overdesign berlebihan.

4.2.9 Evaluasi Kapasitas Pemutusan Hubung Singkat

Selain mempertimbangkan arus beban, pemutus juga harus mampu menahan arus hubung singkat maksimum system. Berdasarkan dokumen perhitungan level hubung singkat (Short Circuit Level Calculation), arus gangguan pada LV Switchgear memerlukan kapasitas pemutusan sebesar:

$$I_{cu} = 50 \text{ kA}$$

Dengan demikian, ACB yang dipilih memiliki kapasitas pemutusan 50 kA untuk menjamin keamanan sistem terhadap gangguan arus hubung singkat.

5. Kesimpulan

Penelitian ini telah menganalisis rugi daya kabel sisi DC dan AC pada sistem PLTS rooftop berkapasitas 1,4 MWp dengan mengacu pada standar IEC 60364 dan IEC 62548. Analisis dilakukan melalui pendekatan kuantitatif berbasis perhitungan rekayasa (engineering calculation) dengan mempertimbangkan arus maksimum sistem, kapasitas hantar arus kabel, faktor derating temperatur dan pengelompokan, penurunan tegangan, serta evaluasi proteksi arus lebih dan hubung singkat.

Pada sisi DC, kabel PV 1C-6 mm² dengan kapasitas hantar arus nominal 57 A setelah dikoreksi terhadap temperatur 35°C dan faktor pengelompokan menghasilkan kapasitas hantar arus terkoreksi sebesar 20,79 A. Nilai ini masih lebih besar dibandingkan arus maksimum operasi string sebesar 17,40 A, sehingga memenuhi kriteria keselamatan termal. Hasil analisis penurunan tegangan menunjukkan bahwa rugi tegangan pada sisi DC berada pada rentang 1,59%–1,91%, masih di bawah batas rekomendasi umum sistem fotovoltaik ($\leq 3\%$).

Pada sisi AC inverter ke LV Switchgear, kabel NYY 4C-35 mm² memiliki kapasitas hantar arus terkoreksi sebesar 90,69 A, lebih tinggi dari arus maksimum inverter 79,4 A. Penurunan tegangan pada segmen ini hanya sebesar 0,18%, menunjukkan bahwa jarak kabel yang relatif pendek (± 10 m) memberikan dampak rugi daya yang sangat kecil.

Untuk segmen utama LV Switchgear ke POI, digunakan kabel NYY 1C-300 mm² sebanyak empat jalur paralel dengan kapasitas hantar arus terkoreksi sebesar 2055,59 A. Nilai ini lebih besar dari arus total sistem sebesar 1985 A, sehingga memenuhi persyaratan desain termal. Penurunan tegangan pada segmen ini sebesar 1,36%, sehingga total penurunan tegangan sisi AC sistem masih berada dalam batas standar instalasi tegangan rendah ($\leq 5\%$). Total rugi daya kabel sisi AC sistem diperkirakan sekitar 1,5% terhadap kapasitas sistem, yang menunjukkan bahwa desain penampang konduktor telah dioptimalkan secara teknis tanpa overdesign yang berlebihan. Selain itu, pemilihan perangkat proteksi (MCCB 100 A dan ACB 2500 A dengan kapasitas pemutusan 50 kA) telah memenuhi prinsip koordinasi proteksi dengan kriteria:

$$I_b < I_n < I_z$$

Secara keseluruhan, desain sistem kabel DC dan AC pada PLTS rooftop 1,4 MWp telah memenuhi aspek keselamatan, efisiensi, dan keandalan berdasarkan standar IEC. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan faktor derating yang tepat dan evaluasi penurunan tegangan secara kuantitatif sangat penting dalam memastikan performa optimal sistem PLTS rooftop skala industri, khususnya pada kondisi lingkungan tropis dengan temperatur relatif tinggi dan konfigurasi kabel yang kompleks.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. R. Wicaksana, I. N. S. Kumara, I. A. D. Giriantari, R. Irawati, P. K. Energi, and D. Mineral, "UNJUK KERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA ROOFTOP 158 KWP PADA KANTOR GUBERNUR BALI," vol. 6, no. 3, pp. 107–113, 2026.
- [2] S. Salim, "Perencanaan dan Studi Kelayakan PLTS Rooftop Pada Gedung Fakultas Teknik UNG," vol. 4, 2022.
- [3] E. H. Awad, "CASE STUDY DESIGN OF A STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM IN GAZA-STRIP AND GENERALIZING A PROGRAM SIMULATION," vol. 01004, 2021.
- [4] E. Mustafa, R. S. A. Afia, and Z. Á. Tamus, "Condition Assessment of Low Voltage Photovoltaic DC Cables under Thermal Stress Using Non - Destructive Electrical Techniques," *Trans. Electr. Electron. Mater.*, vol. 21, no. 5, pp. 503–512, 2020, doi: 10.1007/s42341-020-00201-3.
- [5] N. Sugiarta, "Energy Yield of a 1 . 3 kWp Grid-Connected Photovoltaic System Design : Case for a Small House in Bali," vol. 10, no. 1, pp. 19–25, 2020.
- [6] I. W. Sukerayasa, "Perancangan plts atap di gedung graha sewaka dharma," vol. 8, no. 3, pp. 9–18, 2021.
- [7] T. Sarker, M. Al Qwaid, and S. Hossen, "Performance Optimization of Grounding System for Multi-Voltage Electrical Installation," pp. 1–23, 2025.
- [8] J. R. Balfour, H. Performance, and T. J. K. S. Alliance, "Solar PV O & M Standards and Best Practices – Existing Gaps and Improvement Efforts," no. November, 2014.
- [9] P. Studi, T. Elektro, F. Teknik, U. Udayana, J. Kampus, and U. Bukit, "GRID TIE INVERTER UNTUK PLTS ATAP DI INDONESIA : REVIEW STANDAR DAN INVERTER YANG," vol. 7, no. 2, pp. 62–73, 2025.
- [10] S. Plts *et al.*, "UNJUK KERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MICROGRID UNUD," vol. 6, no. 3, pp. 1–9, 2025.
- [11] K. Kelayakan, "Kajian Kelayakan Solar Rooftop On-Grid untuk Kebutuhan Listrik Bengkel Mesin di Polinema," vol. 10, no. 4, 2022.
- [12] M. El, H. Jed, R. Ihaddadene, and N. Ihaddadene, "Performance analysis of 954 , 809 kWp PV array of Sheikh Zayed solar power plant," *Reinf. Plast.*, vol. 32, no. 00, pp. 45–54, 2020, doi: 10.1016/j.ref.2019.11.002.
- [13] L. Govindarajan, *Performance Assessment of large-scale rooftop solar PV system - A Case Study in a Malaysian Public University*. 2024.
- [14] A. Mansur, "ANALISA KINERJA PLTS ON GRID 50 KWP AKIBAT EFEK BAYANGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE PVSYST," no. 1, pp. 28–33, 2021.
- [15] M. Fikri, F. R. Priyana, R. A. Setiawan, and M. Nur, "Dampak Pemasangan PLTS pada Sistem Distribusi terhadap Kualitas Tegangan dan Rugi – rugi Daya," vol. 13, no. 3.