



Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Dos & Don'ts



Bekerja sama dengan:

Diimplementasikan oleh:
giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Direktorat Jenderal
Energi Baru, Terbarukan
dan Konservasi Energi

Didanai oleh:



Ministry of Foreign Affairs of the
Netherlands



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra
Swiss Agency for Development
and Cooperation SDC



Bekerja sama dengan:



Direktorat Jenderal Sumber Daya Energi



Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Netherlands Enterprise Agency

Dikoordinasikan dan dilaksanakan oleh:

Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Dos & Don'ts



Terbitan

Bekerja sama dengan:

Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi (DJ EBTKE)
Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) Republik Indonesia

Dipublikasikan oleh:

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Energising Development (EnDev) Indonesia
Gedung De RITZ, Lantai 3
Jl. HOS. Cokroaminoto No. 91
Menteng, Jakarta Pusat 10310
Indonesia
Tel: +62 21 391 5885
Fax: +62 21 391 5859
Website: www.endev-indonesia.info

Penulis:

ing. Bagus Ramadhani, M.Sc.

Kontributor:

Amalia Suryani, M.Sc.
Atiek P. Fadhillah, M.Sc.
Dipl.-Ing. Pelangi Saichu
M. Husni Mubarok, M.Sc.

Foto, gambar, dan grafik disediakan oleh:

Proyek Energising Development (EnDev) Indonesia

Dicetak dan didistribusikan oleh GIZ

Jakarta, 2018

Foto, gambar, dan elemen grafis lainnya adalah hak cipta intelektual yang dilindungi dan oleh karena itu tidak boleh diekstraksi secara terpisah dari publikasi ini. Akan tetapi bab-bab lengkap dari buku ini dapat diterjemahkan ke dalam bahasa lain dan dengan demikian direproduksi untuk tujuan pelatihan, asalkan penerbit diberitahu tentang tujuan tersebut dan diberi penghargaan yang layak.

Sangkalan:

Publikasi ini telah dibuat untuk mengilustrasikan contoh-contoh praktik yang baik dan kurang baik dalam instalasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *off-grid*. Meskipun segala perhatian yang layak telah diambil dalam persiapan publikasi ini, penulis, kontributor, GIZ dan setiap individu serta pihak lain yang terlibat tidak bertanggung jawab atas kerusakan, cedera, atau kejadian yang tidak diinginkan lainnya sebagai akibat penerapan atau interpretasi buku ini.

Tanggung jawab utama untuk kualitas, keandalan, dan keselamatan tetap ada pada para desainer, pemasok, tim instalasi, dan pihak pengoperasi. Sangat disarankan bahwa setiap desain, konstruksi, instalasi listrik dan mekanik, operasi, pekerjaan pemeliharaan dan perbaikan dilakukan dan/atau diawasi serta diperiksa oleh teknisi dan insinyur yang berkualifikasi saja.

Kata Pengantar

Dalam beberapa tahun terakhir, Pembangkit Listrik tenaga Surya (PLTS) *off-grid* mengambil peranan penting dalam meningkatkan rasio elektrifikasi di daerah perdesaan di Indonesia. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE) dan sejumlah institusi lain termasuk sektor swasta, telah berusaha meningkatkan kualitas dan keandalan instalasi sistem PLTS yang dibangun dengan dana APBN maupun Dana Alokasi Khusus (DAK). Desain yang bagus dan kualitas yang baik merupakan kunci penting dalam keandalan dan berkelanjutan sistem PLTS.

Untuk meningkatkan dan menyeragamkan kualitas PLTS serta menyebarluaskan pengetahuan mengenai sistem PLTS *off-grid* yang baik kepada para pemangku kepentingan termasuk Pemerintah Daerah, pelaku usaha, operator, teknisi, dan inspektor energi terbarukan, pada tahun 2018 Ditjen EBTKE bekerja sama dengan GIZ melalui Proyek Energising Development (EnDev) Indonesia menyusun Buku Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: *Dos and Don'ts* sebagai rekomendasi praktik terbaik instalasi PLTS *off-grid* di Indonesia.

Buku Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: *Dos and Don'ts* ini menyajikan sekitar 600 foto instalasi PLTS *off-grid* yang telah dibangun, dan disertai dengan rekomendasi dan landasan teori singkat tentang kondisi di dalam foto tersebut.

Buku ini diharapkan dapat dijadikan rujukan di dalam proses perancangan, pemasangan, proses verifikasi, serta pengoperasian dan pemeliharaan sistem PLTS *off-grid* sehingga keamanan dan keandalan sistem dapat terjamin, umur pakai komponen meningkat, operasional yang lebih efisien, risiko kerusakan yang kecil, dan memahami apa yang harus dilakukan jika terjadi kerusakan.

Akhirnya, kami berharap semoga Buku Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: *Dos and Don'ts* ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang berpartisipasi dalam pengembangan energi terbarukan di Indonesia.

Jakarta, 31 Agustus 2018

Direktur Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi

Rida Mulyana

Daftar Isi

Kata Pengantar	i
Daftar isi	ii
Daftar Singkatan	iv
Tentang Buku Ini	vi
Bab 1 : Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-Grid	1-1
1.1. <i>Gambaran umum PLTS Off-Grid</i>	1-3
1.2. <i>Sistem DC-coupling</i>	1-6
1.3. <i>Sistem AC-coupling</i>	1-7
Bab 2 : Rangkaian Modul Fotovoltaik	2-1
2.1. <i>Dasar-dasar rangkaian modul fotovoltaik</i>	2-2
2.2. <i>Modul fotovoltaik</i>	2-5
2.3. <i>Interkoneksi modul fotovoltaik</i>	2-18
2.4. <i>Struktur penopang dan pondasi rangkaian modul fotovoltaik</i>	2-25
Bab 3 : Kotak Penggabung	3-1
3.1. <i>Dasar-dasar kotak penggabung</i>	3-2
3.2. <i>Selungkup pelindung</i>	3-4
3.3. <i>Komponen listrik di dalam kotak penggabung</i>	3-10
Bab 4 : Solar Charge Controller	4-1
4.1. <i>Dasar-dasar solar charge controller</i>	4-2
4.2. <i>Instalasi dan pengkabelan solar charge controller</i>	4-5
4.3. <i>Pengaturan parameter solar charge controller</i>	4-15
Bab 5 : Inverter Jaringan	5-1
5.1. <i>Dasar-dasar inverter jaringan</i>	5-2
5.2. <i>Instalasi dan pengkabelan inverter jaringan</i>	5-5
5.3. <i>Pengaturan parameter inverter jaringan</i>	5-11
Bab 6 : Baterai	6-1
6.1. <i>Dasar-dasar baterai</i>	6-2
6.2. <i>Pengoperasian baterai</i>	6-7
6.3. <i>Interkoneksi bank baterai</i>	6-13
6.4. <i>Instalasi bank baterai</i>	6-20

Bab 7 : Panel Distribusi DC	7-1
7.1. <i>Dasar-dasar panel distribusi DC</i>	7-2
7.2. <i>Selungkup pelindung</i>	7-3
7.3. <i>Komponen listrik di dalam panel distribusi DC</i>	7-5
Bab 8 : Inverter Baterai	8-1
8.1. <i>Dasar-dasar inverter baterai</i>	8-2
8.2. <i>Instalasi dan pengkabelan inverter baterai</i>	8-6
8.3. <i>Pengaturan parameter inverter baterai</i>	8-15
Bab 9 : Panel Distribusi AC	9-1
9.1. <i>Dasar-dasar panel distribusi AC</i>	9-2
9.2. <i>Selungkup pelindung</i>	9-4
9.3. <i>Komponen listrik di dalam panel distribusi AC</i>	9-6
Bab 10 : Sistem Pemantauan	10-1
10.1. <i>Dasar-dasar sistem pemantauan</i>	10-2
10.2. <i>Instalasi sistem pemantauan</i>	10-5
10.3. <i>Parameter pemantauan</i>	10-9
Bab 11 : Rumah Pembangkit	11-1
11.1. <i>Dasar-dasar rumah pembangkit</i>	11-2
11.2. <i>Pagar pelindung</i>	11-6
11.3. <i>Konstruksi rumah pembangkit</i>	11-8
11.4. <i>Instalasi di dalam rumah pembangkit</i>	11-14
Bab 12 : Jaringan distribusi	12-1
12.1. <i>Dasar-dasar jaringan distribusi</i>	12-2
12.2. <i>Distribusi tegangan rendah</i>	12-5
12.3. <i>Lampu penerangan jalan</i>	12-16
12.4. <i>Distribusi tegangan menengah</i>	12-19
Bab 13 : Sambungan Rumah Tangga	13-1
13.1. <i>Dasar-dasar sambungan rumah tangga</i>	13-2
13.2. <i>Sambungan tenaga listrik</i>	13-4
13.3. <i>Pengkabelan dan instalasi rumah tangga</i>	13-11
13.4. <i>Penggunaan energi</i>	13-16
Bab 14 : Sistem Pembumian dan Penangkal Petir	14-1
14.1. <i>Dasar-dasar sistem pembumian dan penangkal petir</i>	14-2
14.2. <i>Instalasi pembumian</i>	14-4
14.3. <i>Sistem penangkal petir</i>	14-18

Daftar Singkatan

AC	Alternating Current
ACPDB	Alternating Current Power Distribution Box
Ah	Ampere hour
AM	Air Mass
APAR	Alat Pemadam Api Ringan
BCR	Battery Charge Regulator
BMS	Battery Management System
BRCC	British Reinforced Concrete
BTS	Battery Temperature Sensor
CCV	Closed Circuit Voltage
CV	Constant Voltage
DC	Direct Current
DCPDB	Direct Current Power Distribution Box
DHI	Diffuse Horizontal Irradiance
DJ EBTKE	Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi
DNI	Direct Normal Irradiance
DoD	Depth of Discharge
ELCB	Earth-Leakage Circuit Breaker
EMC	ElectroMagnetic Compatibility
EVA	Ethylene-Vinyl Acetate
FSPC	Frequency Shift Power Control
GB	Gigabyte
GHI	Global Horizontal Irradiance
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
ID	Identification
IP	Ingress Protection
LED	Light Emitting Diode
LPS	Lightning Protection System
LVD	Low Voltage Disconnection
MCB	Miniature Circuit Breaker
MCCB	Molded Case Circuit Breaker
MPPT	Maximum Power Point Tracking
OPzV	Ortsfest (stationary) PanZerplatte (tubular plate) Verschlossen (closed)
P3K	Pertolongan Pertama Pada Kecelakaan
PLN	Perusahaan Listrik Negara

PLTS	Pembangkit Listrik Tenaga Surya
PV	Photovoltaic
PVC	Polyvinyl Chloride
RCD	Residual Current Device
RMS	Remote Monitoring System
SCC	Solar Charge Controller
SD Card	Secure Digital Card
SoC	State of Charge
SoH	State of Health
SPD	Surge Protection Device
STC	Standard Temperature Condition
TM	Tegangan Menengah
TR	Tegangan Rendah
UV	Ultra Violet
VRLA	Valve Regulated Lead Acid

Tentang Buku Ini

Buku Instalasi PLTS: *Dos and Don'ts* ditulis untuk menjadi referensi dalam meningkatkan kualitas instalasi PLTS *off-grid* yang sudah maupun yang akan dibangun. Buku yang didominasi dengan foto contoh-contoh instalasi yang baik dan kurang baik ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk para praktisi khususnya dalam proses instalasi, desain, inspeksi, serta pengoperasian dan pemeliharaan PLTS *off-grid*.

Foto contoh-contoh instalasi dalam buku ini sebagian besar diambil dari hasil pemeriksaan teknis yang dilakukan oleh GIZ pada kurun waktu 2013 hingga 2015. Berdasarkan hasil kunjungan ke lebih dari 300 PLTS *off-grid*, diperoleh informasi berharga dalam bentuk kumpulan foto yang terkait dengan kualitas instalasi dan kinerja sistem yang layak untuk dibagikan sebagai bahan evaluasi demi meningkatkan kualitas instalasi PLTS *off-grid*.

Contoh instalasi yang baik merupakan rekomendasi agar keamanan sistem dan pengguna tetap terjamin. Contoh tersebut berguna untuk menghindari situasi berbahaya atau pengurangan umur pakai komponen. Sedangkan dengan adanya contoh instalasi yang kurang baik, pengulangan kesalahan yang sama dapat dihindari. Dengan demikian PLTS *off-grid* akan lebih dapat diandalkan, umur pakai komponennya meningkat, serta dapat beroperasi secara efisien dengan risiko kerusakan yang lebih rendah.

Cakupan

Buku ini terbagi dari 14 bab yang topik bahasannya berdasarkan pada komponen inti dan pendukung dalam PLTS *off-grid*. Karena gambar dianggap lebih efisien dan efektif dalam menyampaikan informasi dibandingkan kata-kata, buku ini didesain dengan menyajikan informasi dalam bentuk foto contoh-contoh praktik instalasi PLTS *off-grid* yang baik dan kurang baik.

Setiap bab didahului dengan gambaran umum dan fungsi komponen, lalu dilanjutkan dengan instalasinya. Masing-masing topik komponen dilengkapi contoh baik dan kurang baik serta didukung penjelasan singkat di balik penilaian. Setiap pasang foto baik dan kurang baik diikuti juga dengan landasan teori singkat tentang temuan di dalam foto serta rekomendasi untuk meningkatkan kualitas instalasi. Penilaian terhadap praktik baik dan kurang baik didasarkan pada standar internasional dan nasional yang relevan, instruksi dari produsen komponen, serta praktik terbaik dalam melakukan instalasi PLTS *off-grid*. Pada pembahasan topik komponen tertentu terdapat peringatan akan berkurangnya kinerja sistem hingga bahaya keselamatan jika rekomendasi diabaikan.

Contoh instalasi yang kurang baik tidak selalu berarti bahwa kualitas keseluruhan PLTS kurang baik. Foto tersebut merupakan contoh yang ditemukan di sebagian kecil lokasi sebagai contoh untuk dihindari. Pada umumnya, sistem PLTS *off-grid* dibangun dengan baik dan beroperasi secara efektif dalam menyediakan layanan energi untuk masyarakat.

Desain dan kualitas penggerjaan yang baik adalah upaya pertama untuk menghadirkan sistem yang dapat diandalkan. Akan tetapi keberlanjutan sistem tidak dapat dipastikan jika tidak dioperasikan dan dipelihara dengan baik. Buku ini juga memberikan beberapa rekomendasi untuk operator dalam mengoperasikan dan melakukan pemeliharaan pada PLTS *off-grid*. Isi buku ini mencakup:

1. Prinsip dasar sistem PLTS *off-grid* dan komponennya
2. Konsep desain dan kiat instalasi secara umum
3. Kiat untuk memperbaiki instalasi dan menghindari bahaya keselamatan
4. Anjuran untuk proses verifikasi kinerja PLTS
5. Rekomendasi pengoperasian dan pemeliharaan untuk operator dan teknisi.

Dikarenakan buku ini didesain sebagai referensi pedoman instalasi secara umum, buku ini tidak dapat menggantikan fungsi panduan instalasi dari produsen komponen (khususnya komponen elektronika daya) serta standar internasional maupun nasional. Desainer, instalatir, inspektur, maupun teknisi tetap harus merujuk kepada referensi yang bersifat khusus dan lebih rinci demi menghadirkan sistem PLTS *off-grid* yang prima. Seiring dengan perkembangan teknologi baterai maupun elektronika daya, diperkirakan akan ada perbedaan secara khusus dalam instalasi PLTS yang terdapat di buku dengan instalasi PLTS *off-grid* terbaru yang tidak menjadi cakupan buku ini.

Target pembaca

Buku ini ditujukan kepada siapa saja yang ingin mengembangkan pengetahuan teknisnya di bidang PLTS *off-grid*. Namun target diutamakan pada praktisi yang terlibat langsung dalam proses perencanaan, konstruksi, hingga pemeliharaan PLTS. Konten dalam buku ini dimaksudkan untuk menjadi rujukan bagi praktisi yang berbeda sesuai dengan kebutuhan masing-masing. Berikut adalah matriks untuk penggunaan buku.

Pembaca	Informasi
Desainer sistem	<ul style="list-style-type: none">• Konsep desain secara umum• Pemilihan komponen sesuai spesifikasi yang ideal• Perhitungan ukuran komponen untuk menghindari ketidakcocokan kapasitas
Instalatir	<ul style="list-style-type: none">• Rekomendasi untuk melakukan instalasi komponen yang baik• Cara menghindari instalasi yang kurang baik• Hal-hal yang harus diperhatikan saat melakukan konfigurasi parameter elektronika daya
Inspektur	<ul style="list-style-type: none">• Hal-hal yang harus diuji saat inspeksi teknis atau komisioning• Dampak yang timbul jika tidak memenuhi syarat pengujian
Teknisi	<ul style="list-style-type: none">• Cara memperbaiki dan meningkatkan instalasi yang kurang baik
Operator	<ul style="list-style-type: none">• Rekomendasi untuk melakukan pengoperasian dan pemeliharaan rutin

Terdapat beberapa kegiatan yang hanya dimaksudkan untuk dilakukan oleh orang yang kompeten. Setidaknya instalatir, inspektur, teknisi, maupun operator mampu dalam mengidentifikasi bahaya dan risiko yang terkait dengan instalasi dan penggunaan perangkat listrik dan baterai serta pemasangan dan pengujian perangkat listrik.

Simbol yang digunakan

Simbol-simbol berikut digunakan di dalam buku ini untuk memudahkan pembaca dalam menavigasi poin-poin penting yang perlu perhatian khusus.



Contoh instalasi yang baik. Instalasi dapat dipertahankan dan ditingkatkan untuk kinerja yang lebih baik.



Contoh instalasi yang dapat diperbaiki dan ditingkatkan untuk menghindari kerusakan dan bahaya pada sistem dan juga personel.



Pemberitahuan yang menunjukkan informasi penting yang perlu diperhatikan.



Peringatan yang dapat menimbulkan kerusakan pada sistem maupun komponen atau penurunan kinerja jika rekomendasi diabaikan.



Peringatan yang dapat menimbulkan bahaya keselamatan jika rekomendasi diabaikan.



Informasi umum mengenai cara kerja komponen, spesifikasi yang ideal, konfigurasi, cara pehitungan, atau faktor-faktor yang harus diperhatikan saat instalasi.



Rekomendasi yang harus dilakukan saat melakukan pengujian sistem atau komisioning.



Rekomendasi yang harus dilakukan saat melakukan pemeliharaan komponen

Bab 1:

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid

- ✓ *Penjelasan tentang cara kerja PLTS Off-Grid*
- ✓ *Perbedaan antara sistem AC (AC-coupling) dan sistem DC (DC-coupling)*
- ✓ *Komponen di dalam PLTS Off-Grid*



Sistem fotovoltaik atau pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) mengubah energi elektromagnetik dari sinar matahari menjadi energi listrik. Pembangkit listrik berbasis energi terbarukan ini merupakan salah satu solusi yang direkomendasikan untuk listrik di daerah pedesaan terpencil di mana sinar matahari melimpah dan bahan bakar sulit didapat dan relatif mahal. Alasan utama menggunakan teknologi fotovoltaik ini adalah sebagai berikut:

- Sumber energi yang melimpah dan tanpa biaya
- Sumber energi tersedia di tempat dan tidak perlu diangkut
- Biaya pengoperasian dan pemeliharaan sistem PLTS yang relatif kecil
- Tidak perlu pemeliharaan yang sering dan dapat dilakukan oleh operator setempat yang terlatih
- Ramah lingkungan, tidak ada emisi gas dan limbah cair atau padat yang berbahaya



• *Tipikal sistem pembangkit listrik tenaga surya terpusat off-grid dengan larik (array) fotovoltaik dan rumah pembangkit yang berisi komponen elektronik dan baterai.*

Sistem PLTS terdiri dari modul fotovoltaik, *solar charge controller* atau inverter jaringan, baterai, inverter baterai, dan beberapa komponen pendukung lainnya. Ada beberapa jenis sistem PLTS, baik untuk sistem yang tersambung ke jaringan listrik PLN (*on-grid*) maupun sistem PLTS yang berdiri sendiri atau tidak terhubung ke jaringan listrik PLN (*off-grid*). Meskipun sistem PLTS tersebar (SHS, *solar home system*) lebih umum digunakan karena relatif murah dan desainnya yang sederhana, saat ini PLTS terpusat dan PLTS hibrida (PLTS yang dikombinasikan dengan sumber energi lain seperti angin atau diesel) juga banyak diterapkan, yang bertujuan untuk mendapatkan daya dan penggunaan energi yang lebih tinggi serta mencapai keberlanjutan sistem yang lebih baik melalui kepemilikan secara kolektif (komunal). PLTS tersebar dapat menjadi pilihan ketika persebaran rumah penduduk yang berjauhan satu sama lain.



Apa saja jenis sistem pembangkit listrik tenaga surya ?

Sistem pembangkit listrik tenaga surya

PLTS *off-grid*

PLTS
tersebar
(SHS)

PLTS *on-grid* (tersambung dengan jaringan PLN)

PLTS komunal
atau terpusat

PLTS hibrida

PLTS *rooftop*
(dipasang di
atap)

PLTS skala
utilitas

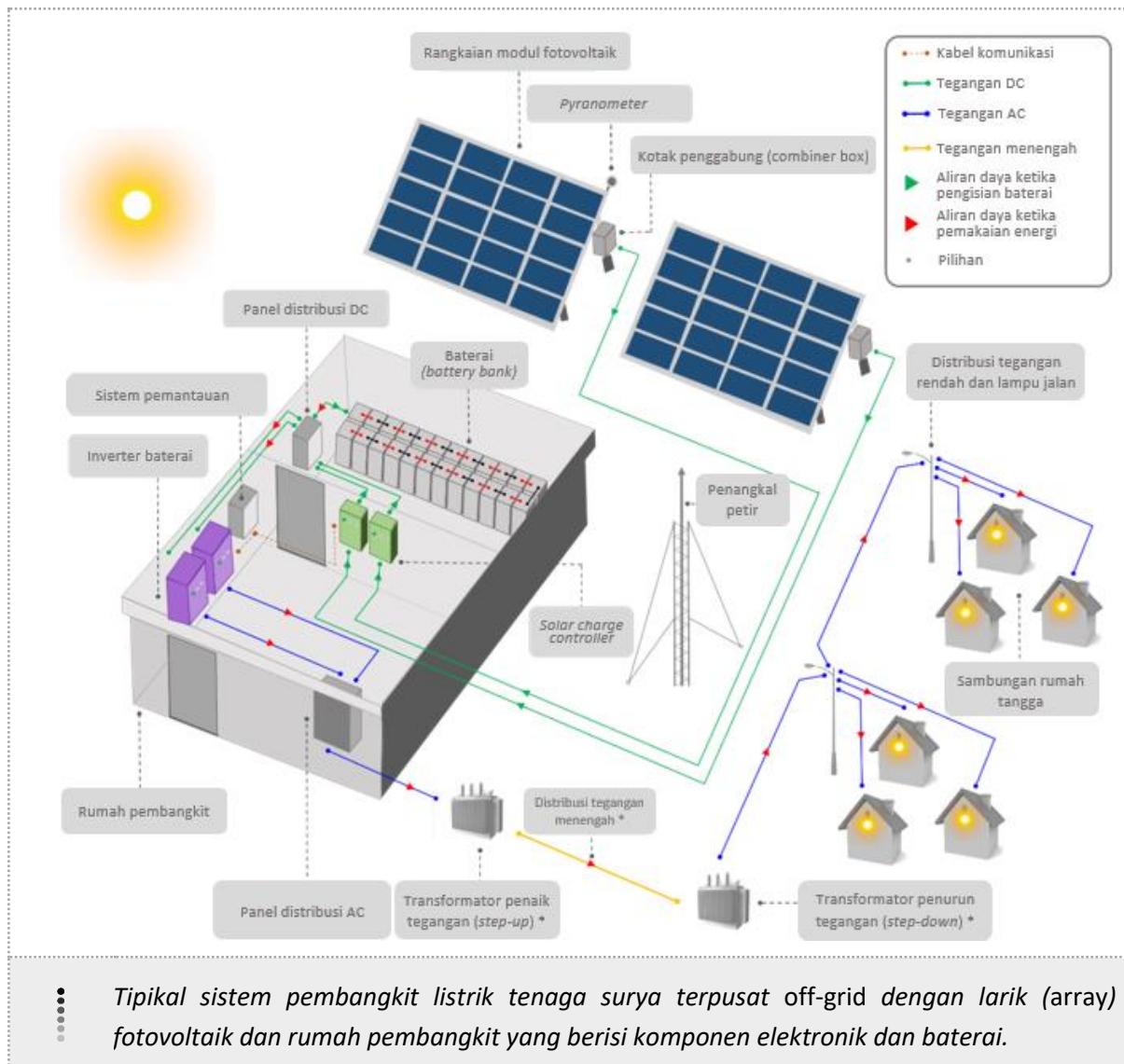
Dibandingkan teknologi energi terbarukan lainnya, seperti pembangkit listrik tenaga air (hidro), sistem PLTS relatif baru di Indonesia. Pemerintah pertama kali mengimplementasikan sistem PLTS tersebar untuk listrik pedesaan pada tahun 1987. Seiring berjalananya waktu, penerapan sistem PLTS di Indonesia telah berkembang dari sistem tersebar ke sistem komunal atau terpusat. Terlepas dari kenyataan bahwa Indonesia telah menjajaki teknologi PLTS sejak tahun 1970-an, keahlian tentang sistem fotovoltaik masih dalam tahap awal. Hal ini disebabkan oleh kurangnya ketersediaan tenaga ahli, teknisi terampil, dan perusahaan rekayasa yang kompeten untuk merancang, membangun, dan memelihara sistem.

Sementara itu, rantai pasokan suku cadang sistem PLTS yang lebih baik sangat diperlukan untuk menjamin keberlanjutan sistem ini di Indonesia terutama di daerah pedesaan. Sangat disadari, butuh waktu yang cukup lama untuk membangun penyedia layanan teknis dan suku cadang di daerah pedesaan. Meskipun demikian, dengan tetap konsisten menjaga kualitas sistem, kemungkinan rusaknya sistem akan berkurang dan umur pakai sistem akan lebih panjang.

1.1. PLTS Off-Grid

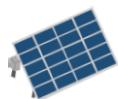
Suatu PLTS *off-grid* yang dikelola secara komunal atau yang sering disebut sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*), beroperasi secara independen tanpa terhubung dengan jaringan PLN. Sistem ini membutuhkan baterai untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan di siang hari untuk memenuhi kebutuhan listrik di malam hari. Ada dua konfigurasi sistem PLTS *off-grid* yang umum digunakan yang akan dijelaskan dalam bab ini, yaitu sistem penyambungan AC atau *AC-coupling* dan penyambungan DC atau *DC-coupling*.

Secara singkat, DC adalah singkatan untuk *direct current* (arus searah), sementara AC adalah singkatan untuk *alternating current* (arus bolak-balik). Penyambungan (*coupling*) mengacu pada titik penyambungan di dalam sistem. Sistem *DC-coupling* menghubungkan rangkaian modul fotovoltaik ke sisi DC sistem PLTS melalui *solar charge controller*. Sementara itu, sistem *AC-coupling* menghubungkan rangkaian modul surya dan baterai ke sisi AC melalui inverter jaringan dan inverter baterai. Jika ada kelebihan daya yang tidak digunakan oleh beban, maka kelebihan daya akan dikonversi kembali ke DC oleh inverter baterai dan energi akan disimpan dalam baterai. Gambar di bawah mengilustrasikan contoh sistem PLTS dalam konfigurasi *DC-coupling*.



Secara umum, kedua konfigurasi tersebut menggunakan komponen yang sama kecuali untuk *solar charge controller* (SCC), komponen yang dipasang di sisi setelah kotak penggabung (*combiner box*). Penggunaan SCC di dalam sistem *DC-coupling* diganti dengan inverter jaringan di dalam sistem *AC-coupling*. Tabel berikut menjelaskan secara singkat fungsi masing-masing komponen.

1 Rangkaian modul fotovoltaik



Rangkaian modul fotovoltaik atau juga disebut larik atau *array* terdiri dari beberapa modul yang dihubungkan secara seri dan/atau paralel. Rangkaian ini mengubah radiasi sinar matahari yang mengenai seluruh permukaan rangkaian menjadi tenaga listrik.

2 Kotak penggabung



Kotak penggabung atau *combiner box* menggabungkan beberapa *string* modul surya atau modul surya dalam konfigurasi paralel. Kotak penggabung ini juga dilengkapi perangkat proteksi untuk melindungi setiap *string* modul fotovoltaik.

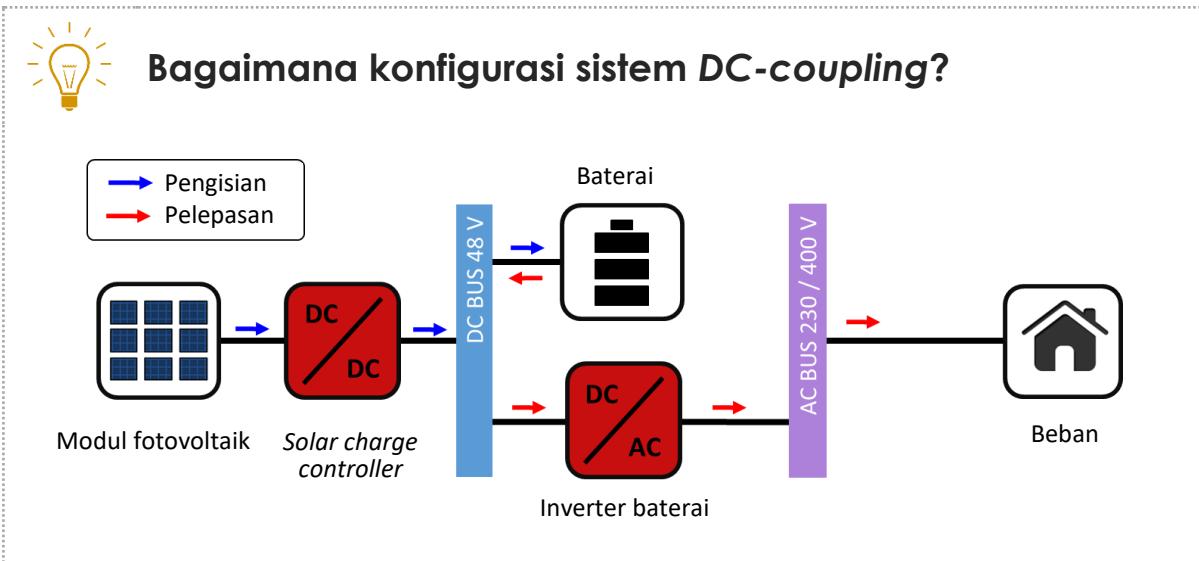
3	Pengkabelan dari larik fotovoltaik ke rumah pembangkit	Pengkabelan menghubungkan keluaran dari kotak penggabung ke <i>solar charge controller</i> yang berada di rumah pembangkit. Kabel pada umumnya dipasang di bawah tanah dan harus tahan cuaca maupun tahan sinar ultraviolet (UV).
4	<i>Solar charge controller</i> (SCC)	SCC mengubah keluaran dari modul surya untuk mencapai tingkat tegangan baterai dan mengendalikan proses pengisian baterai.
5	Panel distribusi DC	Panel distribusi DC digunakan sebagai titik sambungan (<i>bus</i>) untuk tegangan DC. Panel ini menghubungkan SCC, bank baterai, dan inverter.
6	Bank baterai	Bank baterai menyimpan energi yang dihasilkan modul surya di siang hari dan digunakan ketika beban meningkat dan energi dari modul fotovoltaik tidak mencukupi untuk memasok energi.
7	Inverter baterai	Inverter baterai mengubah tegangan DC bank baterai (sekitar 48 VDC) ke tegangan AC pada 230 VAC. Inverter ini juga menjaga baterai agar energi di dalam baterai tidak habis terpakai.
8	Panel distribusi AC	Panel distribusi AC digunakan untuk menghubungkan beberapa inverter baterai secara paralel serta menghubungkan ke jaringan distribusi. Panel ini terdiri dari beberapa titik sambungan atau busbar, sistem proteksi, meteran energi, dan indikator operasional.
9	Sistem pemantauan dan <i>pyranometer</i>	Sistem pemantauan jarak jauh atau <i>remote monitoring system</i> (RMS) dan <i>pyranometer</i> adalah instrumen untuk memantau kinerja sistem secara lengkap dan iradiasi matahari di lokasi tertentu. Jika jaringan komunikasi tersedia dan bekerja dengan baik, pemantauan dapat dilakukan dari jarak jauh selama sistem terhubung dengan GSM.
10	Rumah pembangkit	Rumah pembangkit adalah bangunan tempat dipasangnya sebagian besar komponen elektronik termasuk inverter baterai, panel distribusi AC , SCC, dan bank baterai. Rumah pembangkit melindungi komponen-komponen yang sensitif terhadap cuaca buruk atau kondisi lingkungan lainnya yang dapat merusak sistem PLTS.
11	Penangkal petir	Penangkal petir digunakan untuk menangkap sambaran petir untuk menghindari sambaran langsung ke bagian-bagian yang berbahan konduktor lainnya di area sistem pembangkit. Sistem PLTS juga harus didukung pembumian yang baik dan perangkat proteksi tegangan surja (<i>surge protection device</i>) tambahan untuk melindungi perangkat elektronik dari efek tak langsung dari sambaran petir.

12	Kotak pembumian (elektroda pembumian dan ikatan ekipotensial)	Kotak pembumian (<i>grounding box</i>) berfungsi sebagai tempat penanaman elektroda pembumian dan ikatan ekipotensial dari semua sistem pentanahan komponen PLTS termasuk rangkaian modul surya, rumah pembangkit, dan penangkal petir.
13	Distribusi tegangan menengah	<p>Distribusi tegangan menengah adalah solusi alternatif untuk mengurangi rugi-rugi distribusi termasuk jatuh tegangan (<i>voltage drop</i>). Distribusi tegangan menengah terdiri dari transformator penaik dan penurun tegangan untuk mengubah tegangan dari tegangan rendah ke menengah, dan sebaliknya. Distribusi tegangan menengah diperlukan bila jarak dari sistem PLTS ke beban atau ke sambungan pelanggan lebih dari 1 hingga 3 km, tergantung pada ukuran kabel dan beban yang tersambung.</p>
14	Distribusi tegangan rendah dan lampu jalan	<p>Distribusi tegangan rendah terdiri dari tiang jaringan yang dikombinasikan dengan lampu jalan untuk menopang kabel saluran udara (<i>overhead cable</i>). Konfigurasi jalur distribusi tersebut dapat berupa satu-fasa (230 VAC) atau tiga-fasa (400 VAC) tergantung pada total kapasitas sistem.</p>
15	Rumah tangga	<p>Para pelanggan tersambung melalui tiang jaringan dan masing-masing dilengkapi dengan soket dan tiga lampu LED (Light Emitting Diode). Setiap instalasi rumah tangga dilindungi oleh <i>miniature circuit breaker</i> (MCB) dan pembatas energi (<i>energy limiter</i>) untuk mengendalikan alokasi energi.</p>

1.2. Sistem DC-coupling

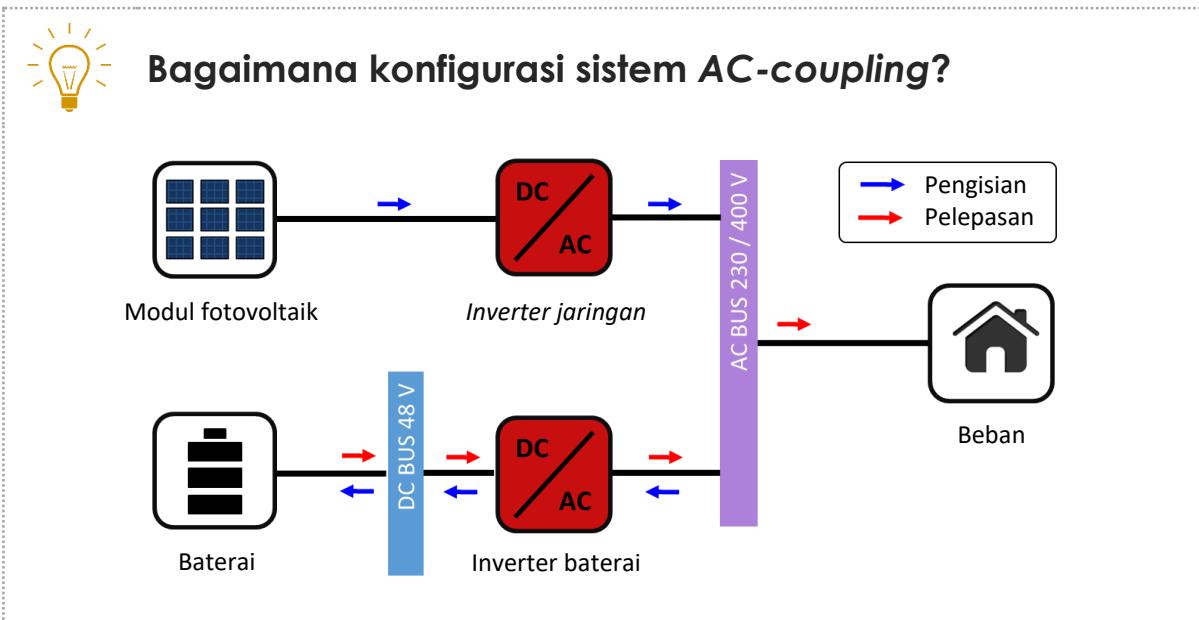
Sistem dianggap memiliki konfigurasi penyambungan sistem DC (*DC-coupling*) jika komponen utamanya terhubung di bus DC. Daya listrik dibangkitkan oleh modul fotovoltaik dan digunakan untuk mengisi baterai melalui solar charge controller. SCC adalah pengonversi DC-DC untuk menurunkan tegangan modul fotovoltaik ke level tegangan baterai yang juga dilengkapi dengan *maximum power point tracker* (MPPT) untuk mengoptimalkan penangkapan energi.

Di siang hari, dengan radiasi sinar matahari yang cukup, baterai diisi untuk mencapai kondisi pengisian (SoC, *state of charge*) yang maksimal. Seiring dengan meningkatnya permintaan listrik hingga beban melebihi daya larik fotovoltaik yang terhubung, inverter baterai akan menyalurkan energi dari baterai ke beban dan akan berhenti beroperasi ketika SoC baterai mencapai batas minimum.



1.3. Sistem AC-coupling

Komponen utama yang membedakan sistem *AC-coupling* dengan *DC-coupling* adalah inverter jaringan. Dalam konfigurasi *AC-coupling*, modul fotovoltaik dan baterai dihubungkan di bus AC melalui inverter jaringan dan inverter baterai. Modul fotovoltaik terhubung ke inverter jaringan dimana tegangan diubah dari DC ke AC. Serupa dengan *charge controller*, inverter jaringan juga dilengkapi dengan perangkat MPPT untuk mengoptimalkan penangkapan energi. Daya dari rangkaian modul fotovoltaik dapat langsung digunakan oleh beban di siang hari dan kelebihannya digunakan untuk mengisi baterai melalui inverter baterai pada saat yang sama.



Berbeda dengan sistem *DC-coupling*, inverter baterai dalam sistem *AC-coupling* bekerja secara dua arah (*bidirectional*). Alat ini berfungsi sebagai pengatur pengisian baterai (*charger*) ketika radiasi sinar matahari cukup, beban terpenuhi, dan baterai belum terisi penuh (SoC rendah). Ketika beban

melampaui jumlah daya masukan modul fotovoltaik, biasanya pada malam hari atau saat hari sedang berawan, maka inverter baterai akan beralih menjadi inverter mengubah arus DC-AC sehingga energi dari baterai dapat digunakan untuk memenuhi permintaan beban.

Sistem konversi di sistem *AC-coupling* bekerja dalam dua cara. Hal ini menyebabkan rugi-rugi konversi yang lebih besar dibandingkan sistem *DC-coupling*. Namun demikian, sistem *AC-coupling* lebih menguntungkan jika kemungkinan beban pada siang hari lebih besar karena dalam hal ini kerugian konversi hanya akan terjadi di inverter jaringan. Disisi lain, konfigurasi AC memberi lebih banyak fleksibilitas untuk dengan mudah diperluas dengan tambahan rangkaian modul fotovoltaik atau dijalankan secara hibrida bersama dengan pembangkit listrik lainnya.

Mirip dengan sistem *DC-coupling*, inverter baterai harus bekerja secara paralel untuk mencapai keluaran daya yang lebih besar. Karena inverter baterai adalah “otak” pembentukan jaringan distribusi di dalam PLTS *off-grid*, harus ada setidaknya satu inverter yang bertindak sebagai “*master*” yang menyediakan referensi tegangan dan frekuensi, sementara inverter baterai sisanya bertindak sebagai “*slave*” yang bergabung di dalam jaringan. Konfigurasi inverter baterai dan pembuatan jaringan (*grid forming*) akan dijelaskan lebih detail pada bab inverter baterai.

Bab 2:

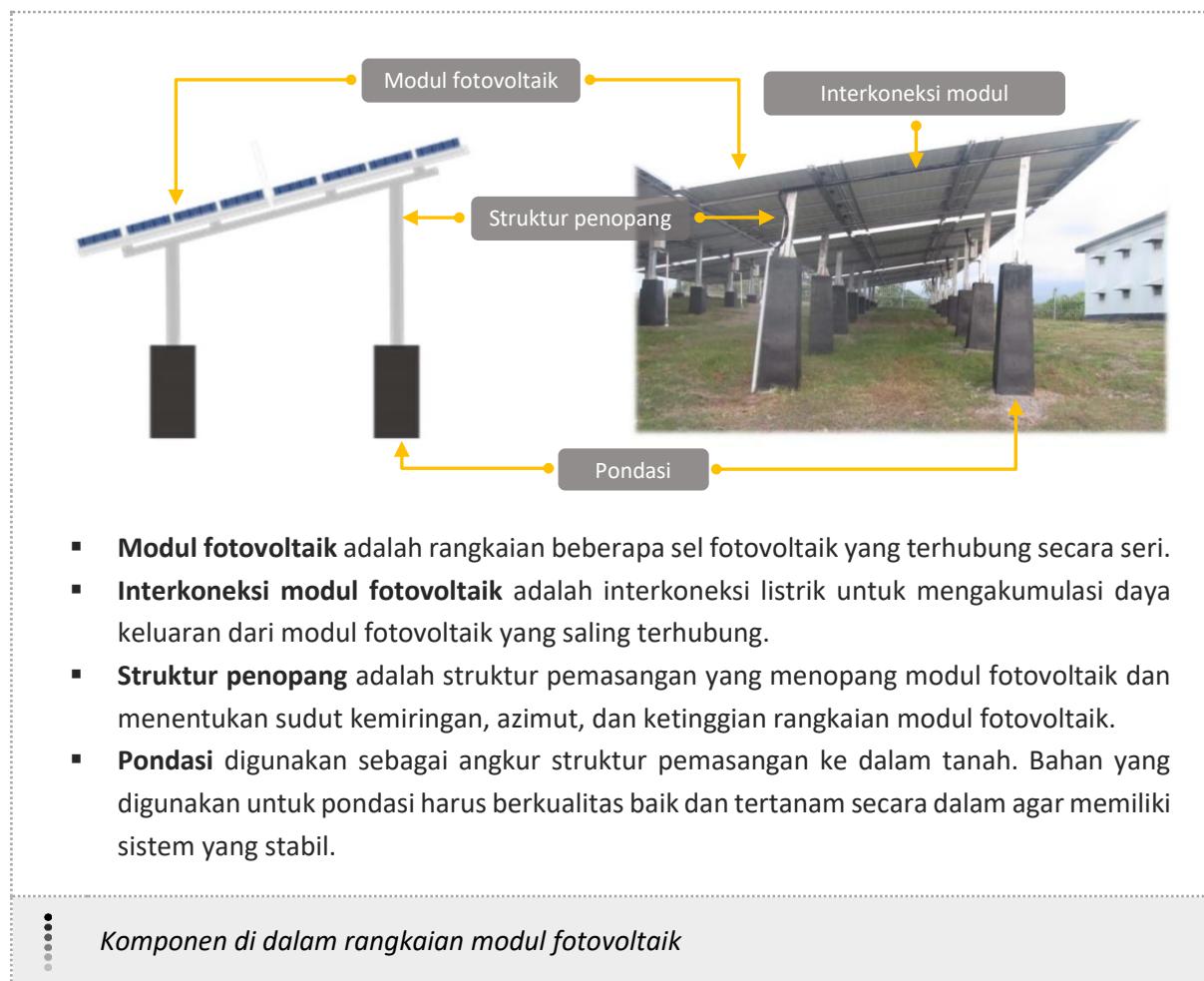
Rangkaian Modul Fotovoltaik

- ✓ Cara mengidentifikasi kualitas modul fotovoltaik yang baik dan yang kurang baik
- ✓ Kiat-kiat untuk menghindari kerusakan pada modul fotovoltaik
- ✓ Hal-hal yang perlu dipertimbangkan ketika menggabungkan modul fotovoltaik di dalam suatu rangkaian
- ✓ Pedoman untuk meningkatkan kualitas instalasi rangkaian modul fotovoltaik



2.1. Dasar-dasar rangkaian modul fotovoltaik

Modul fotovoltaik adalah salah satu komponen yang paling penting dalam sistem PLTS. Modul fotovoltaik mengubah radiasi sinar matahari menjadi energi listrik melalui proses fotoelektrik. Instalasi rangkaian modul fotovoltaik sendiri terdiri dari komponen-komponen berikut ini:



- **Modul fotovoltaik** adalah rangkaian beberapa sel fotovoltaik yang terhubung secara seri.
- **Interkoneksi modul fotovoltaik** adalah interkoneksi listrik untuk mengakumulasi daya keluaran dari modul fotovoltaik yang saling terhubung.
- **Struktur penopang** adalah struktur pemasangan yang menopang modul fotovoltaik dan menentukan sudut kemiringan, azimut, dan ketinggian rangkaian modul fotovoltaik.
- **Pondasi** digunakan sebagai angkur struktur pemasangan ke dalam tanah. Bahan yang digunakan untuk pondasi harus berkualitas baik dan tertanam secara dalam agar memiliki sistem yang stabil.

Komponen di dalam rangkaian modul fotovoltaik

➲ Faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi keluaran dari modul fotovoltaik?

- Radiasi sinar matahari atau intensitas radiasi elektromagnetik sinar matahari yang jatuh di permukaan. Radiasi diukur dalam satuan W/m^2 dan nilainya bervariasi di tempat yang berbeda. Oleh karena itu, pengukuran langsung radiasi atau pengolahan data sekunder penting dilakukan sebelum merancang sebuah sistem PLTS. Daya keluaran dari modul fotovoltaik berbanding lurus secara proporsional dengan radiasi sinar matahari.
- Orientasi dan kemiringan modul fotovoltaik. Modul fotovoltaik di dalam satu rangkaian seri maupun paralel harus dipasang pada orientasi, kemiringan, dan sebaiknya pada ketinggian yang sama.
- Bayangan benda (*shading*) yang menghalangi sinar matahari dan penumpukan debu yang dapat menghalangi transmisi sinar.
- Kenaikan temperatur pada modul yang dapat menyebabkan berkurangnya efisiensi modul fotovoltaik sesuai dengan koefisien temperatur dari modul ($\%/\text{ }^\circ\text{C}$).

■■■ Bayangan (*shading*) pada modul fotovoltaik

Bayangan adalah masalah yang sangat penting pada PLTS karena dapat secara signifikan mengurangi kinerja sistem. Terkena bayangan sebagian maupun secara penuh tidak hanya mengurangi produksi energi, namun juga berisiko mempengaruhi kondisi modul fotovoltaik. Ketika terkena bayangan sebagian, pelepasan panas pada sel yang terkena bayangan cenderung akan meningkat (dikenal sebagai titik panas atau *hot spot*) dan dapat mengurangi umur modul fotovoltaik.



- Rangkaian modul fotovoltaik terletak di permukaan yang lebih tinggi dan dengan jarak yang cukup.



- Modul fotovoltaik bebas dari *mutual shading* antar larik dan dari bayangan rumah pembangkit.



- Bayangan oleh rumah pembangkit menyebabkan hilangnya daya keluaran dari modul yang terbayangi.



- Bayangan dari pohon di sekitar modul dapat mengurangi produksi tenaga listrik.

➲ Bagaimana menghindari penurunan produksi energi akibat bayangan?

- Melakukan identifikasi lokasi dengan benar selama studi kelayakan untuk memastikan bahwa modul fotovoltaik akan bebas dari bayangan di sepanjang hari dan di sepanjang musim dalam setahun.
- Desain dengan benar tata letak tiap lokasi PLTS. Rangkaian modul fotovoltaik harus memiliki jarak yang cukup satu sama lain untuk menghindari bayangan dari rangkaian modul fotovoltaik yang berdekatan atau dengan bangunan yang lebih tinggi di sekitarnya.



- Selama proses komisioning pastikan modul fotovoltaik bebas dari bayangan di setiap saat dan pertimbangkan kemungkinan bayangan di masa mendatang misalnya pohon yang tumbuh.
- Tumbuhan yang berada di bawah dan di sekitar rangkaian modul fotovoltaik harus tetap rendah. Penting untuk melakukan pembersihan tumbuhan pada saat pemeliharaan rutin.



- Jarak antar larik yang tidak mencukupi menyebabkan terjadinya bayangan antar modul (*mutual shading*) pada instalasi yang lebih rendah.



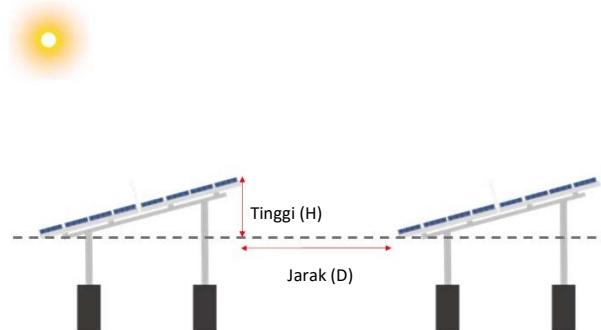
- Rangkaian modul fotovoltaik terlalu rendah. Tumbuhan bisa membayangi modul fotovoltaik dan mengurangi aliran udara di bawah modul.



Berapa jarak antar rangkaian modul fotovoltaik yang ideal?

Penting untuk menghitung secara akurat jarak antar rangkaian modul fotovoltaik, terutama jika rangkaian tidak dipasang pada ketinggian yang sama. Jarak yang berdekatan dapat menyebabkan bayangan, sementara pengaturan jarak antar rangkaian yang sangat jauh menyebabkan penggunaan lahan yang berlebihan.

Jarak minimum antar rangkaian modul fotovoltaik yang diperlukan (D) sangat tergantung pada titik lintang lokasi, ketinggian permukaan rangkaian modul fotovoltaik (H), dan waktu, terutama di tempat dimana lintasan matahari berubah secara signifikan sepanjang tahun. Dalam hal lokasi dekat dengan daerah khatulistiwa, ketentuan praktisnya adalah bahwa jarak tersebut setidaknya dua kali lipat ketinggian dari permukaan modul fotovoltaik (lihat gambar).

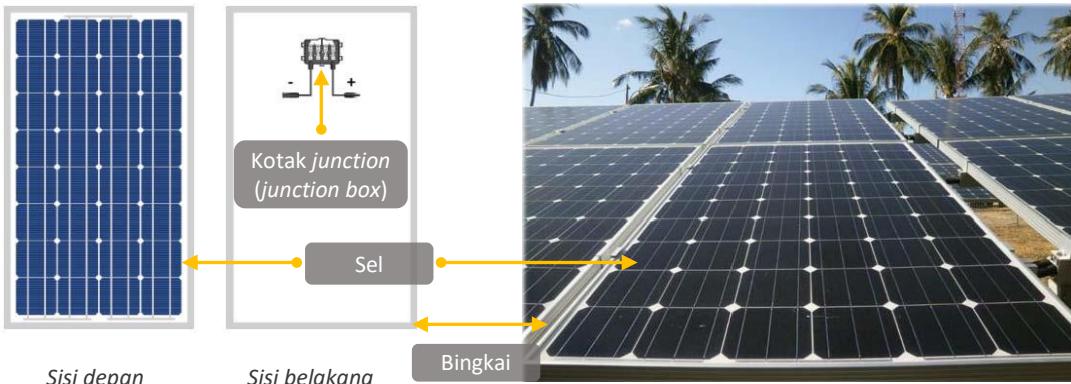


$$\frac{\text{Jarak [m]}}{\text{Tinggi dari permukaan modul surya [m]}} \geq 2$$

Ada beberapa perangkat lunak yang bisa digunakan untuk menyederhanakan analisis bayangan (misalnya PVsyst dan PV*SOL). Perangkat lunak ini memungkinkan para desainer untuk mendesain tata letak sistem, lengkap dengan grafik lintasan matahari di lokasi yang ditetapkan dan perkiraan jumlah keluaran energi yang mempertimbangkan rugi-rugi ketika rangkaian modul fotovoltaik terkena bayangan.

2.2. Modul fotovoltaik

Modul fotovoltaik terdiri dari sejumlah sel fotovoltaik yang saling terhubung secara seri dan diproduksi menjadi sebuah unit. Sel-sel tersebut berikut dengan kawat *busbar* penghubungnya dilindungi oleh bahan pelapis atau enkapsulasi (*encapsulating material*) yang melindungi sel-sel dari kontak langsung dengan lingkungan dan kekuatan mekanik yang dapat merusak sel-sel yang tipis. Kinerja kelistrikan modul fotovoltaik dicirikan dengan kurva arus-tegangan (I-V). Kurva tersebut menjelaskan operasi arus dan tegangan modul fotovoltaik pada radiasi sinar matahari dan suhu tertentu. Karena modul fotovoltaik merupakan komponen utama dalam PLTS, kualitas modul fotovoltaik yang baik sangatlah penting untuk mempertahankan operasional sistem.



Modul fotovoltaik berbasis silikon pada umumnya

➲ Apa yang harus dipertimbangkan ketika memilih modul fotovoltaik?

- Gunakan modul fotovoltaik dengan efisiensi yang lebih besar dari 15%. Menggunakan modul fotovoltaik dengan efisiensi yang tinggi akan meminimalkan penggunaan lahan.
- Toleransi daya modul fotovoltaik harus kurang dari 2,5% di bawah kondisi uji standar (STC - *standard test conditions*). Informasi ini dapat ditemukan di label kinerja modul fotovoltaik di belakang setiap modul, misalnya: "Daya puncak 100 W \pm 2%" atau "Toleransi keluaran \pm 2%".
- Rangka modul fotovoltaik harus tahan terhadap korosi, yaitu aluminium *anodized* atau pelapisan aluminium dengan zat warna.

- Modul fotovoltaik harus mampu beroperasi pada tegangan sampai dengan 1000 VDC dan direkomendasikan tidak lebih dari 1000 VDC. Tujuan mengatur batas untuk maksimum tegangan sistem adalah untuk menyesuaikan dengan tegangan perangkat lain yang terhubung ke modul fotovoltaik yang sebagian besar nilainya tidak lebih dari 1000 VDC.



Modul fotovoltaik harus diuji dan memenuhi standar kualitas sesuai dengan IEC 61215 untuk modul *monocrystalline* dan *polycrystalline* sedangkan tipe *thin film* merujuk pada IEC 61646. Modul fotovoltaik juga harus memiliki masa garansi yang melebihi 20 tahun operasi dengan penurunan kinerja maksimal 10% per 10 tahun.

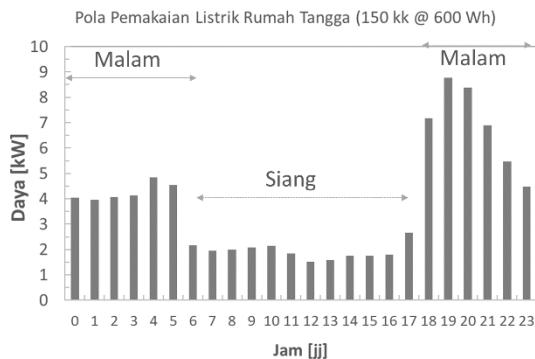


Bagaimana cara menghitung kapasitas modul fotovoltaik yang dibutuhkan?

1. Hitung kebutuhan energi harian di malam (17:00 – 07:00) dan siang hari (07:00 – 17:00) dengan menggunakan pola konsumsi listrik masyarakat desa dan prakiraan kenaikan beban 30%

$$\text{Energi malam hari} = 71,5 \text{ kWh} \times 130\% = 92,95 \text{ kWh}$$

$$\text{Energi siang hari} = 18,5 \text{ kWh} \times 130\% = 24,05 \text{ kWh}$$



2. Periksa iradiasi harian matahari yang tersedia di lokasi. Data dapat didapatkan melalui pengukuran langsung atau data statistik (NASA, Renewable Ninja, atau Global Solar Atlas). Tentukan rata-rata iradiasi harian terendah di dalam satu tahun.

Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun
5,75	5,59	6,17	6,12	5,85	5,54
Jul	Agu	Sep	Okt	Nov	Des
5,76	6,45	7,09	7,34	6,96	5,99

Rata-rata	6,22	kWh/m ² /hari
Minimum	5,59	kWh/m ² /hari

$$\text{Iradiasi terendah} = 5,59 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$$

pada bulan Februari

3. Hitung total efisiensi sistem untuk pemakaian malam dan siang hari dengan mempertimbangkan rugi-rugi pada modul fotovoltaik (kenaikan temperatur, penumpukan debu, ketidakcocokan modul), rugi-rugi pada elektronika daya dan kabel, dan rugi-rugi pada baterai (malam hari).

• Rugi-rugi modul fotovoltaik = 11,5%
• Rugi-rugi inverter jaringan / charge controller = 3%
• Rugi-rugi inverter baterai = 6%
• Rugi-rugi pengkabelan = 2%
• Rugi-rugi baterai = 15% (lead-acid)
• Total rugi-rugi malam hari = 37,5%
• Total rugi-rugi siang hari = 22,5%

4. Hitung kebutuhan total energi dari modul fotovoltaik untuk siang dan malam dan kapasitas modul fotovoltaik

$$\text{Total energi modul} = \frac{\text{Energi malam}}{100\% - \text{rugi-rugi malam}} + \frac{\text{Energi siang}}{100\% - \text{rugi-rugi siang}}$$

$$\frac{92,95 \text{ kWh}}{62,5\%} + \frac{24,05 \text{ kWh}}{77,5\%} = 179,75 \text{ kWh}$$

5. Hitung kapasitas modul fotovoltaik dan jumlah yang dibutuhkan jika daya nominal modul 200 Wp

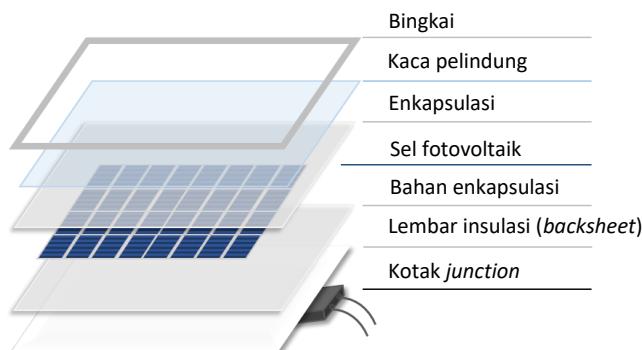
$$\text{Kapasitas modul} = \frac{\text{Total energi modul}}{\text{Minimum rata-rata iradiasi}} \times G_{\text{STC}}$$

$$\frac{179,75 \text{ kWh}}{5,59 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}} \times 1000 \text{ W/m}^2 = 32,15 \text{ kWp}$$

Min. 162 x 200 Wp \rightarrow 32,4 kWp



Bagaimana struktur sebuah modul fotovoltaik?



- **Bingkai** atau *frame* biasanya terbuat dari aluminium *anodized* untuk menghindari korosi. Oleh karena pemasangan bingkai dilakukan di akhir proses pembuatan, bingkai memiliki fungsi untuk memastikan kekokohan panel.
- **Kaca pelindung** melindungi sel fotovoltaik dari lingkungan dan memastikan kekokohan panel. Karena fungsinya tersebut, kaca pelindung mengambil proporsi tertinggi dari total berat modul fotovoltaik.
- **Enkapsulasi atau laminasi** adalah lapisan antara sel fotovoltaik dan kaca pelindung. Laminasi digunakan untuk mencegah kerusakan mekanis pada sel fotovoltaik dan mengisolasi tegangan dari sel fotovoltaik dengan bagian modul lainnya. Biasanya lembaran laminasi menggunakan bahan *ethylene-vinyl acetate* (EVA).
- **Sel fotovoltaik** merupakan komponen utama dari modul fotovoltaik. Sel ini terbuat dari bahan semikonduktor yang menangkap sinar matahari dan mengubahnya menjadi listrik. Sel-sel saling terhubung secara seri untuk mendapatkan tegangan total yang lebih tinggi melalui kawat *busbar*. Bahan yang digunakan untuk sel fotovoltaik umumnya adalah silikon, seperti *polycrystalline* dan *monocrystalline*.
- **Lembar insulasi (*backsheets*)** terbuat dari bahan plastik untuk melindungi dan secara elektrik mengisolasi sel-sel dari kelembaban dan cuaca.
- **Kotak penghubung (*junction box*)** digunakan sebagai terminal penghubung antara rangkaian sel fotovoltaik ke beban atau ke panel lainnya. Perangkat ini berisi kawat busbar dari rangkaian sel fotovoltaik, kabel dan *bypass diode*.

■■■ Label kinerja modul fotovoltaik



Modul fotovoltaik harus diberi label dengan karakteristik kinerjanya di sisi belakang panel.

Informasi berikut ini setidaknya harus disebutkan pada label:

Merek dan jenis modul fotovoltaik	Pabrikan dan tipe produk modul fotovoltaik.
Jenis	Jenis sel (misalnya <i>monocrystalline</i> , <i>polycrystalline</i> , dll)
Module nominal power, P_{MAX} [Wp]	Daya nominal modul fotovoltaik yang didapat dari kondisi uji standar (STC, <i>Standard Test Condition</i>). STC meliputi kondisi uji dengan radiasi sinar matahari sebesar 1000 W/m^2 , suhu modul 25°C , dan massa udara ¹ (<i>AM – air mass</i>) sebesar 1.5 AM.
Open circuit voltage, U_{oc} [V]	Tegangan pada keluaran dari modul fotovoltaik ketika tidak ada beban.
Short circuit current, I_{sc} [A]	Arus yang melalui modul fotovoltaik ketika terjadi hubungan arus pendek.
Maximum power point voltage [U_{mp}]	Tegangan operasional pada daya maksimum.
Maximum power point current [I_{mp}]	Arus operasional pada daya maksimum.
Maximum voltage [U_{max}]	Tegangan maksimum dimana modul fotovoltaik dapat beroperasi dengan aman.

¹ Massa udara (*AM – air mass*) merupakan ketebalan atmosfer. Massa udara di Eropa = AM1,5, sedangkan di khatulistiwa sekitar AM1.

⌚ Mengapa adanya label itu penting?

- Label berfungsi sebagai referensi untuk kinerja modul fotovoltaik selama proses komisioning dan juga saat pemeriksaan.
- Menyediakan informasi tentang karakteristik modul fotovoltaik ketika diperlukan penggantian.

☰ Sel fotovoltaik

Sel fotovoltaik sangat sensitif dan rentan terhadap kerusakan akibat beban mekanik. Pita busbar tipis, yang melakukan interkoneksi antara sel-sel fotovoltaik, juga cenderung dapat retak karena proses pembuatan modul fotovoltaik yang tidak tepat. Cacat ini dapat mengurangi kinerja dan keluaran modul fotovoltaik bahkan bisa menimbulkan tidak ada keluaran sama sekali.

⌚ Bagaimana mengatasi kerusakan pada sel fotovoltaik?

- Menetapkan proses jaminan mutu yang menyeluruh di pabrik seperti:
 - Memilah sel-sel yang buruk.
 - Melakukan pemeriksaan elektroluminesens² untuk mengidentifikasi kualitas penyolderan yang buruk, keretakan mikro, dan laminasi yang buruk.
 - Menjalankan tes beban mekanik untuk menentukan kerusakan yang mungkin disebabkan oleh getaran atau beban tersebut.
- Pemeriksaan rutin harus dilakukan untuk memeriksa kondisi modul fotovoltaik sebagai bagian dari pemeliharaan yang bersifat pencegahan (preventif). Modul fotovoltaik yang terdiri dari sel-sel yang buruk harus diganti oleh pabrikan selama masa garansi.



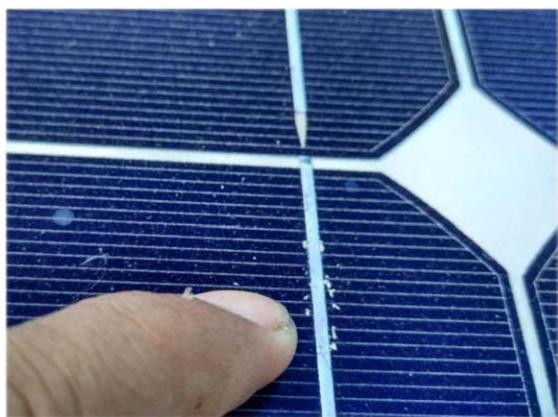
- Modul fotovoltaik bebas dari keretakan, *snail track*³, dan memiliki kualitas penyolderan yang baik.



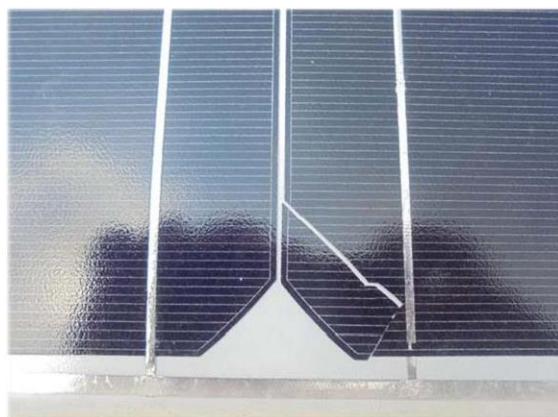
- *Snail track* pada panel. Dalam jangka panjang, *snail track* akan menyebabkan *microcrack* pada sel fotovoltaik dan *hot spot*.

² *Electroluminescence* adalah suatu fenomena optis dan listrik dimana sebuah bahan memancarkan cahaya sebagai respons terhadap arus listrik yang dialirkan pada bahan tersebut.

³ *Snail track* adalah tanda yang menyerupai jalur siput di atas permukaan sel fotovoltaik pada suatu modul fotovoltaik.



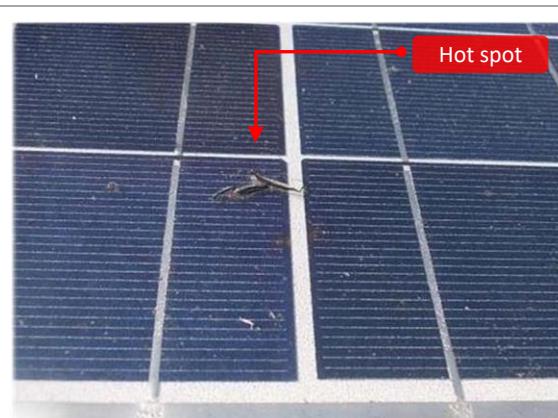
- Kualitas penyolderan yang buruk dapat meningkatkan serangkaian hambatan tambahan.



- Modul fotovoltaik retak di dalam serangkaian modul fotovoltaik dapat mempengaruhi keluaran modul.



- Hot spot pada sebagian modul dapat mengurangi produksi listrik dan jika dibiarkan dapat merusak modul surya



- Sel fotovoltaik yang terbakar karena peningkatan panas yang signifikan.

➲ Apakah *hot spot* itu?

Suatu bagian yang diakibatkan oleh panas yang terlokalisasi pada sel fotovoltaik yang terjadi ketika ada perbedaan pencahayaan di antara sel-sel fotovoltaik. Karena keluaran dari sel sebanding dengan jumlah radiasi, sel-sel dapat berperilaku berbeda dan dapat menciptakan masalah ketika dihubungkan secara seri. Sel dengan arus keluaran yang lebih rendah akan mengurangi dan membatasi operasional arus seluruh rangkaian sel fotovoltaik (*string*). Hal ini menjadi lebih parah jika sel-sel tersebut benar-benar tertutup dan menghilangkan daya total yang dihasilkan oleh sel-sel yang terpapar sinar.

Karena ada keterbatasan di dalam sel untuk mengatasi disipasi daya, sel-sel tersebut dapat menjadi terlalu panas sehingga menghasilkan *hot spot*. Penyebabnya tidak terbatas dikarenakan terkena bayangan sebagian (*partial shading*), kecenderungan kenaikan suhu mungkin juga berasal dari pemanasan karena buruknya kualitas sel, penyolderan yang buruk antara sel-sel dan sel-sel yang memiliki nilai hambatan paralel (*shunt resistance*) yang rendah. Nilai hambatan paralel yang rendah dapat menyebabkan hilangnya daya listrik di sel fotovoltaik.

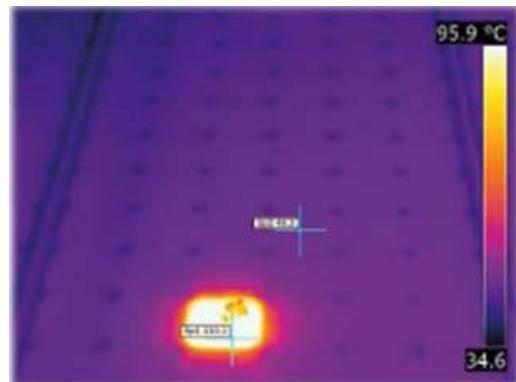


Hot spot dapat menurunkan kinerja atau merusak sel, menyebabkan sambungan meleleh, dan menyebabkan busur listrik (*arc*) karena terjadinya kerusakan lembar pelindung dan laminasi.

⦿ Bagaimana cara menghindari *hot spot*?



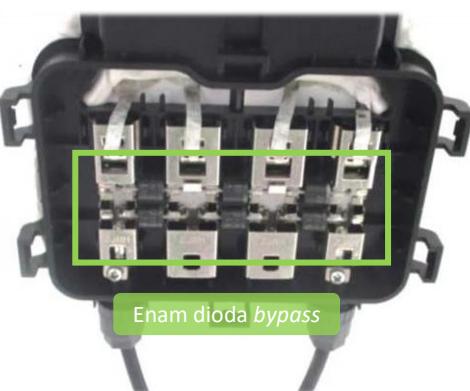
- Deteksi dini *hot spot* dengan pemeriksaan rutin pada suhu permukaan modul fotovoltaik menggunakan thermografi (*thermal imaging camera*).



- Contoh thermografi⁴. Titik panas diidentifikasi dengan mengarahkan kamera ke modul fotovoltaik.

- Deteksi titik panas pada modul fotovoltaik. Ada salah satu blok sel yang memiliki suhu yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan lainnya.

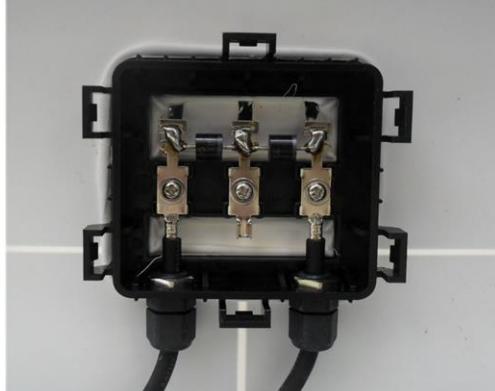
- Hubungkan dioda *bypass* secara paralel terbalik dengan sel atau sekelompok sel. Selama operasi normal, ketika semua sel mendapat paparan sinar, sel-sel tersebut menghasilkan listrik. Dioda *bypass* mulai beroperasi ketika satu atau beberapa sel tertutup bayangan.



Enam dioda *bypass*



- Modul fotovoltaik dilengkapi enam dioda *bypass* yang terletak di dalam kotak *junction*.

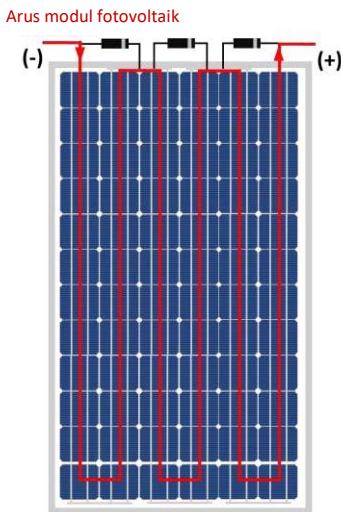


- Modul fotovoltaik dengan dua dioda *bypass* melindungi dua rangkaian seri sel fotovoltaik di satu modul.

⁴ FLIR. Sumber: <http://www.flir.fr/cs/display/?id=60636> (Diakses: 27 Februari 2017).



Cara memilih dioda bypass



Gambar disamping mengilustrasikan modul fotovoltaik dengan 72 sel yang dihubungkan secara seri dan dilindungi oleh tiga dioda *bypass* selama operasi normal. Jumlah maksimum sel yang akan dilindungi oleh satu dioda terutama dihitung berdasarkan tegangan jatuh (*breakdown voltage*) dari sel dan tegangan maju (*V_F - forward voltage*) dari dioda. Biasanya, tegangan jatuh dari sel adalah 30 V untuk jenis *monocrystalline* dan 12 sampai 24 V untuk jenis *polycrystalline*.

Dioda Schottky sering digunakan untuk tujuan ini karena memiliki nilai V_F yang rendah di kisaran 0,15 sampai 0,5 V. Dioda Schottky dapat melindungi hingga 24 sel dengan mengasumsikan bahwa tegangan rangkaian terbuka dari sel berbasis silikon adalah 0,5 V⁵. Oleh karena itu, tiga dioda digunakan untuk melindungi panel dengan 72 sel.

- *Modul fotovoltaik dengan 72 sel yang dihubungkan secara seri dan dilindungi oleh tiga dioda bypass.*

Selain itu, dioda harus memiliki nilai puncak tegangan lebih yang terjadi secara periodik ($V_{RRM} - maximum repetitive reverse voltage$) yang mencukupi. Hal ini diperlukan karena pada suhu terendah tegangan mungkin sama dengan nilai maksimum tegangan rangkaian terbuka dari modul fotovoltaik dibagi dengan jumlah dioda. Mengingat tegangan rangkaian terbuka modul fotovoltaik adalah sebesar 40 V dan maksimum 48 V karena suhu modul fotovoltaik menurun, V_{RRM} dari masing-masing dioda harus lebih tinggi dari 16 V.

■■■ Kaca pelindung modul fotovoltaik

Salah satu fungsi kaca pelindung adalah untuk melindungi seluruh modul fotovoltaik. Kaca pelindung tersebut harus bebas dari keretakan untuk memastikan kinerja modul fotovoltaik yang optimal serta melindungi modul fotovoltaik. Namun, beberapa kerusakan mungkin tidak dapat dihindari, misalnya tertimpa batu ketika terjadi tanah longsor, tertimpa pohon tumbang, dan kesalahan manusia seperti penanganan material dan kemasan yang buruk selama pengiriman dan penyimpanan di gudang. Kenaikan temperatur yang signifikan karena terjadinya *hot spot*, buruknya struktur penopang, dan tarikan yang disebabkan oleh rangka modul fotovoltaik juga dapat menyebabkan retaknya kaca.



Modul fotovoltaik harus bebas dari keretakan dan hindari untuk menghubungkan modul fotovoltaik yang retak ke suatu rangkaian modul fotovoltaik.

⁵ STMicroelectronics. Bagaimana memilih dioda *bypass* untuk kotak penghubung panel silikon. Catatan Aplikasi AN3432, 2011.

⌚ Mengapa modul fotovoltaik dengan kaca pelindung yang rusak tidak boleh terhubung?

- Kelembaban, oksigen dan air bisa masuk ke bagian yang rusak dan menimbulkan korosi pada kabel, dan dapat menyebabkan hubungan arus pendek.
- Kerusakan kaca yang parah dapat membahayakan sel-sel fotovoltaik dan mengganggu koneksi busbar di antara sel-sel sehingga dapat menyebabkan seluruh *string* terlepas dari jaringan.
- Keretakan dapat mengurangi transmisi cahaya ke sel fotovoltaik sehingga mengurangi keluaran daya dari modul fotovoltaik. Kerusakan akibat peningkatan pelepasan panas atau pemanasan *hot spot* di sel dengan paparan sinar matahari yang minimal mungkin dapat terjadi jika dioda *bypass* tidak dipasang di modul fotovoltaik.
- Penurunan kinerja atau produksi listrik dari modul fotovoltaik.



⌚ Bagaimana menghindari penurunan daya karena kaca yang retak?

- Pastikan bahwa modul fotovoltaik terpasang pada penopang struktur dengan baik.
- Tingkatkan penanganan material dan metode pengemasan selama transportasi.
- Selalu simpan modul fotovoltaik lengkap dengan pembungkusnya di dalam kemasannya.
- Periksa kondisi semua modul fotovoltaik secara teratur untuk mengidentifikasi kemungkinan penyebab retak seperti terkena bahaya longsor atau modul fotovoltaik yang longgar. Modul fotovoltaik yang retak harus segera diganti dengan jenis modul fotovoltaik yang sama.





- Kaca yang bersih memberikan transmisi cahaya yang optimal ke sel fotovoltaik



- Penumpukan debu pada kaca dapat menyebabkan berkurangnya keluaran daya modul fotovoltaik

⦿ Bagaimana menjaga kebersihan modul fotovoltaik?

- Pasanglah rangkaian modul fotovoltaik dengan sudut kemiringan setidaknya 10° untuk menyediakan mekanisme pembersihan melalui siraman air hujan. Modul fotovoltaik harus dipasang dengan jarak yang cukup antara satu dengan yang lain.
- Jadwalkan pembersihan rangkaian modul fotovoltaik secara teratur sesuai dengan karakteristik lokasi. Pembersihan mingguan dianjurkan bila lokasi tersebut terletak di daerah yang kering dan berdebu seperti di dekat pantai, dekat gunung berapi, gurun atau bukit pasir.
- Pastikan modul fotovoltaik bebas dari residu pada kaca pelindungnya selama pemasangan.



⦿ Bagaimana cara membersihkan modul fotovoltaik?

- Bersihkan modul fotovoltaik di pagi hari karena embun yang muncul di malam hari membasahi kotoran sehingga memudahkan proses pembersihan.
- Jangan gunakan alat logam atau benda tajam untuk membersihkan kaca pelindung karena dapat menggores kaca sehingga menciptakan bayangan.
- Gunakan hanya air bersih sebagai sarana pembersih. Hindari menggunakan bahan pembersih kimia seperti deterjen untuk menghindari goresan.

■■■ Laminasi

Delaminasi (pengelupasan lapisan) dapat terjadi antara kaca pelindung dan laminasi serta antara laminasi dan sel fotovoltaik. Cacat terutama terjadi karena kualitas yang tidak memadai dari perekat yang sensitif terhadap radiasi sinar ultraviolet (UV) dan kelembaban. Delaminasi mengakibatkan berkurangnya transmisi cahaya sehingga mengurangi keluaran daya dan berpotensi menimbulkan *hotspot*.



■■■ Lembar insulasi (*backsheet*)

Backsheet atau lembar insulasi di bagian belakang terbuat dari lembaran tipis polimer yang secara mekanikal harus kuat, tahan sinar UV, dan berfungsi sebagai penghalang yang baik terhadap paparan langsung dari lingkungan seperti perlindungan dari cuaca, kotoran, dan kelembaban. Lembaran ini juga mengamankan pengoperasian modul fotovoltaik karena lembaran ini digunakan untuk mengisolasi tegangan DC yang tinggi pada *string* sel. Lembar insulasi di bagian belakang modul fotovoltaik ini harus bebas dari keretakan, gelembung, dan delaminasi. Hal ini untuk menghindari kebocoran air yang dapat mengurangi kinerja modul akibat korosi, penurunan kualitas laminasi (*encapsulant*), dan hubungan arus pendek internal.





Delaminasi menyebabkan kemungkinan paparan terhadap bahan konduktif yang dialiri listrik terhadap lingkungan. Delaminasi yang tidak ditangani dapat menyebabkan koneksi internal rusak. Rusaknya busbar dapat membuat celah percikan dan dengan demikian mengakibatkan terjadinya busur listrik terutama pada tegangan tinggi.

⌚ Bagaimana mengurangi risiko delaminasi?

- Lebih selektif dalam memilih bahan dan perekat yang tahan lama terhadap kelembaban dan radiasi sinar UV.
- Pengujian modul fotovoltaik dalam jangka panjang dengan paparan luar ruangan. Modul fotovoltaik harus juga lulus tes sesuai dengan IEC 61730 – “*Photovoltaic (PV) module safety qualification*” dan IEC 61701 – “*Salt mist corrosion testing of photovoltaic (PV) modules*”.
- Lakukan pemeriksanaan secara visual terhadap modul fotovoltaik sebelum pengiriman ke lokasi.

█████ Kotak junction

⌚ Seperti apakah kotak penghubung (*junction box*) yang baik itu?

- Kotak *junction* dipasang menggunakan sistem perekat yang berkualitas baik untuk mempertahankan daya rekat jangka panjang.
- Kotak *junction* harus tertutup dan disegel karet untuk menghindari masuknya air, hubungan arus pendek, dan bahaya tersengat listrik karena adanya tegangan listrik. Kotak penghubung yang baik harus memiliki tingkat perlindungan minimal IP 65 yang memberikan perlindungan terhadap debu dan semburan air bertekanan rendah.
- Dilengkapi dengan *gland* kabel yang tepat sesuai dengan ukuran konduktor. *Gland* kabel tersebut harus dikencangkan untuk menghindari masuknya air ke kotak.
- Dilengkapi dengan dioda *bypass* untuk melindungi modul fotovoltaik dari kemungkinan timbulnya titik panas (*hot spot*).



- Kotak *junction* terpasang dengan baik dan tertutup rapat di balik modul fotovoltaik.



- Kotak *junction* tidak ditutup dengan benar sehingga mungkin kehilangan rating ingress protection (IP).



- Gerakan fisik karena kekuatan angin dapat menggeser blok kayu dan menyebabkan kotak terbuka.



- Kotak *junction* yang terbuka dapat menyebabkan korosi koneksi internal dan hubungan arus pendek.

■ ■ ■ Bingkai modul fotovoltaik

Modul fotovoltaik harus dirancang untuk dapat menahan tekanan mekanis yang berat. Rangka harus mampu menjaga bentuknya untuk memastikan kokohnya modul fotovoltaik dan menjaga ikatan dengan struktur penopang. Selain itu, rangka yang tidak seragam dapat meningkatkan tekanan pada kaca, sehingga dapat menyebabkan risiko retak bagi kaca pelindung dan sel fotovoltaik dalam jangka panjang.



Bingkai modul fotovoltaik harus dalam kondisi baik dan dikencangkan dengan aman.



- Bingkai modul fotovoltaik yang terpuntir menyebabkan kaca retak. Modul fotovoltaik yang kacanya pecah harus diganti.



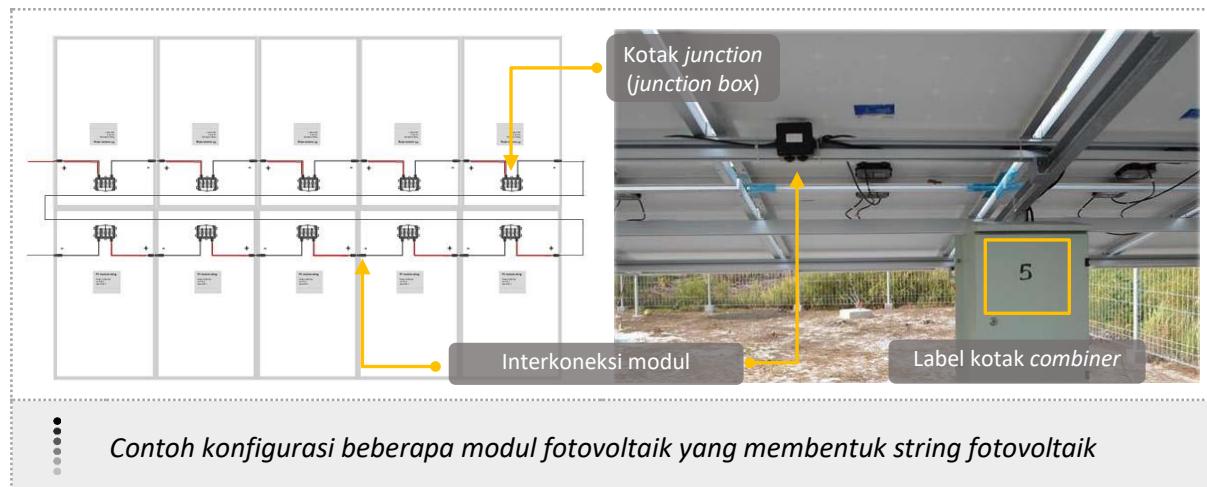
- Mur tidak dipasang untuk mengikat bingkai modul fotovoltaik dengan penyangga modul.

⌚ Apa yang dapat dilakukan untuk mencegah bingkai berubah bentuk?

- Modul fotovoltaik harus dipasang dengan erat dan dicegah agar tidak roboh karena angin yang kencang atau beban mekanis lainnya yang tinggi.
- Penanganan yang tepat selama transportasi modul fotovoltaik, kemasan harus dijaga dari getaran dan benturan.
- Dianjurkan untuk menggunakan *clamp* dibandingkan pemasangan baut secara langsung pada bingkai modul. Pergerakan mekanis pada struktur penopang dapat berdampak pada bingkai panel.

2.3. Interkoneksi modul fotovoltaik

PLTS dibangun dari koneksi seri dan paralel dari modul fotovoltaik individual untuk mencapai tegangan dan arus yang dikehendaki. Pembangkit terdiri dari modul fotovoltaik individual yang terhubung secara seri untuk menaikkan tegangan. Setelah tegangan keluaran yang dikehendaki tercapai, sambungan secara seri dari modul fotovoltaik individual dihubungkan secara paralel di dalam kotak penggabung (*combiner box*) untuk menaikkan arus. Keluaran daya yang dikehendaki adalah linear (sebanding) dengan jumlah panel. Oleh karena modul fotovoltaik memiliki keterbatasan tegangan, jumlah panel dan tegangan rangkaian terbuka tidak boleh melebihi tingkat tegangan dari panel individual.

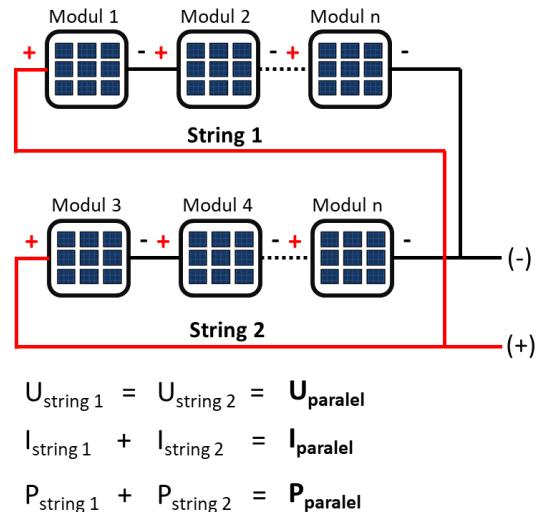
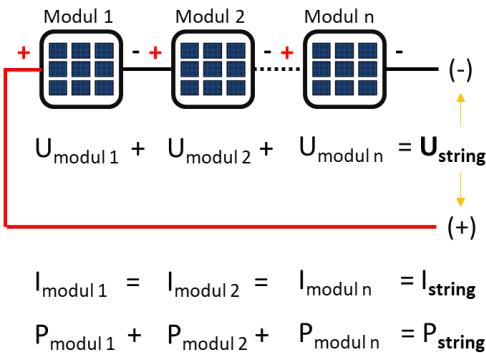


⌚ Apa yang harus dipertimbangkan ketika melakukan interkoneksi modul fotovoltaik?

- Jumlah panel yang terbentuk secara seri harus mempertimbangkan tegangan masukan maksimum dan minimum dari *solar charge controller* dan inverter jaringan.
- Semua komponen harus memiliki *rating* isolasi 1000 VDC atau setidaknya sebesar tegangan rangkaian terbuka maksimum di seluruh *string* modul fotovoltaik dalam kondisi apapun. Tegangan *string* modul fotovoltaik tidak boleh melebihi *rating* tegangan (1000 VDC) atau tegangan maksimum dari perangkat lainnya.
- *String* modul fotovoltaik harus terdiri dari modul fotovoltaik dengan karakteristik yang sama untuk menghindari penurunan daya.



Bagaimana cara menghubungkan modul fotovoltaik?



Gambar kerja konfigurasi rangkaian modul fotovoltaik secara lengkap harus tersedia di lokasi. Setiap kotak penggabung atau bahkan *string* harus diberi label dengan diberi nomor untuk memudahkan penelusuran.



Apakah yang dimaksud dengan sel fotovoltaik, modul fotovoltaik, string, dan larik modul fotovoltaik?



Sel	Modul fotovoltaik	String modul fotovoltaik	Larik modul fotovoltaik
Blok dasar yang umumnya memiliki tegangan keluaran sebesar 0,5 VDC.	Sekelompok sel fotovoltaik yang dihubungkan secara seri.	Beberapa modul fotovoltaik yang dihubungkan secara seri. Jumlah modul fotovoltaik tergantung pada <i>solar charge controller</i> dan inverter jaringan.	Seluruh kelompok modul fotovoltaik di dalam suatu sistem. Rangkaian modul fotovoltaik dapat berupa beberapa <i>string</i> modul fotovoltaik yang terhubung secara paralel.

■■■ Komposisi modul fotovoltaik di dalam rangkaian

Menggabungkan modul fotovoltaik dengan karakteristik yang berbeda di dalam suatu rangkaian tidak dianjurkan karena ketidakcocokan modul fotovoltaik akan mengurangi kinerja total suatu rangkaian. Perhatikan bahwa rangkaian harus terdiri dari modul fotovoltaik dengan spesifikasi yang mirip sebagai berikut: jenis sel (*monocrystalline*, *polycrystalline* atau *thin film*), daya nominal, tegangan operasi dan arus pada daya maksimum, tegangan pada rangkaian terbuka, dan arus hubung pendek.



- Rangkaian modul fotovoltaik dengan modul yang identik untuk memastikan kinerja yang sama.



- Campuran berbagai kualitas modul fotovoltaik di dalam rangkaian memungkinkan adanya perbedaan pada kinerja.



Rangkaian modul fotovoltaik harus berisi modul fotovoltaik yang identik dengan merek, jenis, dan karakteristik yang sama. Pada saat proses komisioning, diwajibkan untuk melakukan verifikasi kinerja dari setiap *string* modul fotovoltaik untuk keluaran yang diharapkan dan kesamaan antara tiap *string* modul fotovoltaik.

⌚ Mengapa suatu rangkaian harus terdiri dari modul fotovoltaik yang sejenis?

- Total arus dan tegangan di dalam rangkaian dibatasi oleh modul fotovoltaik yang terlemah. Jika di dalam suatu *string* modul fotovoltaik ada modul fotovoltaik dengan rating arus lebih rendah dari modul fotovoltaik yang lainnya, maka secara total arus akan turun ke besaran arus yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik yang terlemah ini. Untuk modul fotovoltaik yang terhubung secara paralel, tegangan akan sama dengan rating tegangan dari modul fotovoltaik yang terlemah.
- MPPT di *solar charge controller* dan inverter jaringan sulit untuk menemukan tegangan dan arus operasi yang paling optimal oleh karena adanya karakteristik yang berbeda.
- Tingkat penurunan daya dan degradasi performa yang berbeda di antara modul fotovoltaik.

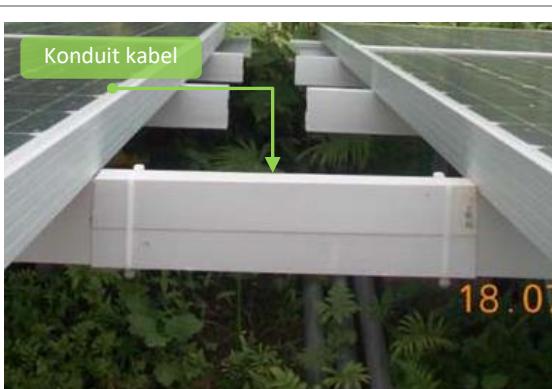
⌚ Apa yang bisa dilakukan ketika suatu modul fotovoltaik perlu diganti?



- Ganti modul fotovoltaik yang rusak di *string* modul fotovoltaik hanya dengan modul fotovoltaik dari merek, jenis, dan tingkat arus pada daya maksimum dan arus hubung pendek yang sama.

- Ganti modul fotovoltaik yang rusak di blok modul fotovoltaik hanya dengan modul fotovoltaik dari merek, jenis, serta tingkat tegangan pada daya maksimum dan sirkuit terbuka yang sama.

III Pemasangan kabel dan penopangnya



• Bagaimana cara meningkatkan kualitas instalasi diatas?



- Atur ulang rute kabel dan, jika perlu, kurangi panjang kabel untuk mengurangi rugi-rugi. Pastikan rugi-rugi pada kabel dari modul fotovoltaik ke rumah pembangkit tidak lebih besar dari 1%.
- Hindari kabel yang melingkar di antara fasa positif dan negatif. Fasa positif dan negatif dari kabel string modul fotovoltaik harus sedekat mungkin untuk menghindari tegangan induksi yang disebabkan oleh sambaran petir.
- Pemeriksaan rutin harus dilakukan untuk memeriksa kondisi kabel dan koneksinya. Kabel yang memperlihatkan tanda-tanda koneksi yang buruk, seperti insulasi yang meleleh atau terbakar dan rusak, harus diperbaiki atau diganti.



- Meskipun kabel yang digunakan mempunyai fitur tahan sinar UV dan air, akan lebih baik untuk memasang kabel di konduit kabel untuk membantu agar tahan terhadap gerakan mekanis ketika angin bertiup kencang.



- Kabel dipasang di dalam saluran kabel. Faktor turunnya daya (*derating*) harus dipertimbangkan.



- Kabel tidak terlindung di dalam saluran kabel. Ada risiko kerusakan insulasi karena tepian yang tajam.



Kerusakan insulasi dapat menyebabkan bahaya sengatan listrik dan juga kegagalan pembumian (*ground fault*).

⇒ Bagaimana cara melakukan pengaturan (*route*) kabel modul fotovoltaik?

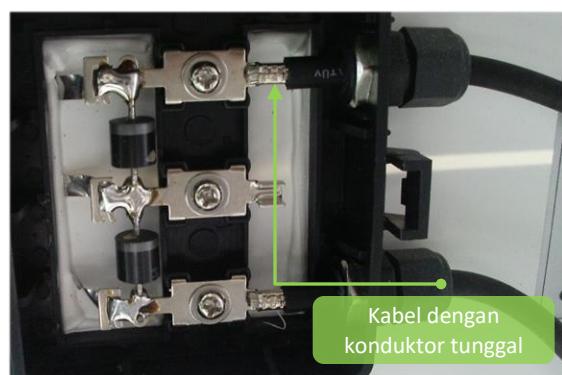
- Pasang modul fotovoltaik di dalam satu *string* dengan konfigurasi di mana bagian sisi atas modul fotovoltaik ditempatkan sejajar dengan sisi atas modul fotovoltaik lainnya.
- Gunakan kabel yang lebih panjang untuk menghubungkan baris bagian atas dan baris bagian bawah. Jalur yang panjang akan sedikit meningkatkan tegangan jatuh tetapi mengurangi risiko terhadap tegangan induksi.
- Pasang kabel sepanjang kotak *junction* modul fotovoltaik untuk mengurangi jarak antara kabel positif dan negatif (lihat contoh konfigurasi di halaman 2-18).



- Kabel dipasang di sepanjang kotak *junction* untuk menghindari loop kabel.



- Lingkaran kabel (*loop*) yang besar dapat sehingga meningkatkan risiko terjadinya tegangan induksi.



- Kabel inti tunggal dan ukuran yang tepat digunakan untuk interkoneksi antar modul fotovoltaik.



- Solusi kurang tepat dengan hanya menggunakan kabel tunggal dari kabel inti ganda.



Luas penampang dari kabel interkoneksi antar modul surya dalam satu *string* modul fotovoltaik tidak kurang dari 4 mm^2 . Hindari pembengkakan kabel yang ekstrem. Minimum radius pembengkakan (*bending radius*) tidak kurang dari empat kali diameter kabel ($\text{Radius} \geq 4D$).

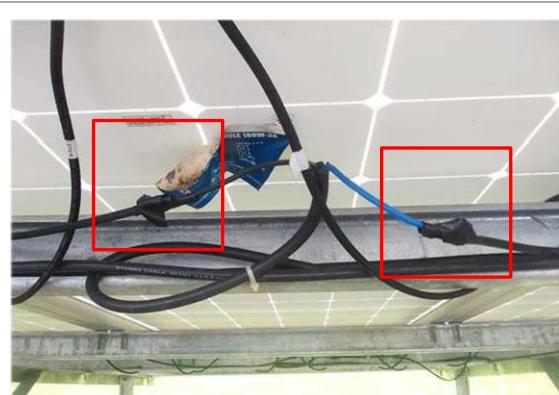
II.2 Interkoneksi kabel antara modul fotovoltaik

⌚ Apa yang harus dipertimbangkan ketika memilih konektor kabel modul fotovoltaik?

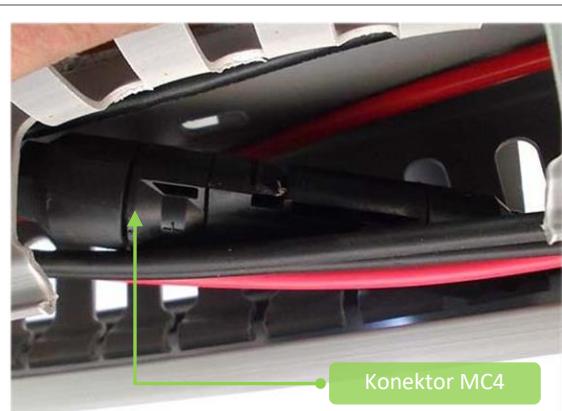
- Sangat dianjurkan untuk menggunakan konektor yang sudah dirakit terlebih dulu (*pre-assembled* atau *dedicated plug-in*) dari pabrikan modul fotovoltaik.
- Gunakan konektor dengan model dan jenis yang sama untuk menghindari ketidakcocokan dan koneksi yang buruk. Direkomendasikan untuk menggunakan konektor MC4 dengan hambatan maksimum 400Ω .
- Konektor harus memiliki rating tegangan maksimal sebesar 1000 VDC (atau lebih) dan nominal arus lebih tinggi dari arus hubung singkat string modul fotovoltaik.



- Pemasangan kabel yang rapi dengan instalasi permanen dari kotak penghubung (*junction box*).



- Penyambungan kabel yang buruk dan diisolasi dengan pita isolasi listrik yang tidak aman.



- Kabel inti tunggal dan konektor MC4 digunakan untuk interkoneksi modul fotovoltaik.



- Terminal sekrup dipasang tanpa perlindungan apapun. Terminal yang terbuka menyebabkan bahaya serius sengatan listrik serta gangguan listrik.

⚠️ Hindari menggunakan terminal jenis sekrup dan pita insulasi listrik yang tidak andal. Konektor berkualitas buruk dan tidak dilindungi serta peralatan yang di bawah standar rating dapat menyebabkan busur listrik, panas berlebih, bahaya sengatan listrik, dan risiko kebakaran.

⇒ Bagaimana cara untuk memperbaiki instalasi diatas?

- Karena tegangan pada keluaran modul fotovoltaik akan selalu ada pada siang hari, selalu gunakan sepasang sarung tangan terinsulasi ketika bekerja dengan konduktor hidup. Modul fotovoltaik individual dapat menghasilkan tegangan yang lebih besar dari 30 VDC hingga 1000 VDC yang sangat berbahaya.
- Selalu lepaskan *string* modul fotovoltaik dari beban sebelum menginterupsi sirkuit atau melepaskan modul fotovoltaik.



Jangan pernah memutuskan hubungan modul fotovoltaik yang sedang terhubung dengan beban. Melepaskan modul fotovoltaik yang sedang terhubung dengan beban dapat menyebabkan busur listrik.

- Pasang atau ganti terminal jenis sekrup dengan konektor MC4 atau terminal jenis *plug-in*. Pastikan bahwa konduktor telah terpasang dan terhubung dengan benar untuk menghindari kontak yang buruk. Kontak yang buruk akan meningkatkan hambatan dan dapat menimbulkan busur listrik.
- Gunakan ukuran konektor yang benar untuk kabel yang digunakan. Pemasangan kabel yang terlalu besar ukurannya akan menyebabkan masuknya air ke dalam koneksi internal.
- Jika konektor MC4 atau terminal *plug-in* tidak tersedia, terminal jenis sekrup yang memiliki tingkatan 1000 VDC dan dengan arus yang tepat dapat digunakan. Terminal harus dipasang di dalam suatu kotak pelindung (*enclosure*) dengan skun kabel yang sesuai dan terpasang dengan baik.

2.4. Struktur penopang dan pondasi rangkaian modul fotovoltaik

Pemilihan struktur penopang dan pondasi sangatlah penting untuk menentukan keandalan rangkaian modul fotovoltaik. Identifikasi lokasi yang tepat penting dilakukan ketika studi kelayakan untuk memperoleh informasi rinci mengenai jenis tanah, topografi tanah, luas lahan, kondisi iklim setempat, dan sudut kemiringan yang dibutuhkan. Struktur harus dirancang untuk dapat menopang modul fotovoltaik dan menyalurkan beban mekanis ke pondasi dengan baik.



Rangkaian modul fotovoltaik harus dipasang dengan sudut kemiringan dan sudut azimut⁶ yang tepat, jarak yang cukup antara rangkaian modul fotovoltaik dengan bangunan atau pohon yang lebih tinggi serta dengan pondasi yang sesuai.

Arah hadap rangkaian modul fotovoltaik



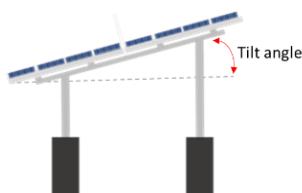
⁶ Sudut azimut adalah arah kompas dari arah datangnya sinar matahari.

Arah hadap modul fotovoltaik sangat menentukan jumlah keluaran yang cukup dari pembangkit listrik. Idealnya, arah hadap modul fotovoltaik harus diatur tegak lurus dengan sinar matahari untuk menerima radiasi secara langsung. Arah hadap harus ditetapkan dengan baik selama tahap desain dan konstruksi oleh karena modul fotovoltaik secara langsung terpengaruh oleh arah hadap pondasi dan struktur.



Apa yang harus dipertimbangkan ketika menentukan arah hadap rangkaian modul fotovoltaik?

- Sudut kemiringan



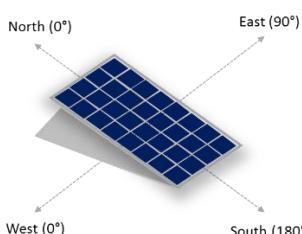
Sudut kemiringan dapat diukur dengan menggunakan klinometer atau busur derajat.

Sudut kemiringan atau sudut inklinasi ditentukan oleh garis lintang lokasi.

Di tempat yang terletak di dekat khatulistiwa seperti Indonesia, datangnya sinar matahari hampir tegak lurus. Oleh karena itu, sudut kemiringan 0° adalah sudut yang paling optimal untuk menangkap radiasi langsung⁷. Namun demikian, sudut 0° atau sudut yang relatif datar dapat menyebabkan genangan air atau penumpukan debu di permukaan panel. Oleh karena itu, dianjurkan untuk menempatkan modul fotovoltaik dengan sudut kemiringan minimal 10° untuk mendapatkan mekanisme pembersihan diri, terutama di saat hari hujan.

Di tempat dimana ketinggian matahari bervariasi sepanjang tahun, sudut optimal untuk mempertahankan kinerja tinggi ditentukan berdasarkan rata-rata ketinggian matahari di musim yang berbeda.

- Sudut azimut



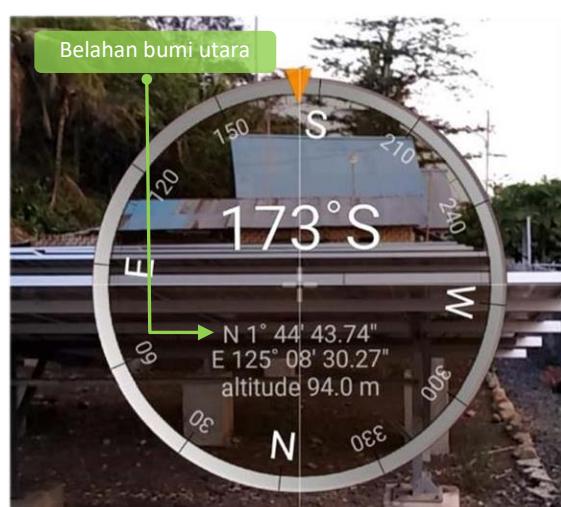
Sebuah kompas dapat digunakan untuk menentukan sudut azimut yang benar.

Sudut azimut juga dikenal sebagai arah datangnya sinar matahari. Modul fotovoltaik harus diatur arah hadapnya untuk menghadap khatulistiwa agar mendapatkan hasil energi yang optimal.

Karena azimut berbeda-beda menurut garis lintang dan waktu, di belahan bumi utara dimana garis lintang di atas 0° , arah hadap optimal modul fotovoltaik adalah 180° atau menghadap ke selatan. Di belahan bumi selatan atau di bawah garis khatulistiwa, modul fotovoltaik harus menghadap ke utara atau 0° . Arah hadap boleh menyimpang hingga 45° ke timur atau barat tanpa secara signifikan mengurangi energi yang dihasilkan.

Koordinat lokasi dapat ditentukan dengan menggunakan GPS (*General/Global Positioning System*) genggam. Setelah garis lintang diketahui, arah hadap rangkaian modul fotovoltaik dapat ditentukan.

⁷ Jumlah total radiasi dari sinar matahari yang mencapai permukaan tanah diwakili oleh nilai Radiasi Global Horizontal (GHI - *Global Horizontal Irradiance*). Nilainya meliputi nilai Radiasi Normal secara Langsung (DNI - *Direct Irradiance Normal*) yang datang secara langsung dari matahari dan Radiasi Horisontal Tersebar (DIF - *Diffuse Horizontal Irradiance*) yang merupakan radiasi yang telah tersebar oleh partikel di atmosfer.



Rangkaian modul fotovoltaik berada pada arah hadap yang baik. Modul terletak di belahan bumi utara dan menghadap ke selatan.



Lokasi terletak dibawah equator namun modul menghadap ke selatan. Sudut datang matahari⁸ >0° mengakibatkan berkurangnya radiasi yang diterima modul.

II. Pondasi rangkaian modul fotovoltaik

⦿ Bagaimana karakteristik pondasi rangkaian modul fotovoltaik yang direkomendasikan untuk dipakai di jaringan PLTS off-grid?

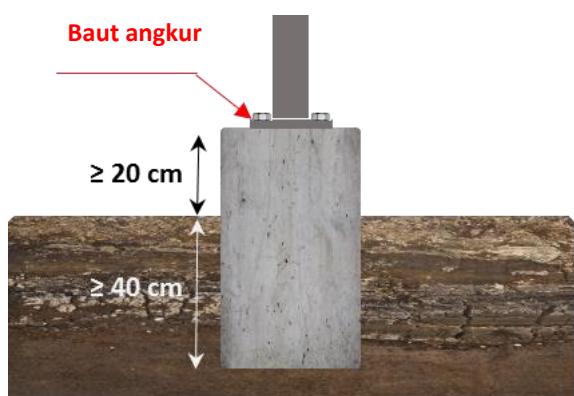
- Untuk lokasi dengan tanah yang stabil dan padat, seperti tanah berbatu atau berkerikil, gunakan pondasi beton sebagai pilihan. Beton harus dibangun dengan campuran yang baik dari semen, pasir, kerikil kasar, dan air. Campuran yang direkomendasikan memiliki perbandingan 1 bagian semen, 3 bagian kerikil kasar, dan 3 bagian pasir.
- Jika tanah tidak padat, seperti berawa atau tanah pertanian, penggunaan tiang pancang dapat memberi kestabilan yang lebih baik untuk pondasi, meskipun pondasi beton yang ditanam lebih dalam masih dapat digunakan.
- Menggunakan pondasi beton pracetak sebagai alternatif. Beton akan dicetak dalam lingkungan yang terkendali, mempercepat jadwal konstruksi, dan kualitasnya dapat dengan ketat dikontrol. Namun demikian, pengangkutan blok beton pracetak ke lokasi bisa menjadi masalah.
- Pembangunan pondasi harus mematuhi dimensi minimal 35 cm x 35 cm x 60 cm (panjang x lebar x tinggi). Jika ketinggian 60 cm yang digunakan, kedalaman pemasangan pondasi harus setidaknya 40 cm atau dua pertiga dari total tingginya (20 cm dari tingginya tetap terlihat).

⁸ Sudut datang adalah sudut antara kejadian radiasi sinar matahari dan normal-ke-permukaan-modul-fotovoltaik.

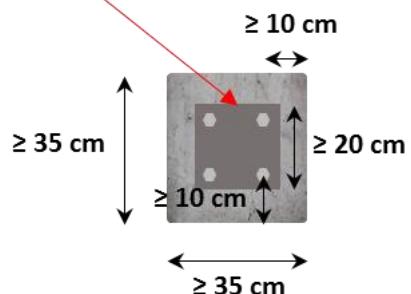


Bagaimana pondasi yang baik seharusnya dibuat?

Baut angkur



Pelat dasar

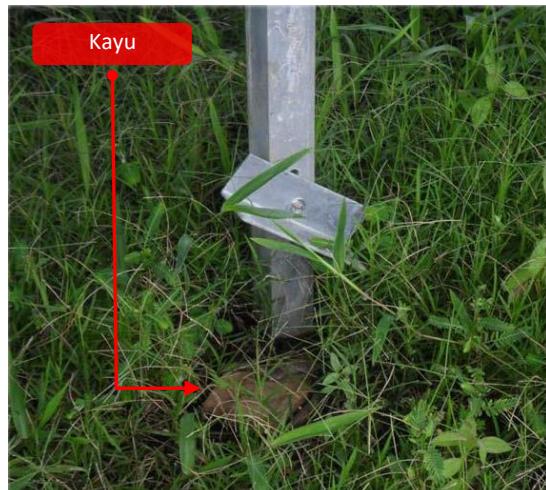


Pembuatan pondasi rangkaian modul fotovoltaik yang disarankan

- Baut angkur harus dimasukkan ke dalam pondasi dengan kedalaman ≥ 30 cm. Jarak antara baut angkur ke tepi dan sudut pondasi tidak boleh terlalu dekat dengan tepinya (≥ 10 cm).
- Pondasi harus diperkuat dengan kerangka baja 10 cm.
- Jangan menggunakan kayu sebagai pondasi karena bahan kayu dapat lapuk dan melemahkan struktur.



- Rangkaian modul fotovoltaik dipasang pada pondasi beton. Pondasi beton yang kokoh akan menjamin kestabilan struktur.



- Papan kayu yang tidak tertanam digunakan sebagai pondasi. Pergerakan kecil akan menyebabkan ketidakstabilan yang besar.



- Pondasi yang yang baik dengan beton plester dan kuat terpasang ke pelat dasar menggunakan baut angkur.



- Pondasi yang di bawah ukuran tidak mampu menahan beban mekanik yang tinggi.



- Instalasi pondasi beton yang sangat baik dengan ketinggian yang berbeda untuk menjaga modul fotovoltaik pada ketinggian yang sama.



- Pondasi rangkaian modul fotovoltaik yang retak dan pecah karena campuran beton yang buruk.

⇒ Bagaimana cara memperbaiki pondasi beton diatas?

- Bangun ulang pondasi dengan memperluas ukuran blok beton dan diikuti dengan meningkatkan jarak antara baut angkur dan tepi landasan.
- Bersihkan dan padatkan tanah di sekitar pondasi dan tutupi dengan campuran beton yang benar. Pelat dasar harus dipasang dengan benar di pondasi.

⇒ Apa yang dapat menyebabkan kerusakan pondasi?

- Campuran beton yang buruk atau struktur yang keropos karena penggunaan air yang berlebihan dan kurangnya kedalaman pondasi.
- Ukuran pondasi yang kurang besar dan jarak antara baut angkur dan tepi pondasi yang tidak mencukupi.

- Hilangnya baut angkur yang dapat menyebabkan getaran dan meningkatkan tekanan pada baut-baut lainnya.
- Celah antara pelat dasar dan pondasi yang menyebabkan struktur tidak stabil.



- Kualitas dan tinggi pondasi terlihat (*visible height*) yang baik.



- Ketinggian pondasi tidak mencukupi.
- Pelat dasar tidak terpasang dengan baik.



- Pelat dasar bidang fotovoltaik yang tidak sejajar dan tidak dikencangkan.
- Perlu dilakukan perhitungan dan pekerjaan konstruksi yang lebih baik.



- Pelat dasar terlalu dekat dengan sisi tertentu dari tepi pondasi dan tidak diikat dengan baik dengan baut angkur.

⇒ Bagaimana cara memperbaiki pondasi di atas?

- Kencangkan mur sampai pelat dasar terpasang erat di pondasi.
- Potong baut dan masukkan serta kencangkan baut angkur yang baru untuk memasangkan pelat dasar dengan aman.
- Pindahkan pondasi beton untuk menyelaraskan pelat dasar sehingga berada tepat di tengah-tengah blok.



- Pondasi yang kokoh dan struktur penopang yang terpasang dengan rapi diatas pondasi.



- Pondasi yang terkena erosi dapat menyebabkan masalah bagi seluruh struktur.



- Meskipun kualitas harus dijaga dari tahap awal, *grouting*⁹ adalah salah satu cara untuk mengisi celah.



- Baut angkur yang tidak dikencangkan dan berkarat. Baut harus galvanis *hot-dip* dan dikencangkan.

○ Bagaimana menjaga kualitas pondasi yang baik?



- Secara teratur periksa kondisi baut angkur. Baut harus terpasang erat dan bebas dari korosi. Harus menggunakan besi anti karat atau besi galvanis.
- Padatkan tanah sebelum membuat pondasi untuk menghindari struktur yang tidak stabil.
- Buatkan saluran air disekitar pondasi untuk menghindari penggerusan tanah pada pondasi.
- Selalu periksa kualitas beton dan lakukan tindakan pencegahan bila diperlukan. Tindakan preventif terdiri dari *grouting* atau menambal tanda-tanda keretakan, memperbesar ukuran pondasi.



⁹ *Grouting* adalah proses mengisi celah antar lempengan/ubin dengan semen

■■■ Tiang penopang

⇒ Bagaimana cara membangun tiang penopang untuk rangkaian modul fotovoltaik?

- Gunakan pipa baja atau baja berbentuk L untuk penopang modul fotovoltaik. Dimensi pipa baja harus memiliki diameter yang sama atau lebih besar dari 100 mm (≥ 4 inci) dan dengan ketebalan minimal 3 mm. Jika baja berbentuk L yang digunakan, ukurannya harus sama atau lebih besar dari 100 mm x 100 mm dan dengan ketebalan minimal 4 mm.
- Tiang penopang harus memiliki pelat dasar berbentuk persegi empat dan berdiri bebas di atas pondasi. Pelat dasar ini harus memiliki ketebalan minimal 8 mm dan dimensi 200 mm x 200 mm dan juga harus memiliki empat lubang di semua sudutnya dan dipasang dengan baut angkur ke pondasi.
- Pastikan bahwa tidak ada celah antara bagian bawah tiang (kaki) dan pondasi.
- Struktur penopang dan semua baut harus terbuat dari baja galvanis *hot-dip*.
- Ketinggian modul fotovoltaik harus dipertahankan pada ketinggian minimum 70 cm dari atas permukaan tanah agar terhindar dari debu tanah dan tumbuhan.



- Tiang penopang dan struktur modul fotovoltaik yang kuat dan kokoh dengan pengaturan kabel yang rapi.



- Pemasangan modul fotovoltaik yang kurang baik dengan sudut kemiringan yang tidak seragam.



- Tiang penopang galvanis baik untuk mencegah karat pada struktur penopang.



- Tiang penopang galvanis yang berkualitas buruk dengan baut yang hilang.



Semua baut pengikat harus dipasang dan diperiksa secara teratur. Tidak adanya baut dapat membahayakan konstruksi dan dapat menyebabkan struktur runtuh.



- Solusi asal-asalan dengan menggunakan potongan kayu untuk mengisi celah antara tiang dan penopang panel.



- *Cable ties* tidak boleh digunakan untuk pemasangan struktur. Gunakan baut berbentuk U sebagai gantinya.



- Pelat dasar digunakan di bagian bawah tiang sebagai angkur tiang ke pondasi untuk meningkatkan kestabilan.



- Pondasi yang retak mungkin karena tidak adanya pelat dasar. Struktur yang rapuh tidak bisa menahan beban.

⌚ Apa yang harus dipertimbangkan ketika membangun di daerah lereng?

- Tiang harus ditopang dengan penopang (*strut*¹⁰) tambahan untuk memastikan kemantapan struktur.
- Semua pondasi beton rangkaian modul fotovoltaik harus pada tingkat ketinggian yang sama. Pertahankan proporsi antara bagian yang terlihat dan yang tertanam dimana jika bagian pondasi yang terlihat nampak lebih tinggi, harus diikuti oleh pondasi yang lebih dalam.
- Strukturnya tidak boleh terlalu tinggi. Struktur yang sangat tinggi mendatangkan kesulitan di saat melakukan pemeliharaan pada modul fotovoltaik.



- Struktur pemasangan yang stabil dan kuat dengan beberapa penopang (*struts*).



- Pondasi yang miring dan baja penopang yang tidak mencukupi dapat membahayakan struktur.



- Jarak yang cukup antara modul fotovoltaik dengan permukaan tanah untuk memberikan ruang aliran angin.

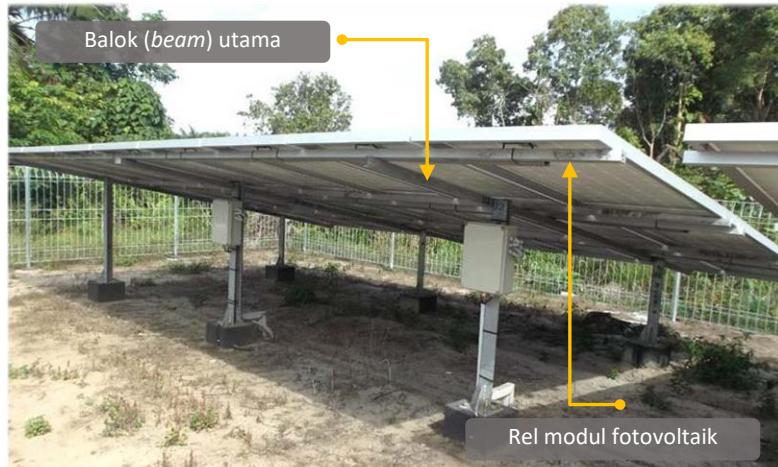


- Modul fotovoltaik yang jaraknya terlalu dekat ke tanah berisiko menumpuk debu dan pembayangan oleh tumbuhan.

¹⁰ *Strut* adalah potongan tipis panjang kayu atau logam yang digunakan sebagai penopang di suatu bangunan, kendaraan.

■■■ Penopang modul

Penopang modul digunakan untuk memasang modul fotovoltaik ke struktur penopang. Penopang modul harus kuat dan modul fotovoltaik harus dipasang dengan benar untuk mencegah kerusakan akibat tertipu angin kencang.



- Struktur penopang rangkaian modul fotovoltaik menggunakan metode rangka pemasangan untuk melekatkan modul fotovoltaik



- Konstruksi rangkaian modul fotovoltaik yang baik dan pemasangan balok utama dan rel panel yang kuat.



- Pemasangan rangkaian modul fotovoltaik sangat tidak stabil dan tidak rata.

⇒ Bagaimana cara memasang penopang modul fotovoltaik yang baik?

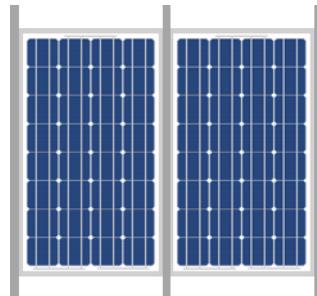
- Untuk mencegah korosi galvanik antara bingkai (frame) aluminium dan struktur pendukung, perlu dilakukan pemisahan menggunakan PVC atau ring pelat (washer) yang terbuat dari baja anti karat. Semua bahan harus dari bahan non-korosif seperti aluminium atau baja anti karat.
- Gunakan baja anti karat di tempat dengan kelembaban tinggi dan kandungan garam tinggi.
- Disarankan untuk memberi jarak antar rangka modul fotovoltaik minimum sebesar 20 mm untuk meningkatkan sirkulasi udara dan mengantisipasi pemuaian.



Bagaimana cara memasang modul fotovoltaik?

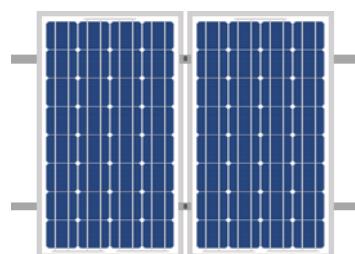
- **Sistem penyisipan**

- Modul fotovoltaik dipasang menyusur ke sisi dalam rel pemasang.
- Untuk melindungi permukaan rangka dari kerusakan, dapat mempergunakan pelindung rangka dari PVC di dalam rel.



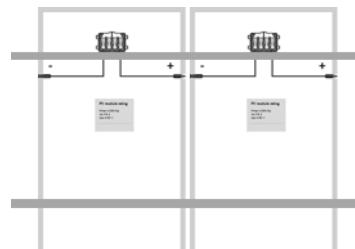
- **Klem tengah**

- Modul fotovoltaik dijepit oleh klem di kedua sisi.
- Klem dipasang pada struktur penopang sepanjang rangka modul fotovoltaik dan harus dalam posisi simetris.
- Tidak boleh diberi tekanan yang berlebihan untuk menghindari kerusakan/deformasi rangka yang akan segera membahayakan penutup kacanya.



- **Lubang pemasangan di rangka**

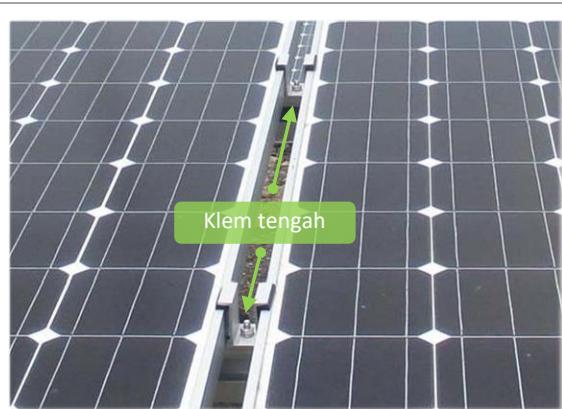
- Modul fotovoltaik dipasang secara langsung di struktur pemasangan.
- Modul fotovoltaik harus memiliki empat lubang pemasangan yang terlebih dahulu dibor di sepanjang sisi memanjang rangka dengan dua lubang pemasangan di setiap sisi.



- Modul fotovoltaik yang longgar karena baut-bautnya hilang. Angin kencang dapat mengangkat modul.



- Kabel ties digunakan untuk memasang rangka modul fotovoltaik.



- Klem dipasang dengan baik dan menjepit rangka. Klem tidak boleh membayangi sel.



- Klem tengah tidak memegang modul fotovoltaik dengan baik. Perlu menyesuaikan posisi modul.



- Modul fotovoltaik terpasang pada rel modul dengan menggunakan klem ujung di bagian akhir.



- Rel panel yang tidak cukup panjang. Rel harus diperpanjang atau diganti dan harus diberi klem ujung.

Bab 3: Kotak Penggabung

- ✓ *Fungsi utama kotak penggabung*
- ✓ *Komponen di dalam kotak penggabung*
- ✓ *Praktik-praktik terbaik untuk merancang dan memasang kotak penggabung*

3.1. Dasar-dasar kotak penggabung

Fungsi utama kotak penggabung atau (*combiner box*) adalah untuk menggabungkan *string* fotovoltaik modul agar mendapatkan arus keluaran laris fotovoltaik yang lebih tinggi. Masing-masing *String* modul fotovoltaik dihubungkan pada *busbar* yang sama dan dilindungi secara elektrik maupun mekanis di dalam selungkup pelindung (*enclosure*). Kotak penggabung umumnya berisi perangkat proteksi arus lebih (*overcurrent protection*) *string*, perangkat proteksi tegangan surja (*surge protection device*), *busbar* atau terminal tambahan, sakelar pemutus arus dan batang pembumian (*grounding bar*). Keluaran gabungan dari kotak penggabung tersebut kemudian dihubungkan langsung ke *solar charge controller* pada sistem *DC-coupling* atau ke inverter jaringan pada sistem *AC-coupling*.



Tergantung dari konfigurasi *string*, komponen di dalam kotak penggabung harus mampu beroperasi pada tegangan DC yang bisa mencapai 1000 VDC jika string yang tersambung memiliki sirkuit tegangan terbuka (*open circuit voltage*) hingga 1000 VDC. Sistem *AC-coupling* dengan inverter jaringan biasanya memiliki tegangan masukan lebih tinggi hingga 1000 VDC dibandingkan *solar charge controller* pada sistem *DC-coupling* yang berada pada kisaran 150 VDC. Meskipun sistem dengan tegangan lebih tinggi akan mengurangi rugi-rugi (*losses*) di sirkuit, sistem dengan tegangan rendah dapat menjadi pilihan terkait keselamatan operator dengan tegangan yang lebih rendah dan kurangnya ketersediaan komponen pendukung dengan tegangan hingga 1000 VDC.

■■■ Apa yang harus dipertimbangkan ketika merancang kotak penggabung?

- Selungkup pelindung (*enclosure*) diletakkan di luar ruangan sehingga harus tahan terhadap berbagai macam kondisi lingkungan, tahan terhadap sinar UV, dan memiliki *rating IP*¹ tinggi untuk menghindari masuknya air dan benda-benda kecil.
- Dirancang sesuai dengan IEC 60364-7-712 - “*Low voltage electrical installations – Requirements for special installations or locations – Solar photovoltaic (PV) power supply systems*”.
- Kondisi lingkungan dan rugi-rugi daya dari komponen mempengaruhi panas di dalam kotak penggabung. Temperatur di dalam kotak penggabung harus dijaga untuk mencegah panas berlebih dan penurunan rating komponen-komponen internal.
- Memastikan pemisahan konduktor positif dan negatif yang terbuka seperti *busbar* untuk mencegah hubungan arus pendek yang tidak disengaja atau busur listrik.
- Semua sambungan kabel harus dikencangkan dengan aman untuk mencegah bahaya kebakaran.



- Kotak penggabung yang terbuat dari bahan polikarbonat.



- Kotak penggabung berbahan dasar logam.

¹ Peringkat atau rating IP adalah singkatan dari *ingress protection* atau perlindungan terhadap kebocoran yang digunakan untuk menentukan tingkat efektivitas penyegelan (*sealing*) selungkup pelindung (*enclosure*) komponen-komponen listrik terhadap gangguan dari benda-benda asing (alat, kotoran, dll.) dan kelembaban.

3.2. Selungkup pelindung

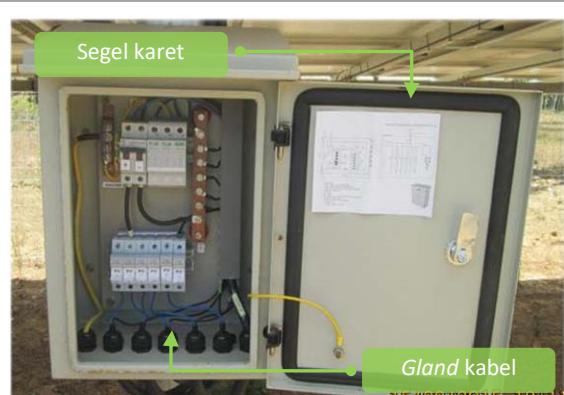
Kotak penggabung modul fotovoltaik diletakkan di luar ruangan dan mungkin terpapar berbagai kondisi lingkungan seperti kelembaban, debu, dan hujan. Oleh karena itu, dibutuhkan rating luar ruangan yang sesuai dan harus memiliki rating IP yang tinggi dan tahan sinar UV. Pertimbangan khusus juga harus diberikan pada pengaturan panas di dalam selungkup pelindung untuk meningkatkan umur pakai komponen-komponen di dalamnya.

⦿ Apa yang harus dipertimbangkan dari sebuah selungkup pelindung?

- Isolasi ganda atau rating proteksi kelas II. Jenis selungkup pelindung seperti ini tidak memerlukan sambungan tambahan ke pembumian karena adanya beberapa lapisan bahan isolasi antara komponen internal dan permukaan kotak.
- Polikarbonat, poliester, atau bahan logam yang dicat dapat dipakai sebagai kotak pelindung. Namun, dianjurkan untuk menggunakan bahan polikarbonat karena daya tahannya di berbagai kondisi lingkungan, tahan terhadap sinar UV, dan merupakan bahan isolasi.
- Sebagai tindakan pengamanan tambahan, kotak penggabung harus diberi label dan diamankan dari pihak yang tidak berwenang.
- Kotak penggabung harus berukuran sesuai dengan jumlah *string* modul fotovoltaik yang akan dihubungkan.

■■■ Kualitas selungkup pelindung

Selungkup pelindung harus memiliki kelas proteksi minimum IP 54 atau direkomendasikan IP 65 (terproteksi dari debu dan semburan air yang kuat). Untuk mencapai hal ini, pintu harus memiliki segel karet dan *gland* kabel pada bagian masuknya kabel.



- Segel karet di sekitar pintu dan *gland* kabel meningkatkan rating IP selungkup.



- Tidak adanya segel karet dan gland kabel akan memungkinkan air dan binatang masuk ke dalam selungkup.

⌚ Bagaimana cara memperbaiki instalasi diatas?

- Pasang segel karet di sekitar pintu dan tutup lubang besar di bagian dasar kotak.
- Atur ulang pemasangan kabel. Jika memungkinkan, hitung ulang ukuran kabel yang diperlukan sesuai kebutuhan arus, karena kabel yang terlalu besar ukurannya akan mengurangi kelenturannya.
- Buatlah lubang untuk *gland* kabel dan gunakan *gland* kabel yang sesuai dengan besarnya penampang kabel.



- Sarang serangga di dalam kotak penggabung karena tingkat perlindungan terhadap pengaruh luar (IP) yang kurang tinggi.



- Laba-laba di dalam kotak penggabung menandakan adanya celah pada kotak penggabung.

⌚ Bagaimana cara memastikan *rating IP* suatu selingkuh pelindung?



- *Rating IP* yang kurang baik ditunjukkan oleh masuknya air, tanda-tanda karat, dan binatang yang berada di dalam kotak penggabung. Pemeriksaan dan pembersihan secara rutin harus dilakukan sebagai perawatan pencegahan.
- Semua kabel yang masuk harus melewati *gland* kabel. *Gland* harus memiliki ukuran yang benar dan dikencangkan sesuai diameter luar kabel. Jangan menaruh beberapa kabel inti tunggal (*single core*) di dalam *gland* kabel tunggal.
- Tutuplah ventilasi udara di selungkup pelindung dengan segel karet untuk meningkatkan *rating IP*. Pada selungkup dengan rating IP tinggi (\geq IP 65), harus disediakan katup pembuangan atau pernapasan untuk mengurangi kondensasi atau pengembunan dalam kotak.
- Dianjurkan agar kotak penggabung sudah dirakit terlebih dahulu (*pre-assembled*) dan diuji di pabrik menurut IEC 61439 – “*Low-voltage switchgear and controlgear assemblies*”.
- Pada saat komisioning, periksa apakah kotak penggabung memiliki *rating* minimum IP 54. Jika informasi tertulis tidak tersedia, pastikan tidak ada lubang terbuka yang lebih besar dari 1 mm.





- Gland kabel terpasang dengan baik sesuai jumlah string.



Tidak diberi gland kabel

- Tidak terpasangnya gland kabel dapat merusak isolasi kabel karena tepi yang tajam.



- Kotak penggabung dicat dengan baik untuk perlindungan terhadap korosi.



- Korosi pada kotak akibat kualitas pelapisan kotak penggabung yang kurang baik.

➲ Bagaimana mencegah karat pada kotak penggabung?

- Sediakan penghalang antara bahan korosif dan kotak logam dengan cara melapisinya dengan cat atau spray anti karat.
- Pertimbangkan untuk menggunakan bahan baja anti karat jika kotak berjenis logam dipersyaratkan.
- Pelapisan kotak logam harus menggunakan proses galvanisasi dengan hot-dip galvanis atau penambahan lapisan aluminium.
- Gunakan kotak penggabung yang terbuat dari bahan anti karat seperti polikarbonat atau poliester.



Kotak penggabung harus aman untuk disentuh jika terjadi gangguan isolasi atau konduktor hidup bersentuhan dengan kotak. Hal ini dapat dicapai dengan menerapkan isolasi ganda atau dengan membumikan (*grounding*) kotak jika kotak terbuat dari bahan konduktif.



- Selungkup polikarbonat memiliki isolasi yang bagus jika terjadi gangguan kelistrikan. Pembumian tambahan tidak diperlukan.



- Selungkup berbahan dasar logam yang tidak disambungkan dengan pembumian membahayakan operator jika terjadi gangguan.

■■■ Pemasangan kotak penggabung

Kondisi lingkungan secara signifikan akan mempengaruhi temperatur lingkungan pada kotak penggabung sehingga menurunkan kinerja komponen listrik internalnya. Kotak penggabung harus dipasang di lokasi yang aman dan di bawah modul fotovoltaik untuk menjaga temperatur dalam kotak yang dikehendaki.



Paparan sinar matahari langsung harus dihindari karena dapat meningkatkan temperatur selungkup dan mempengaruhi kondisi kotak dalam jangka panjang.



- Kotak penggabung diletakkan di bawah modul fotovoltaik untuk menghindari paparan sinar matahari dan hujan secara langsung.



- Radiasi sinar matahari langsung akan meningkatkan temperatur kotak dan juga temperatur di dalam kotak.



- Posisi instalasi yang baik dari kotak penggabung. Berada di bawah modul fotovoltaik dan *gland* kabel ditempatkan di dasar kotak.



- Solusi asal-asalan dengan menutupi kotak dari paparan sinar matahari dengan menggunakan karton.

■■■ Bagaimana cara meningkatkan instalasi?

- Pindahkan dan pasang kotak penggabung di bawah modul fotovoltaik. Pastikan tidak ada sinar matahari yang mengenai secara langsung sepanjang hari.
- Atur ulang orientasi kotak sesuai dengan posisi yang telah ditentukan yang tertulis di dalam spesifikasi agar tidak mengurangi *rating IP*.
- Jika pemindahan tidak mungkin dilakukan, beri atap yang kokoh di atas kotak.



- Kotak penggabung dipasang dengan baik menggunakan pengencang yang sesuai.



- Instalasi yang kurang baik dan tidak stabil, kabel *ties* mungkin tidak dapat menahan beban.



Kabel *ties* seharusnya tidak boleh digunakan untuk memasang kotak penggabung. Kotak penggabung lebih baik dipasang pada struktur penopang dengan baut dan mur.



- Ruang dalam yang besar menghindari panas yang berlebih di dalam selungkup.

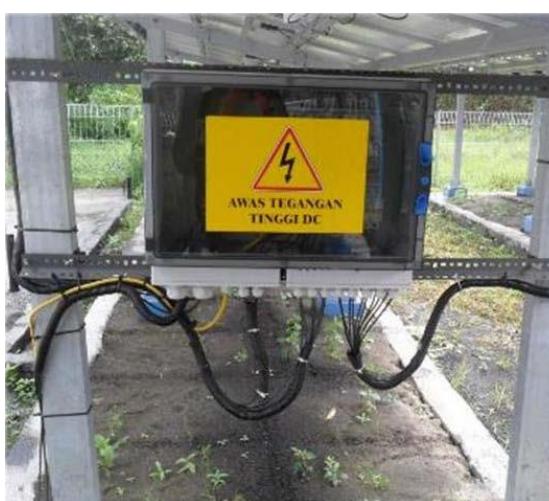


- Kotak penggabung yang sangat kecil, mengingat banyaknya komponen listrik yang terpasang.

⇒ Mengapa kotak penggabung tidak boleh terlalu kecil?

- Area yang luas di dalam kotak penggabung memberikan pendinginan yang lebih baik bagi komponen listrik di dalamnya.
- Memberikan ruang yang cukup untuk operator atau teknisi dalam melakukan perbaikan dan pemeliharaan. Kotak penggabung yang sangat kecil rentan terhadap kesalahan tak terduga.

■■■ Tanda peringatan dan label



- Kotak penggabung dilengkapi tanda peringatan bahaya akan sengatan listrik.



- Tidak ada tanda peringatan. Operator mungkin tidak sadar akan adanya tegangan yang berbahaya.



Pada siang hari, tegangan DC akan selalu ada pada *busbar* walaupun sakelar pemutus terbuka. Sangat dianjurkan untuk melakukan langkah-langkah pencegahan sebelum membuka selungkup seperti memberi peringatan akan tanda bahaya sengatan listrik.



- Kotak dilengkapi dengan kunci untuk mencegah akses dari orang yang tidak berwenang.



- Kotak penggabung tidak dilengkapi kunci dan bisa diakses oleh siapa saja dengan menggunakan obeng.

3.3. Komponen listrik di dalam kotak penggabung

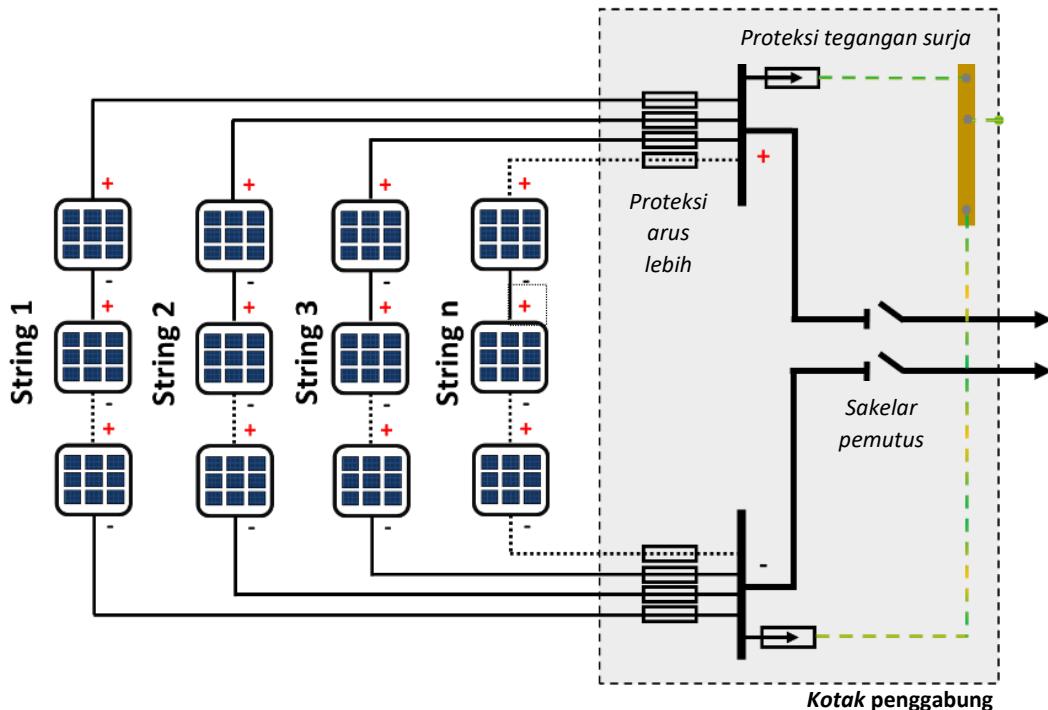
Komponen di dalam kotak penggabung terdiri dari perangkat proteksi arus lebih *string*, *busbar*, perangkat proteksi tegangan surja (*surge protection device*), sakelar pemutus, dan batang pembumian (*grounding bar*). Komponen listrik harus dipilih dan dipasang dengan benar untuk mendapatkan kinerja PLTS yang baik dan memberikan perlindungan pada PLTS.

⇒ Apa yang perlu dipertimbangkan saat memasang komponen?

- Semua komponen harus dari tipe yang diperuntukkan bagi arus DC dan mampu bekerja hingga pada tegangan maksimum dari *string* modul fotovoltaik.
- Pastikan konduktor penghantar arus ukurannya benar dan dilindungi dengan perangkat proteksi arus lebih untuk menghindari kenaikan temperatur kabel yang signifikan karena arus hubung singkat. Ukuran perangkat proteksi juga harus benar untuk menghindari perangkat tidak responsif atau *trip* secara tak terduga.
- Dianjurkan menggunakan perangkat proteksi yang dapat diatur ulang (*resettable*), misalnya DC MCB, dikarenakan terbatasnya suku cadang di daerah pedesaan.



Seperti apakah diagram listrik sebuah instalasi rangkaian modul fotovoltaik secara umum?



Gambar kelistrikan tersedia dan ditempel pada kotak penggabung untuk mempermudah mengidentifikasi komponen.



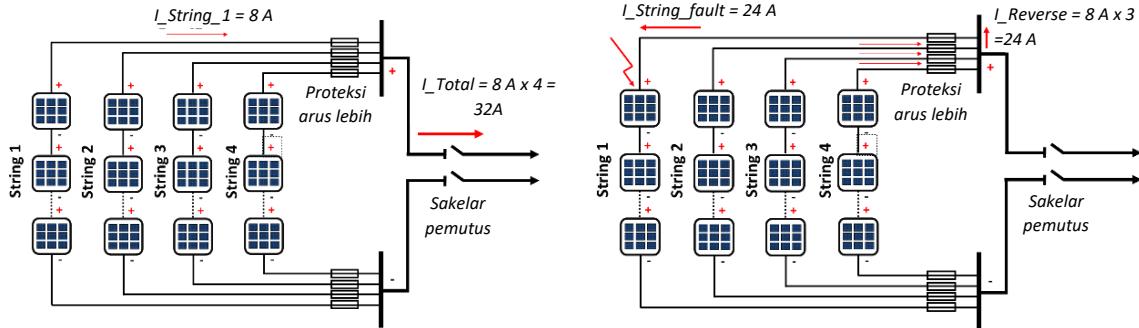
Instalasi tidak dilengkapi dengan gambar dan label. Hal ini dapat menyebabkan kesulitan dalam memahami instalasi.

■■■ Perangkat proteksi string

Setiap *string* modul fotovoltaik harus dilindungi dengan perangkat proteksi *string* jika kotak penggabung memiliki lebih dari dua *string* yang dihubungkan secara paralel. Perangkat proteksi ini akan melindungi kabel yang terhubung serta melindungi modul fotovoltaik dari arus berlebih dan arus balik (*reverse current*) pada *string* modul fotovoltaik. Perangkat ini akan memutus *string* yang mengalami gangguan dari rangkaian dan menjaga *string* lainnya untuk tetap beroperasi.



Mengapa perangkat proteksi *string* itu penting?



• Kondisi normal

Kondisi terjadi gangguan

Arus balik pada *string* modul fotovoltaik akan muncul jika terjadi kesalahan pengkabelan atau terjadi hubungan arus pendek (*kortsluiten*) pada modul fotovoltaik. Pada kondisi normal, arus di setiap *string* dijumlahkan dan masuk ke *solar charge controller*. Begitu terjadi gangguan pada *string*, tegangan *string* yang mengalami gangguan akan lebih rendah secara signifikan dibandingkan *string* yang sehat. Hal ini menyebabkan mengalirnya arus dari *string* yang sehat ke *string* yang mengalami gangguan.

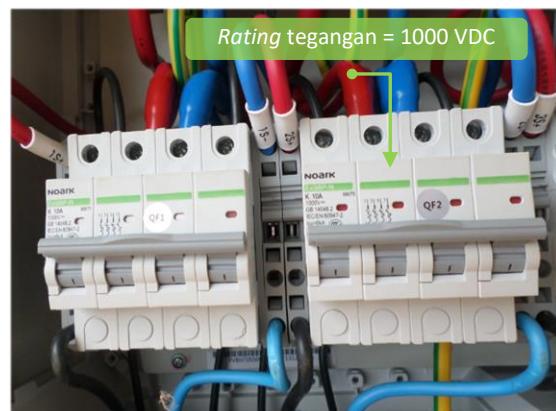
Sejumlah besar arus dari *string* yang sehat dapat meningkatkan temperatur modul fotovoltaik yang mengalami gangguan. Hal ini juga mungkin dapat menyebabkan kebakaran jika tidak dilengkapi dengan perangkat proteksi arus lebih.

■■■ Apa yang harus dipertimbangkan saat memilih perangkat proteksi arus lebih *string*?

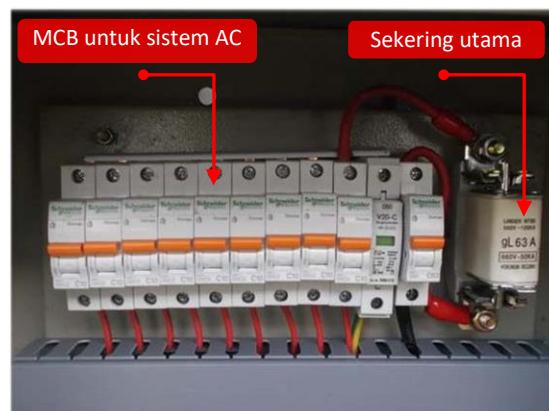
- Dianjurkan untuk menggunakan MCB daripada sekering. MCB lebih sensitif, mudah untuk mengidentifikasi gangguan, dapat diatur ulang, dan lebih aman.
- Jika memilih untuk memakai sekering, gunakan jenis sekering yang dirancang khusus untuk instalasi fotovoltaik.
- Kemampuan perangkat proteksi harus mempertimbangkan faktor penurunan kinerja (*derating*) pada temperatur ruangan yang tinggi. Perhitungan perangkat proteksi sebaiknya mempertimbangkan faktor penurunan kinerja (*derating*) pada temperatur sekitar 45°C.



Jangan pernah menggunakan pemutus sirkuit yang diperuntukkan bagi arus AC di rangkaian DC. Gunakan hanya pemutus arus yang telah terbukti kemampuannya dalam memutus arus (*switching*) DC.



MCB dengan jenis yang diperuntukkan bagi pemakaian pada tegangan DC .



MCB AC tidak seharusnya digunakan pada sistem DC.

⌚ Bagaimana cara memperbaiki instalasi di atas?

- Sekering utama atau sekering pada keluaran kotak penggabung tidak perlu dipasang karena kemungkinan sangat kecil untuk sekering terputus akibat arus lebih. Dianjurkan untuk melepas sekering utama dan menyambung kabel keluaran langsung ke MCB utama karena sekering tersebut akan berkontribusi pada rugi-rugi pada rangkaian yang tidak perlu.
- Ganti semua MCB yang berjenis AC dengan perangkat proteksi yang diperuntukkan bagi pemakaian pada tegangan DC.



Bagaimana sakelar pemutus rangkaian AC dan DC memadamkan busur listrik?

Fungsi sakelar adalah untuk memutus sirkuit dari/ke sumber daya, dalam hal ini rangkaian modul fotovoltaik dan beban. Selama terjadi pemutusan, kontak internal akan terlepas dan busur listrik akan terjadi saat arus melintas di celah udara. Pada periode waktu ini, busur listrik harus dipadamkan untuk menghentikan aliran arus yang melalui sirkuit. Karena karakteristik tegangan AC dan DC yang berbeda, sakelar AC dan DC memadamkan busur listrik dengan cara yang berbeda.

• Sakelar AC

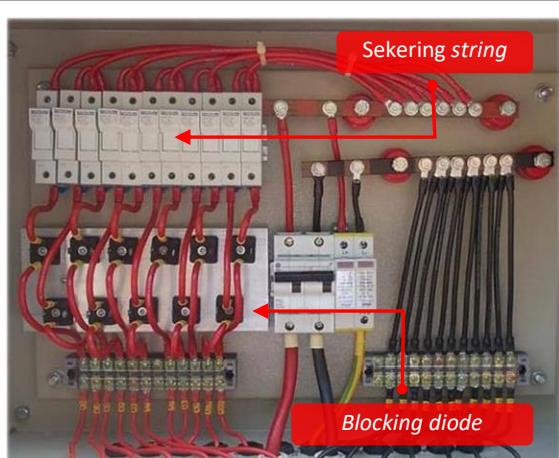
Di dalam rangkaian bertegangan AC, tegangan akan muncul 50 kali per detiknya secara bergantian antara tegangan $+V$ dan $-V$ dalam bentuk sinusoidal (untuk jaringan listrik dengan frekuensi 50 Hz). Karena ada titik di mana tegangan berada pada nilai 0 V, sekering akan memutus sambungan dan juga memadamkan busur listrik pada 0 V.

• Sakelar DC

Berbeda dengan rangkaian AC, rangkaian DC merupakan rangkaian dengan arus yang konstan dan tidak bolak-balik. Karena tidak ada 0 V, sakelar AC tidak akan bisa memutus arus sirkuit DC. Sakelar DC menggunakan magnet untuk menarik busur listrik dari celah udara dan memadamkannya. Karena itu, jangan pernah menggunakan sekering AC yang tidak dilengkapi magnet karena tidak dapat memadamkan busur listrik.



- Sekering dipasang baik di sisi positif maupun negatif. Sekering cadangan juga disediakan di dalam kotak penggabung.



- Sisi negatif (lihat kabel hitam) tidak dilindungi dengan perangkat proteksi apapun. Sekering dan *blocking diode* digunakan bersamaan.

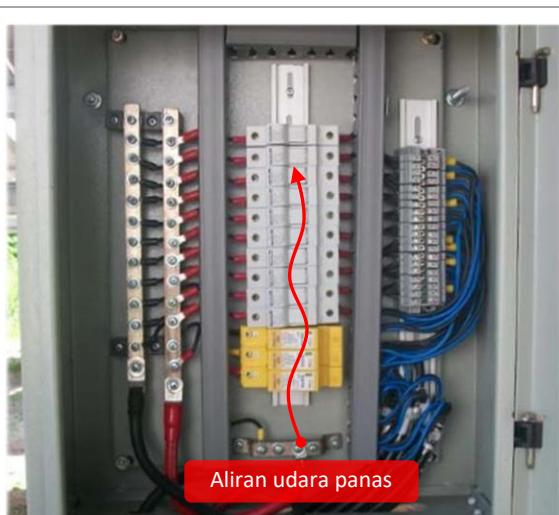
Penggunaan sekering untuk melindungi *string* fotovoltaik dari arus balik lebih direkomendasikan dibandingkan *blocking diode*. *Blocking diode* menyebabkan penurunan tegangan tambahan sekitar 0,5 V sampai 1 V yang menyebabkan rugi-rugi daya yang signifikan.

⇒ Mengapa perangkat proteksi *string* harus disediakan baik di sisi positif maupun negatif?

- Untuk melindungi kabel *string* jika terjadi gangguan pembumian ganda. Gangguan pembumian ganda terjadi saat sisi negatif dan positif menyentuh tanah pada saat yang bersamaan. Dalam kasus ini, gangguan jalur arus via pembumian akan masih ada jika perangkat proteksi tidak tersedia.
- Memberikan isolasi di dalam rangkaian pada sisi positif dan negatif.



- Sekering dipasang secara horizontal dengan jarak antar sekering yang mencukupi.



- Sekering yang dipasang secara vertikal dapat menyebabkan putusnya sekering secara tak terduga akibat akumulasi udara panas.



Pertimbangkan temperatur ruangan, rugi-rugi daya, dan temperatur ideal komponen saat merancang tata letak instalasi.

⦿ **Bagaimana cara memastikan pengoperasian perangkat proteksi yang tepat?**



- Gunakan perangkat proteksi dengan ukuran yang tepat.
- Lakukan pemeriksaan secara teratur untuk memantau kondisi sekering. Sekering yang terbakar atau MCB yang jatuh (*trip*) harus segera diselidiki.
- Gangguan kelistrikan harus ditemukan dan diatasi sebelum menghidupkan kembali MCB atau mengganti sekering.
- Tempat sekering tidak boleh dibiarkan kosong. Masukkan sekering kosong (*dummy*) untuk menghindari celah percikan.
- Sediakan sekering cadangan sebesar minimal 20% dari jumlah sekering yang terpasang dengan ukuran dan nilai yang sama di dalam kotak.

⦿ **Tindakan pengamanan apa yang harus dipertimbangkan sebelum melakukan pemeriksaan?**

- Modul fotovoltaik selalu menghasilkan listrik saat terpapar sinar matahari. Lebih tidak berbahaya jika pemeriksaan dilakukan saat malam hari atau sedang mendung.
- Pastikan bahwa selungkup sudah tersambung pembumian atau memiliki isolasi yang baik.
- Selalu kenakan sarung tangan karet terisolasi dengan minimum kelas “0”.
- Buka sakelar pemutus untuk memutus beban.



Bagaimana cara menentukan ukuran perangkat proteksi atas lebih *string*?

1. Periksa spesifikasi dari modul fotovoltaik yang akan digunakan

Arus hubung pendek $[I_{SC}] = 8A$
Tegangan rangkaian terbuka $[U_{OC}] = 25 V$

2. Hitung minimum nilai tegangan operasi dari perangkat proteksi berdasarkan jumlah modul yang dihubungkan secara seri.

Jumlah modul dalam satu string = 10 modul

Min. nilai tegangan operasi = $1,2 \times U_{OC} \times n_{modul}$

$1,2 \times 25 V \times 10$ modul

300 VDC

3. Hitung arus nominal dari perangkat proteksi arus lebih

Min. nilai tegangan operasi = $1,2 \times I_{SC}$

$1,25 \times 8 A$

10A



Hindari membuka tempat sekering atau melepas kabel pada terminal selama unit beroperasi atau terhubung dengan beban karena dapat menimbulkan busur listrik.

Terminal busbar



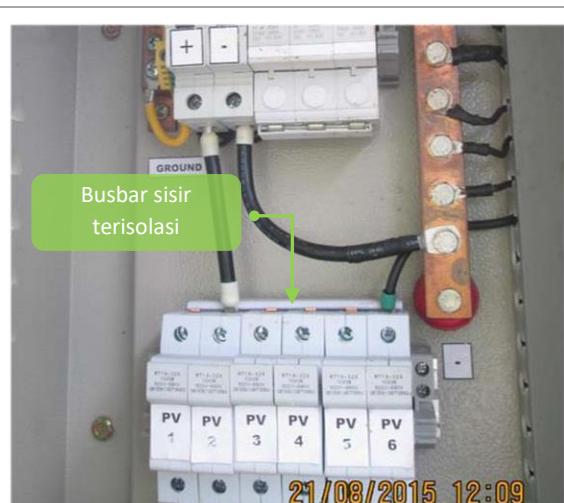
Busbar positif dan negatif dipisahkan dengan kabel tray.



Jarak yang tidak mencukupi antara busbar positif dan negatif.

• Bagaimana cara memasang busbar positif dan negatif dengan aman?

- Jaga jarak yang cukup antara busbar positif dan negatif. Dianjurkan untuk memasang sambungan dari kutub yang berbeda pada sisi yang berbeda.
- Pastikan tidak ada kontak antara konduktor kabel dan busbar untuk menghindari kerusakan pada isolasi kabel yang rawan terhadap terhadap hubungan arus pendek (korsleting).
- Jika penataan ulang tidak memungkinkan, pasang pemisah non-konduktif antara busbar positif dan negatif.
- Selongsong isolasi (*insulation tube*) harus dipasang di permukaan busbar untuk mengurangi risiko mengalami hubungan arus pendek serta mengurangi jarak di antara keduanya.



Busbar sisir (comb busbar) terisolasi dengan bahan isolasi untuk menghindari hubungan arus pendek yang tidak disengaja.



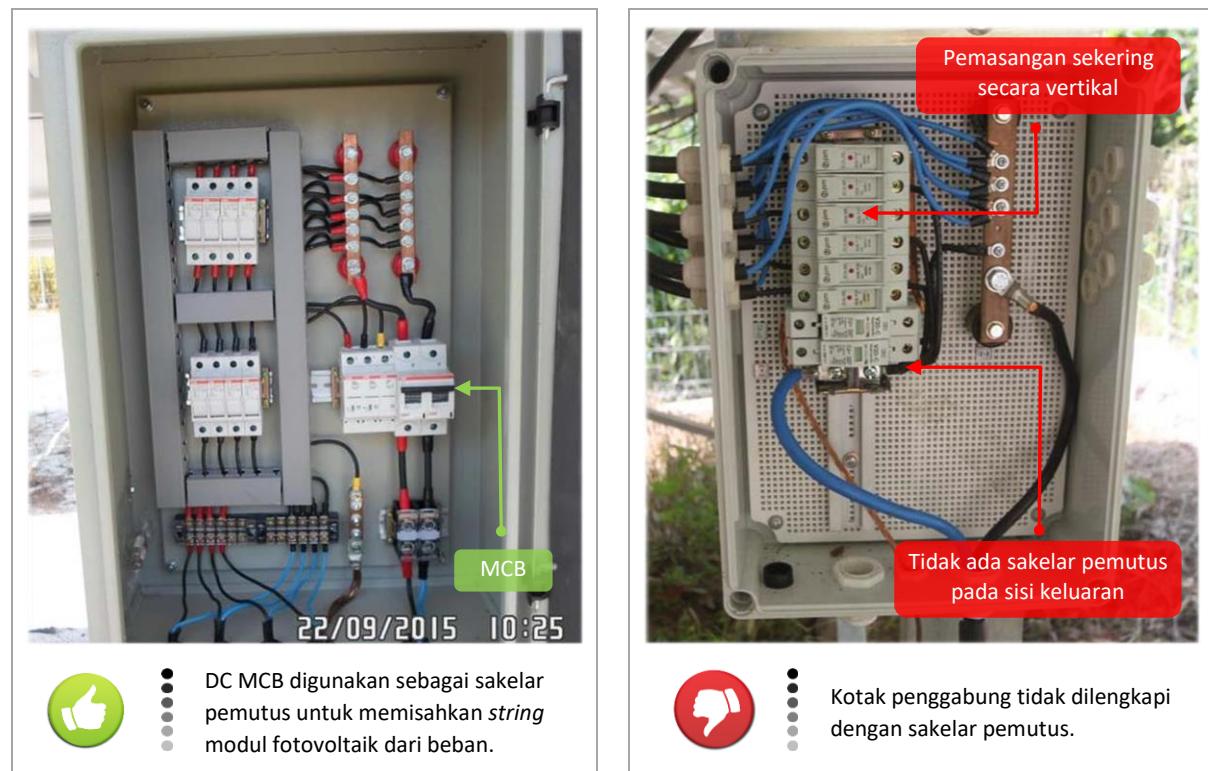
Busbar yang tidak diisolasi dan berdekatan berisiko lebih besar terjadi hubungan arus pendek.

■■■ Sakelar pemutus (disconnector switch)

Memutus rangkaian DC pada tegangan yang relatif tinggi dapat menyebabkan busur listrik dan mungkin menyebabkan bahaya kebakaran. Sakelar harus dipasang pada keluaran kotak penggabung untuk dapat memutus hubungan atau memisahkan lari fotovoltaik dan beban dengan aman. Sakelar ini akan memastikan tidak adanya arus dan tegangan yang mengalir ketika melakukan perbaikan dan pemeliharaan pada kotak penggabung, kabel ke rumah pembangkit, SCC atau inverter jaringan.

➲ Apa yang harus diperhatikan saat memasang sakelar pemutus?

- *Rating* arus harus 1,25 kali lebih tinggi dari arus total *string* modul fotovoltaik yang terhubung. Sebagai contoh, jika lima *string* modul fotovoltaik dengan arus sirkuit pendek sebesar 8 A terhubung ke kotak penggabung, maka sakelar pemutus yang digunakan harus yang memiliki rating 50 A (dari perhitungan: $8 \text{ A} \times 5 \text{ string} \times 1,25 = 50 \text{ A}$).
- Sakelar harus yang diperuntukkan bagi tegangan DC dan nilainya sesuai dengan tegangan maksimum sirkuit terbuka dari rangkaian modul fotovoltaik. Jika tegangan mencapai 1000 VDC, empat kutub (*pole*) MCB diperlukan untuk memutus rangkaian.
- Sakelar pemutus harus memungkinkan dilakukannya pemutusan hubungan yang aman. Sebelum melakukan perawatan, sakelar pemutus harus mudah diakses oleh operator atau teknisi.





- MCB DC berkutub ganda dengan rating 800 VDC digunakan untuk memutus dan mengisolasi sirkuit.

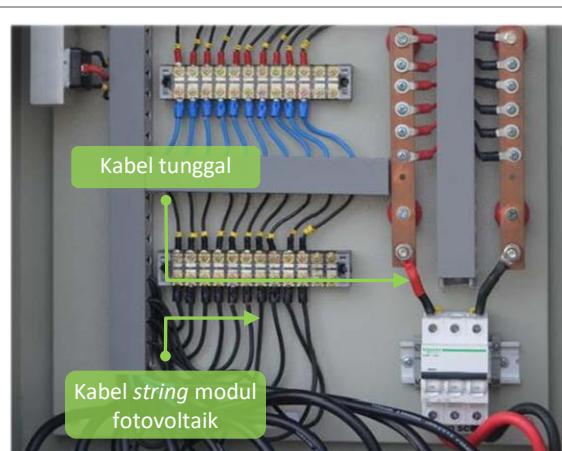


- MCB AC berkutub tunggal digunakan untuk memutus rangkaian DC.

⦿ Bagaimana cara memperbaiki instalasi diatas?

- Pasang sakelar pemutus berkutub ganda (*double-pole*) pada sisi keluaran untuk memutus rangkaian modul fotovoltaik selama perbaikan dan perawatan dilakukan.
- Jika sakelar pemutus DC tidak tersedia, MCB DC berkutub ganda dengan rating tegangan dan arus yang benar dapat digunakan.
- Atur ulang pemasangan sekering menjadi konfigurasi horisontal untuk menghindari putusnya sekering bagian atas yang tidak diinginkan. Kabel harus masuk ke dalam kotak penggabung secara vertikal dari bawah.

■■■ Pemasangan kabel



- Penggunaan ukuran konduktor inti tunggal dengan kuat hantar arus sesuai dengan arus larik modul fotovoltaik.



- Kabel inti ganda dihubungkan secara paralel untuk meningkatkan kapasitas kabel. Kabel tidak dilengkapi kabel skun.



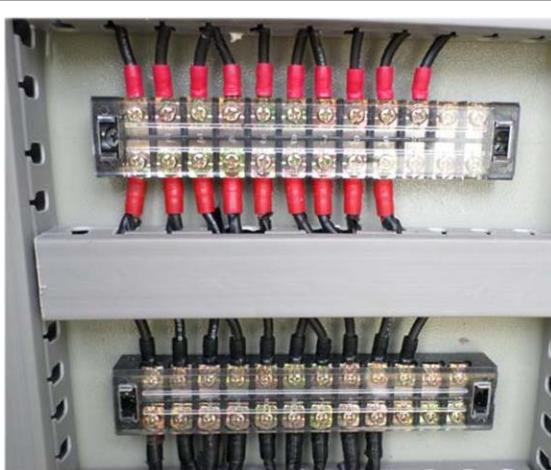
- *Crimping* kabel yang buruk dapat membahayakan keselamatan operator dan dapat menyebabkan *ground fault*².



- Tanda terbakar di terminal MCB yang mungkin disebabkan oleh sambungan kabel yang longgar.



Kabel harus diterminasi³ dengan dan dikencangkan dengan benar. *Crimping*⁴ dan sambungan yang buruk dapat menyebabkan peningkatan panas akibat koneksi hambatan tinggi (*high-resistance connection*) dan kemungkinan risiko kebakaran.



- Kabel dilengkapi dengan sepatu kabel dan sekrup dikencangkan sebagaimana mestinya.



- Terminal sekrup yang meleleh. Kuat hantar arus termina tidak dirancang untuk menangani arus *string*.

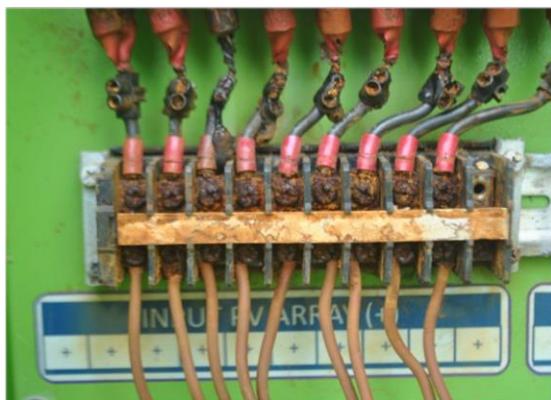
² *Ground fault* adalah gangguan hubungan arus pendek antara konduktor hidup ke pembumian.

³ Terminasi adalah proses pemasangan konektor atau kabel skun pada sebuah kabel.

⁴ *Crimping* adalah proses pemasangan konektor ke kabel dengan cara dijepit dan/atau disolder.

⌚ Bagaimana cara menghindari pemasangan kabel yang buruk?

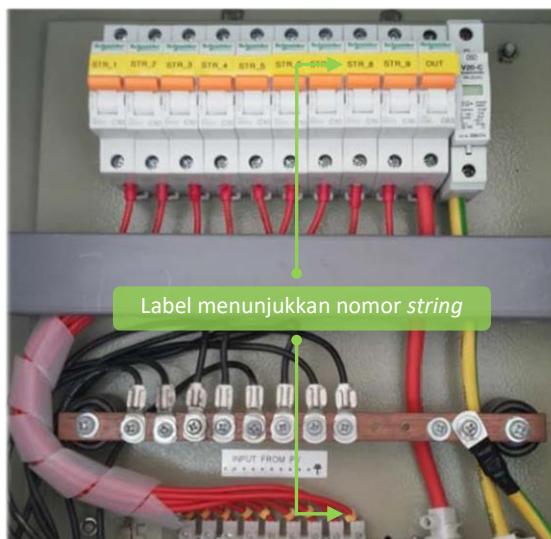
- Semua kabel harus diterminasi dengan menggunakan jenis dan ukuran sepatu kabel yang benar. Pastikan kekuatan *crimping* dengan sedikit menarik kabelnya. Dan pastikan semua sekrup dan baut terpasang dengan kencang.
- Pemeriksaan harus dilakukan secara teratur. Gunakan kamera inframerah untuk mengidentifikasi sambungan yang longgar. Sambungan yang buruk bisa ditunjukkan dengan titik yang lebih hangat. Koneksi direkomendasikan tidak lebih dari 50°C.
- Dianjurkan untuk menggunakan komponen yang sudah terlebih dahulu dirakit (*pre-assembled*) dan diuji untuk menghindari kesalahan yang tidak perlu saat melakukan perakitan di lokasi. Jaminan kualitas, misalnya uji kontinuitas, juga dapat dilakukan di pabrik untuk memastikan sambungan yang tepat dan temperatur lingkungan yang ideal.
- Hindari penggunaan terminal kabel yang berlebihan. Terminal sekrup tambahan akan menambah sumber masalah baru serta memberi hambatan tambahan.



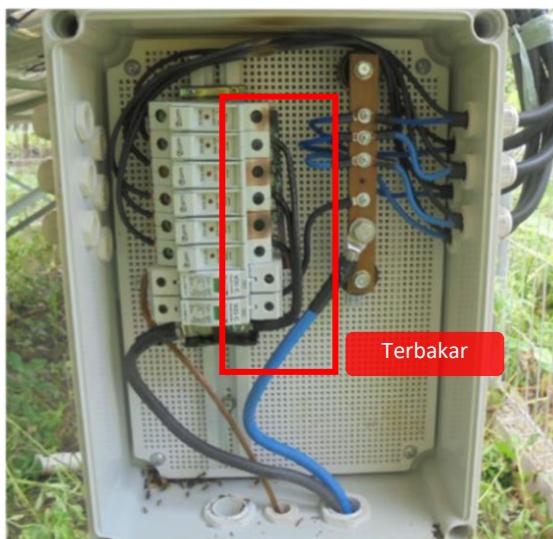
Terminal yang berkarat pada lokasi dengan kelembapan udara tinggi.



Korosi dapat menaikkan nilai hambatan terminal.



MCB dan kabel diberi label dan diberi kode warna dengan benar.



Komponen tidak berlabel dan warna kabel tidak sesuai standar.

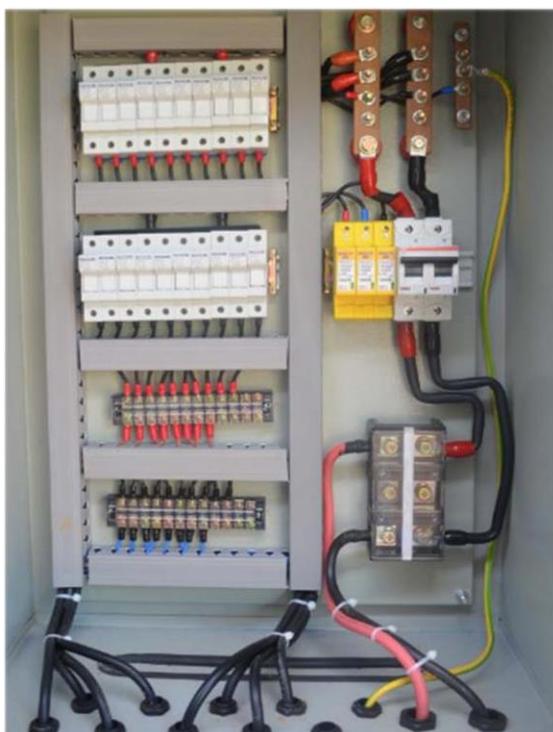


Dianjurkan untuk memberi label pada semua komponen, menggunakan warna kabel yang sesuai, dan menempelkan gambar diagram rangkaian di pintu kotak penggabung agar mempermudah operator atau teknisi saat melakukan pemeliharaan atau perbaikan.



Warna isolasi kabel seperti apa yang harus digunakan?

Merah	DC Positif
Hitam	DC Negatif
Hijau / kuning	Pembumian



- Kabel tersambung dengan rapi dan dipasang di dalam kabel tray.



- Kabel tidak dipasang di dalam kabel tray dan tidak memikirkan minimum radius penekukan kabel.



Kabel harus diatur rapi dan tidak terlalu panjang. Kabel yang sangat panjang akan menyebabkan tegangan jatuh yang tidak perlu. Pastikan tegangan jatuh dari string module fotovoltaik ke rumah pembangkit tidak lebih dari 1%.

Bab 4:

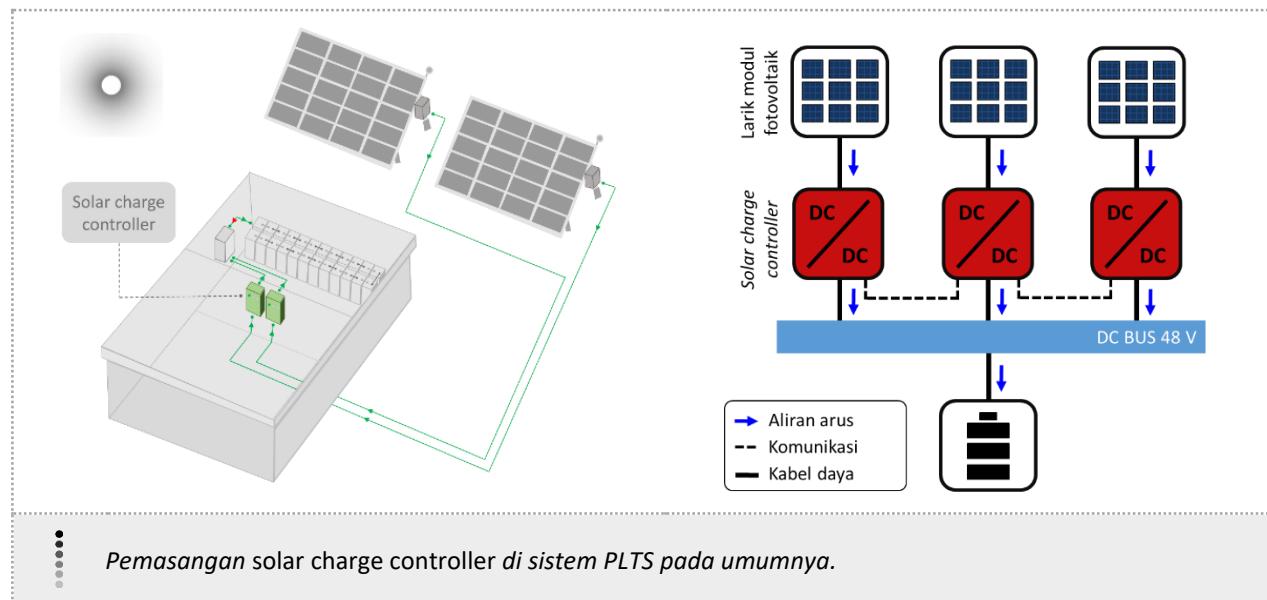
Solar Charge Controller

- ✓ Apa yang dimaksud dengan solar charge controller?
- ✓ Contoh instalasi solar charge controller yang baik dan kurang baik
- ✓ Hal yang harus dipertimbangkan ketika mengatur parameter



4.1. Dasar-dasar solar charge controller

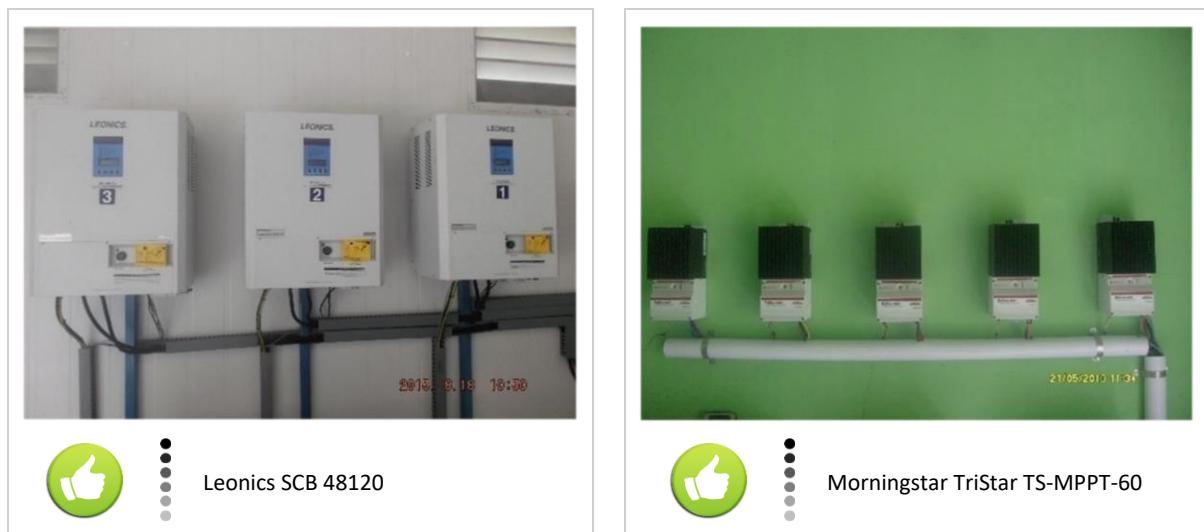
Solar charge controller (SCC) atau juga dikenal sebagai *battery charge regulator* (BCR) adalah komponen elektronik daya di PLTS untuk mengatur pengisian baterai dengan menggunakan modul fotovoltaik menjadi lebih optimal. Perangkat ini beroperasi dengan cara mengatur tegangan dan arus pengisian berdasarkan daya yang tersedia dari larik modul fotovoltaik dan status pengisian baterai (*SoC, state of charge*). Untuk mencapai arus pengisian yang lebih tinggi, beberapa SCC dapat dipasang secara paralel di bank baterai yang sama dan menggabungkan daya dari larik modul fotovoltaik.



● Apa saja fungsi *solar charge controller*?

- Mengubah arus DC bertegangan tinggi dari larik modul fotovoltaik ke tegangan yang lebih rendah baterai (tegangan sistem 48 VDC).
- Melindungi bank baterai dari pengisian yang berlebih dengan mengurangi arus pengisian dari larik modul fotovoltaik di saat baterai sudah penuh. Tergantung pada teknologi baterai, pengisian baterai yang berlebihan (*overcharge*) dapat menyebabkan timbulnya gas dan ledakan.
- Memaksimalkan transfer daya dari larik modul fotovoltaik ke baterai dengan menggunakan algoritma *maximum power point tracker* (MPPT¹).
- Memblokir arus balik dari bank baterai di saat radiasi sinar matahari tidak mencukupi atau di malam hari.
- Mengukur dan memonitor tegangan, arus, dan energi yang ditangkap dari larik modul fotovoltaik dan mengirimkannya ke bank baterai.

¹ *Maximum power point tracker* (pelacak titik daya maksimum) adalah algoritma atau teknik yang digunakan oleh *solar charge controller* atau inverter jaringan untuk melacak dan mendapatkan daya maksimum dari larik modul fotovoltaik dalam kondisi tertentu



■■■ Spesifikasi solar charge controller

Memilih tipe dan desain SCC yang tepat merupakan hal penting untuk menjaga efisiensi PLTS dan umur pakai dari baterai. Spesifikasi SCC ditentukan berdasarkan konfigurasi larik modul fotovoltaik, sistem tegangan yang dipakai, dan karakteristik baterai. Oleh karena itu, penting untuk memahami spesifikasi SCC agar tidak menyebabkan kerusakan pada komponen SCC maupun baterai. Tabel di bawah ini menjelaskan istilah umum yang digunakan di dalam spesifikasi.

Max. open circuit voltage [V]	Tegangan DC maksimum dari larik modul fotovoltaik pada tegangan larik terbuka (U_{oc})
MPP or operating range [V]	Rentang tegangan untuk pelacak titik daya maksimum (MPPT)
Max. input current [A]	Arus DC masukan maksimum dari larik modul fotovoltaik pada arus hubungan arus pendek (I_{sc})
Output voltage [V]	Tegangan keluaran atau tegangan nominal baterai
Max. battery charging current [A]	Arus keluaran untuk pengisian baterai (<i>charging current</i>)



- Label yang tertempel pada SCC menunjukkan karakteristik kelistrikan SCC yang terpasang. Informasi yang tertera pada label bermanfaat untuk mengidentifikasi tipe dan spesifikasinya, terutama di saat melakukan pemeriksaan atau pemeliharaan.



Seperti apa spesifikasi solar charge controller yang ideal?

- Tegangan dan arus masukan (input) maksimum SCC harus lebih tinggi dari tegangan dan arus maksimum larik modul fotovoltaik yang terhubung pada kondisi apapun**, dengan mempertimbangkan juga koefisien temperatur modul fotovoltaik. Temperatur modul yang kurang dari 25°C akan menaikkan tegangan keluaran modul, sementara temperatur yang lebih tinggi akan menaikkan arus keluarannya. Batas aman (*safety margin*) sebesar 1,25 untuk arus dan tegangan masukan harus dipertimbangkan.

Tegangan masukan maksimum SCC $> 1,25 \times U_{oc}$ larik modul fotovoltaik

Arus masukan maksimum SCC $> 1,25 \times I_{sc}$ larik modul fotovoltaik

- Efisiensi yang tinggi ($\geq 98\%$) pada tegangan sistem dan dilengkapi dengan MPPT.**
- Dilengkapi dengan sistem proteksi berikut ini:
 - Proteksi polaritas terbalik di sisi masukan (input reverse polarity)**, bila secara tidak sengaja salah menghubungkan kabelnya.
 - Proteksi tegangan tinggi baterai (high voltage disconnect)**, yang secara otomatis menghentikan proses pengisian di saat tegangan baterai telah mencapai batas yang ditentukan untuk menghindari pengisian baterai yang berlebihan.
 - Proteksi arus lebih (overcurrent)**, perangkat ini harus memiliki rating paling sedikit 125% dari arus hubungan arus pendek larik modul fotovoltaik.
 - Proteksi ground fault**, untuk melindungi kabel ketika konduktor modul fotovoltaik bersentuhan dengan sistem pembumian (*grounding*).
 - Proteksi tegangan berlebih (overvoltage)**, dipasang di sisi masukan larik modul fotovoltaik.

- f. **Pengisian (charging) baterai dengan kompensasi temperatur** adalah kemampuan SCC dalam mengendalikan tegangan pengisian berdasarkan temperatur baterai.
- **Sesuai dengan teknologi baterai yang terpasang** (misalnya *lead-acid*, *lithium-ion*, *zinc-air*, dll.). Setiap baterai memiliki karakteristik yang berbeda, oleh karena itu perlu konfigurasi yang tepat, terutama di saat merancang dan memasang sistem. Arus keluaran nominal SCC seharusnya tidak lebih tinggi dari arus pengisian yang diperbolehkan baterai yang digunakan. Batas pemutusan (*cut-off limit*) atau nilai ambang pemutusan tegangan-tinggi dari baterai harus dikonfigurasi secara berbeda untuk setiap teknologi baterai yang berbeda.

Arus pengisian maksimum SCC $\leq I_{10}^{*}$ rating baterai (*lead-acid*)

Tegangan pada tahap *bulk* dan *absorption* \leq tegangan maksimum baterai

*) *C-rate* adalah nilai yang menentukan durasi baterai untuk diisi atau dipakai pada kapasitas penuh. *Charging* atau *discharging rate* atau I_{10} berarti arus yang diperlukan untuk membuat baterai penuh dan habis terpakai waktu 10 jam, misalnya I_{10} dari baterai 1000 Ah adalah 100 A. Baterai lithium-ion dapat digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan arus yang lebih tinggi hingga 1C.

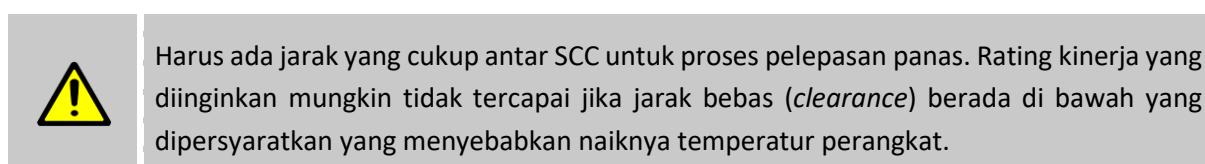
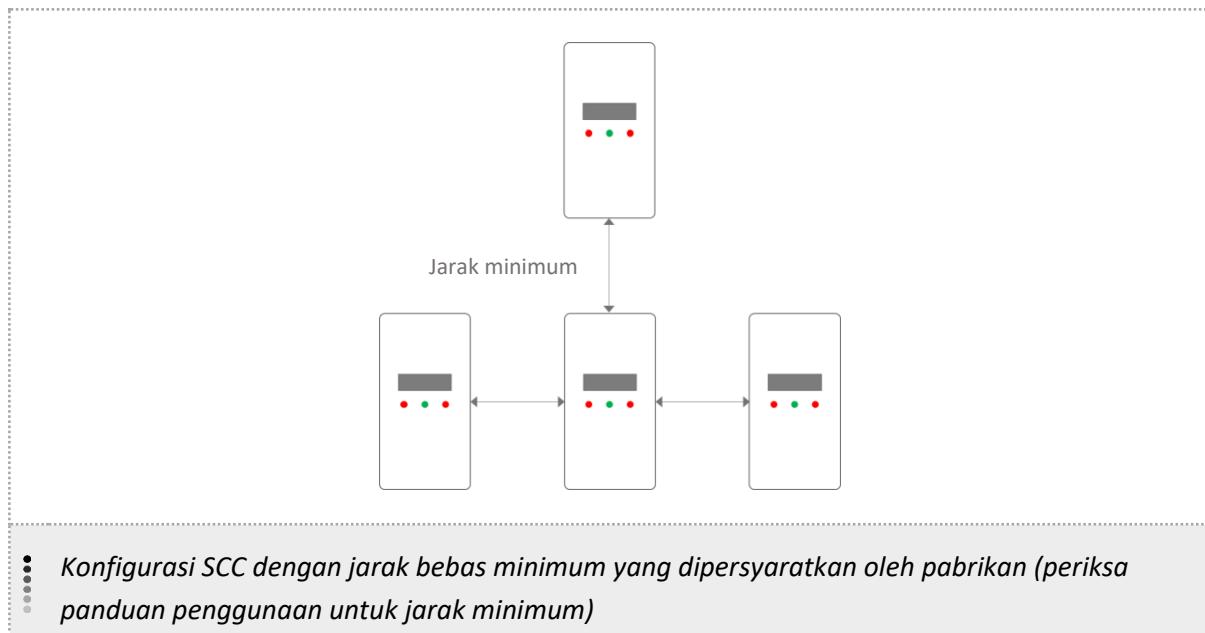
- **Tampilan yang mudah digunakan** untuk mengatur dan menunjukkan status SCC. Tampilan ini akan membantu operator atau teknisi untuk dapat dengan mudah memantau sistem.
- **Diuji dan disertifikasi sesuai standar IEC 62509.** Standar ini mengatur persyaratan minimum untuk fungsi dan kinerja *solar charge controller*.
- **Diproduksi oleh perusahaan terkemuka** yang memiliki rekam jejak yang bagus dan prosedur garansi yang jelas.
- Hanya hubungkan **merek dan tipe SCC yang sama secara paralel** saat menghendaki daya yang lebih tinggi.

4.2. Instalasi dan pengkabelan *solar charge controller*

Oleh karena persyaratan pemasangan berbeda antara produk, bab ini hanya akan membahas aspek umum pemasangan. Untuk memperoleh informasi yang spesifik mengenai pabrikan atau produk tertentu, sangat disarankan untuk mengikuti panduan penggunaan produk yang bersangkutan.

■■■ Lokasi dan pengaturan unit

Aliran udara yang baik sangatlah penting untuk menjaga temperatur perangkat pada temperatur operasi yang ideal. Perangkat yang terlalu panas akan mengurangi daya keluaran sistem atau bahkan membuat perangkat menjadi rusak. Untuk mekanisme pendinginan yang baik, disarankan untuk mempertimbangkan jarak vertikal dan horisontal minimum antara perangkat yang ditentukan oleh pabrikan. Jarak biasanya tergantung di mana *heat sink* dan ventilasi ditempatkan.



⇒ Bagaimana cara memperbaiki pengelolaan panas pada instalasi?

- Atur ulang letak *charge controller* berdasarkan tata letak yang disarankan oleh pabrikan. Secara umum, 20 cm adalah jarak antar perangkat yang dapat diterima, baik untuk jarak vertikal maupun horisontal.
- Pastikan temperatur ruangan tidak lebih dari 35°C dan temperatur perangkat tidak lebih dari 45°C.



- Peralatan daya elektronik tidak boleh dipasang di dalam sebuah kotak, kecuali jika disediakan ventilasi yang memadai, misalnya pendingin aktif. Jika kotak tidak dilengkapi dengan kipas pendingin, pindahkan SCC ke area terbuka di dalam rumah pembangkit untuk mendapatkan pendinginan alami bagi perangkat.
- Secara teratur bersihkan ventilasi SCC menggunakan lap kering untuk menghindari penumpukan debu.



- Jarak antar perangkat yang baik. Perpindahan panas tidak akan mempengaruhi perangkat di sebelahnya.



- Pemasangan yang tidak rapi dan sangat sesak. Memasang SCC di dalam kotak mensyaratkan ventilasi udara yang baik.

II. Pemasangan kabel solar charge controller

Pemasangan kabel *solar charge controller* mencakup kabel daya dan kabel komunikasi. Kabel daya memudahkan distribusi daya dari laris modul fotovoltaik dan ke baterai, sementara kabel komunikasi memastikan terjadinya komunikasi antar SCC untuk bertukar informasi, memberikan kendali serta pengambilan data. Sangat penting untuk memasang kedua jenis kabel ini dengan cara yang benar.

⇒ Mengapa pemasangan kabel *solar charge controller* harus dilakukan dengan tepat?

- Mengurangi risiko terjadinya hubungan arus pendek dan sengatan listrik bagi operator/teknisi.
- Menghindari tegangan jatuh yang tinggi yang dapat menyebabkan terhentinya pengisian baterai secara dini (sebelum waktunya).
- Menyelaraskan status pengisian antar SCC untuk mendapatkan pengisian baterai yang optimal dan berbagi informasi tentang temperatur di antara SCC untuk mengaktifkan kompensasi temperatur.
- Mengambil data pengukuran dari sistem pemantauan.



- Terminal *solar charge controller* yang terpapar. Tegangan DC hingga 150 V pada terminal modul fotovoltaik dapat menyebabkan sengatan listrik. Kabel daya dan komunikasi tidak boleh dipasang secara bersama-sama dalam satu konden.



Kompartemen kabel SCC harus selalu tertutup. Tegangan DC yang berbahaya mungkin terdapat pada terminal masukan. Sakelar pemutus pada kotak *combiner* harus dimatikan sebelum bekerja di kompartemen kabel.



- Penggunaan *gland* kabel untuk melindungi kabel dan mencegah binatang memasuki kompartemen.

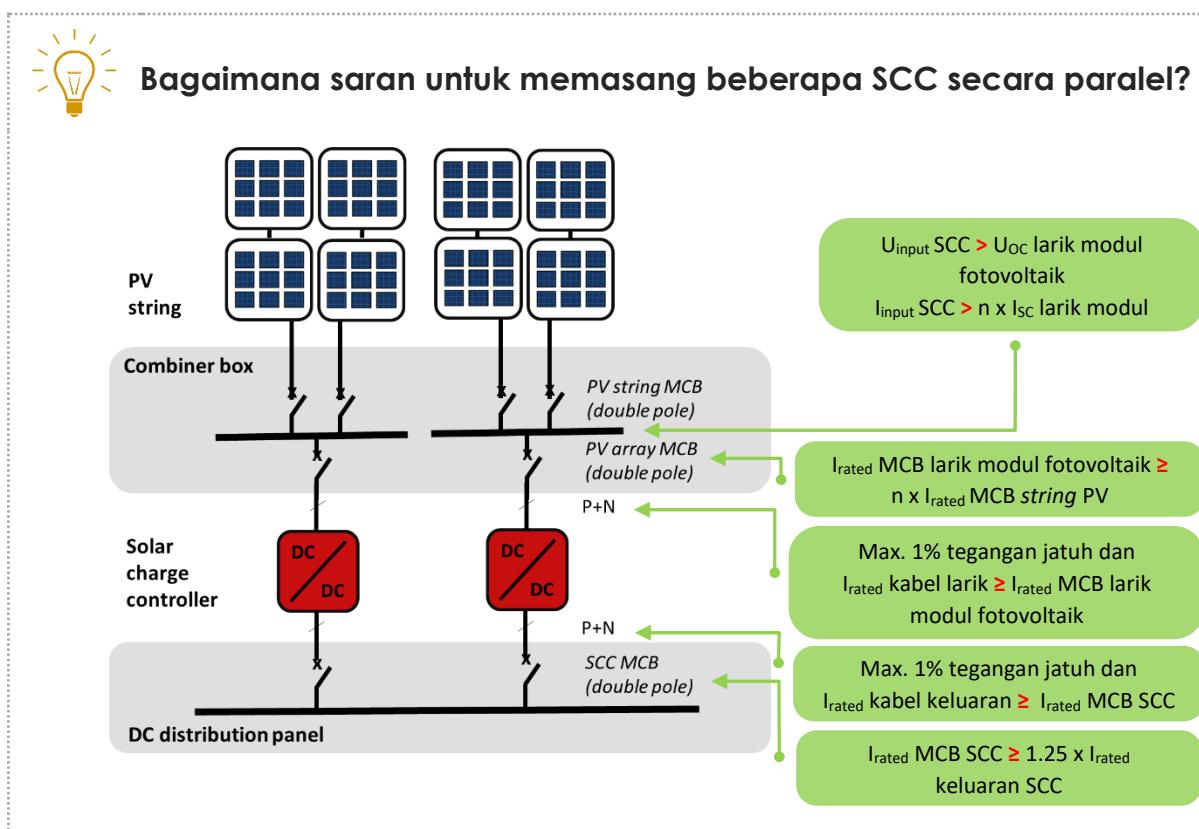


- Gland* kabel hilang. Tidak ada karet di sekitar tepi yang tajam dapat merusak isolasi kabel.

⇒ Bagaimana cara memasang kabel daya dengan benar?

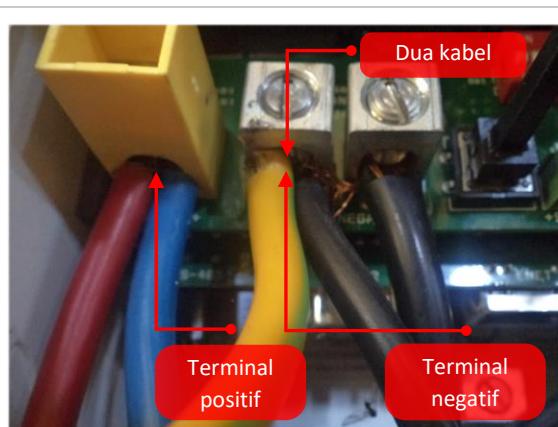
- Pilihlah jenis dan penampang kabel daya yang benar sesuai dengan besarnya arus yang mengalir, tegangan jatuh yang diizinkan, ukuran penampang kabel maksimum dan minimum yang direkomendasikan oleh pabrikan, dan ukuran perangkat proteksi. Biasanya untuk tegangan rendah DC digunakan kabel dengan isolasi PVC dengan jenis NYAF, NYY, atau NYF.
- Pasang *gland* kabel dengan ukuran yang benar untuk menghindari kontak langsung antara kabel dan tepi yang tajam. *Gland* ini juga akan mencegah benda-benda lain masuk ke dalam kompartemen kabel.

- Gunakan konduit kabel untuk melindungi kabel dari gangguan lingkungan. Pasang kabel komunikasi dan kabel daya pada konduit yang terpisah. Pegiriman data mungkin terganggu ketika memasang kabel komunikasi dan kabel daya dalam jarak yang dekat dikarenakan medan elektromagnetik disekitar kabel.





- Kabel tunggal per terminal dan warna insulasi kabel yang benar digunakan untuk kabel DC.



- Lebih baik memasang kabel tunggal dengan rating yang lebih tinggi dibandingkan dua kabel secara paralel.

⇒ Mengapa menggunakan kabel tunggal lebih baik dibandingkan dua kabel secara paralel?

- Sebagian besar terminal sambungan dirancang untuk kabel tunggal, memasangkan dua kabel di dalam satu terminal dapat mengurangi keandalan sambungan.
- Perangkat proteksi atau MCB harus disediakan untuk setiap kabel. MCB akan mencegah arus berlebih pada kabel terutama ketika arus tidak terbagi sama rata.



- Instalasi kabel yang rapi dengan insulator tambahan untuk memastikan agar konduktor tidak menyentuh terminal lainnya.



- Tanda terbakar di terminal masukan. Ini mungkin karena sambungan kabel yang buruk yang menimbulkan busur listrik.



Pastikan kabel terpasang dengan aman untuk menghindari timbulnya busur listrik dan kemungkinan meningkatnya temperatur pada terminal kabel.



- Tidak terpasangnya satu SCC akan mengurangi produksi energi dari modul fotovoltaik.



- Pemisahan antara kabel positif dan negatif dengan menggunakan isolasi. Tanda bahaya atas sengatan listrik harus disediakan.

⌚ Apa yang harus dilakukan jika salah satu SCC tidak berfungsi?

- Lepaskan SCC secara dari sistem PLTS dengan mematikan perangkat proteksi pada sisi masukan (di kotak penggabung) dan sisi keluaran (panel distribusi DC).
- Amankan kabel yang tersambung dengan memisahkan kabel positif dan negatif agar tidak menyentuh satu sama lain dan peralihan yang tidak disengaja yang dapat menyebabkan hubungan arus pendek.



Kabel bertegangan tinggi mungkin ada di ujung kabel. Konduktor yang terlepas dari laris modul fotovoltaik harus dilindungi dan diputuskan pada kotak *combiner*.



- Kabel komunikasi tersambung dengan benar. Pada jenis ini, *network terminator* harus dipasang di setiap ujungnya.



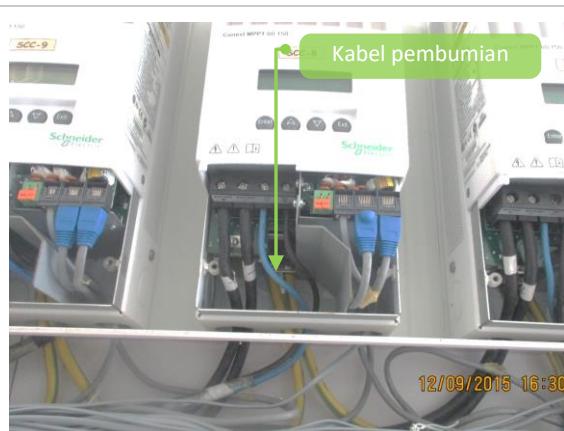
- Adaptor komunikasi tidak berfungsi. SCC dengan adaptor yang tidak berfungsi tidak akan terbaca di dalam sistem pemantauan.



Silakan merujuk ke panduan perangkat untuk jenis kabel komunikasi yang disarankan. Beberapa pabrikan hanya membolehkan jenis kabel ethernet *straight*², bukan yang *crossover*³. Gunakan kabel *twisted* untuk mengurangi gangguan terhadap data transmisi.

⌚ Bagaimana cara untuk memastikan bahwa komunikasi berfungsi dengan baik?

- Periksa akumulasi daya dan energi pada tampilan SCC.
- Semua SCC yang terhubung harus ditampilkan di dalam sistem pemantauan bersama dengan parameter pemantauan yang dikehendaki. Pastikan sambungan dengan memeriksa data yang terekam dari semua SCC di dalam sistem pemantauan.



- Perangkat dibumikan secara berantai (*daisy-chain*). Namun, lebih baik memiliki konfigurasi bintang atau pembumian titik tunggal.



- Tidak ada pembumian pada *solar charge controller* dapat menimbulkan bahaya sengatan listrik.

█████ Proteksi dan instrumentasi

▽ Proteksi *ground fault*

Ground fault adalah salah satu gangguan yang paling umum terjadi pada PLTS yang biasanya disebabkan oleh isolasi kabel yang terkelupas atau rusak. Kegagalan terjadi ketika konduktor positif menyentuh kabel pembumian atau bersinggungan dengan bagian dari konduktor yang tidak beraliran listrik yang diberi pembumian, yaitu kerangka modul, struktur penopang, dan lain-lain. *Ground fault* dapat menyebabkan gangguan arus dan busur listrik yang dapat meningkatkan risiko sengatan listrik dan bahaya kebakaran.

Untuk mengurangi risiko tersebut, sistem pembumian dan proteksi *ground fault* harus dipasang dengan benar untuk menghindari arus yang mengalir pada jalur yang tidak dikehendaki di saat terjadinya *ground fault*.

² Jenis kabel untuk menghubungkan dua perangkat yang berbeda jenis, misalnya antara modem dengan komputer.

³ Jenis kabel untuk menghubungkan dua perangkat yang sama jenisnya, misalnya antara dua komputer secara langsung.

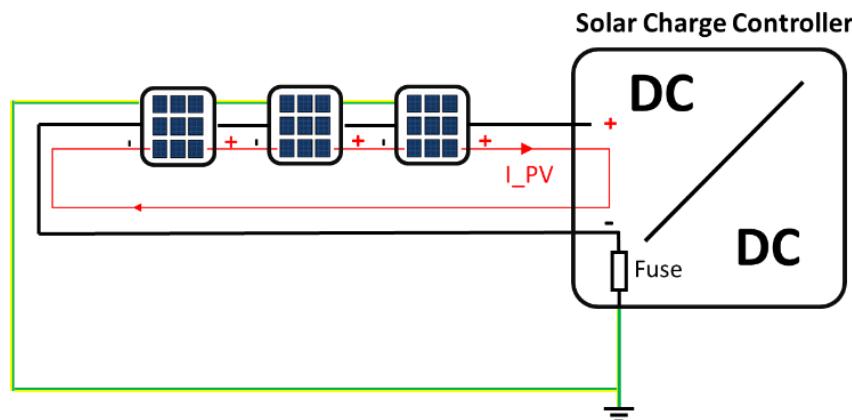


Proteksi *ground fault* secara otomatis akan membumikan jalur negatif lari modul fotovoltaik ke tanah. Oleh karena itu, jangan membumikan jalur negatif lari modul fotovoltaik secara terpisah. Gunakan proteksi *ground fault* eksternal jika SCC tidak dilengkapi dengan proteksi yang dibutuhkan. Struktur penopang modul fotovoltaik juga harus disambung ke pembumian dengan baik.

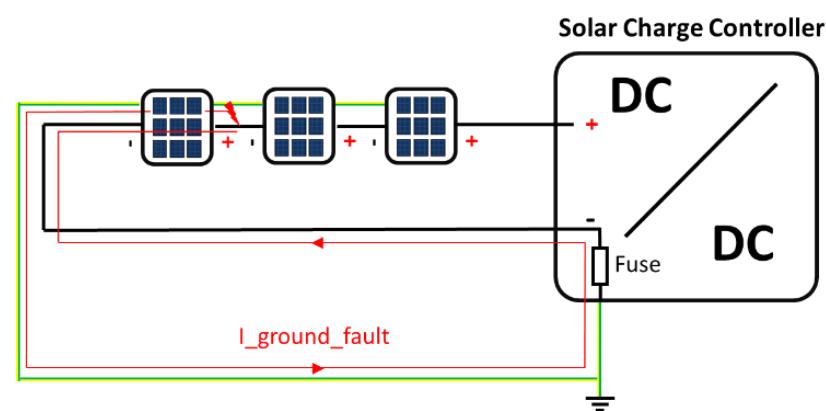


Bagaimana cara kerja proteksi *ground fault*?

- 1 Selama operasi normal, arus mengalir melalui jalur normal dan daya dari modul fotovoltaik dikirim ke beban.

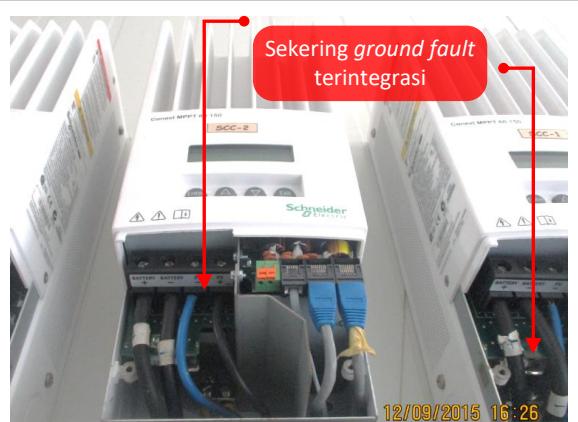


- 2 Karena beberapa alasan seperti korosi, insulasi yang meleleh, kegagalan insulasi, dan pengkabelan yang buruk, terjadi hubungan arus pendek antara konduktor positif yang terkelupas dengan pembumian. Jalur aliran arus berubah dan arus mengalir melalui kabel pembumian dan sekering proteksi *ground fault*. Sekering ini akan segera melakukan interupsi terhadap kegagalan tersebut dan melaporkan ke perangkat bahwa telah terdeteksi adanya *ground fault*.





Proteksi *ground fault* terintegrasi terpasang pada SCC.



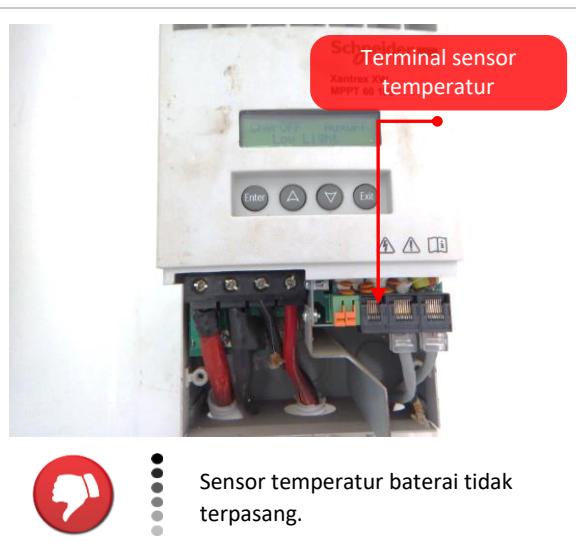
Sekering dipasang di setiap SCC yang terhubung secara paralel.



Jika beberapa *solar charge controller* terpasang secara paralel dan terhubung ke bank baterai yang sama, hanya satu proteksi *ground fault* yang harus dipasang. Untuk SCC yang memiliki proteksi *ground fault* terintegrasi, lepaskan sekering dari masing-masing unit dan biarkan hanya satu unit yang ada sekeringnya.

▼ Sensor temperatur baterai

Sensor temperatur baterai (BTS - *battery temperature sensor*) harus dipasang dengan benar agar fungsi pengisian baterai sesuai-temperatur dapat berjalan dengan benar. Kompensasi bekerja dengan menyesuaikan tegangan pengisian berdasarkan perubahan temperatur baterai. Tegangan pengisian berkurang di saat temperatur mencapai di atas temperatur referensi (biasanya 25°C) dan sebaliknya, sehingga mencegah pengisian baterai saat temperatur baterai tinggi.



Sensor temperatur baterai tidak terpasang.



SCC akan mengukur temperatur lingkungan, bukan temperatur baterai.

⌚ Bagaimana cara untuk memasang sensor temperatur baterai (BTS) dengan benar?

- Pasang sensor di terminal negatif baterai atau di antara dua baterai dari bank baterai yang sama. Gunakan pita perekat untuk memasang BTS di bagian samping baterai dan di bawah ketinggian tingkat cairan elektrolit.
- Kabel BTS tidak boleh dipasang di konduit yang sama dengan kabel daya untuk menghindari gangguan transmisi data.
- Hanya satu BTS yang dibutuhkan jika beberapa SCC dipasang pada bank baterai yang sama. Semua SCC di jaringan yang sama akan berbagi informasi temperatur baterai. Pada kasus dimana BTS dipasang pada bank baterai yang sama, temperatur yang tertinggilah yang akan digunakan sebagai masukan untuk mengubah tegangan pengisian.

4.3. Pengaturan parameter *solar charge controller*

Pengaturan parameter adalah langkah yang penting di saat pemasangan untuk memastikan proses pengisian baterai yang aman. Pengaturan parameter yang benar tidak hanya akan memungkinkan SCC untuk bekerja secara efisien dalam larik paralel namun juga untuk melindungi baterai dari pengisian berlebih, dengan demikian meningkatkan umur pakai baterai. Parameter tersebut dapat dikonfigurasi sesuai dengan nilai yang disarankan dari pabrikan baterai. Semua parameter dasar harus diatur dengan benar sebelum dilakukannya komisioning.



Parameter apa yang harus dipertimbangkan saat mengatur parameter *solar charge controller*?

- **Nomor perangkat** atau nomor identifikasi (ID) masing-masing SCC dalam jaringan harus ditetapkan dan harus unik.
- **Jenis baterai**, penting untuk mengatur parameter jenis baterai yang benar untuk memastikan pengisian baterainya. Jenis baterai bisa dipilih antara baterai *lead-acid* (Flooded, GEL, AGM) atau jenis lainnya seperti *lithium ion*, *zinc-air*. Baterai OPzV adalah baterai GEL.
- **Tegangan nominal bank baterai**, yang sebagian besar ditetapkan pada 48 V DC. Bergantung pada jenis baterainya, tegangan sistem mengikuti tegangan nominal baterai.
- **Kapasitas bank baterai dalam Ah (Ampere-hour)**. Kapasitas total dari bank baterai yang terhubung harus ditetapkan untuk digunakan sebagai acuan untuk menghentikan proses pengisian.
- **Batas arus pengisian** menentukan arus keluaran yang dapat diterima untuk mengisi baterai.
- **Siklus pengisian** adalah proses pengisian, baik tiga tahap maupun dua tahap tanpa tahapan mengapung (*float*). Siklus tiga tahap yang terdiri dari tahap *bulk* atau tahap arus-konstan, tahap *absorption* atau tahap tegangan-konstan dan *floating* biasanya dipakai untuk baterai *lead-acid* dan proses pengisian dua tahap untuk baterai *lithium-ion*.

- **Tegangan bulk**, pada tahap *bulk*, baterai akan diisi dengan nilai batas maksimum arus yang diizinkan hingga mencapai tahap *absorption*. Mengingat baterai yang berbeda memiliki pengaturan yang berbeda pula, gunakan nilai yang disarankan dari pabrikan baterai.
- **Tegangan absorption**, pada langkah ini, baterai akan diisi dengan tegangan konstan, yang ditetapkan dengan nilai untuk tegangan *absorption*, dan arus akan menurun.
- **Tegangan float** adalah tegangan baterai setelah tahap *absorption*. Selama tahap *floating*, pengisian baterai akan terhenti, daya dari modul fotovoltaik akan secara langsung dialirkan ke beban saat dibutuhkan. Tahapan akan kembali ke tahap *bulk* di saat tegangan mencapai tegangan yang ditetapkan. Tabel berikut ini adalah nilai yang disarankan jika nilai-nilai tersebut tidak diberikan oleh pabrikan baterai.

Teknologi baterai	Tegangan nominal per sel [V]	Tegangan <i>bulk</i> [V]	Tegangan <i>absorption</i> [V]	Tegangan <i>float</i> [V]	Rekomendasi C-rate
Lead-acid (OPzV)	2 V	2,4 V	2,4 V	2,25 V	\geq C10
Lithium-ion	3,7 V	4,2 V	4,2 V	-	\geq C1
Lithium-iron-phosphate	3,2 V	3,65 V	3,65 V	-	\geq C1



Pastikan tegangan pengisian diatur dengan benar. Pengaturan parameter pengisian yang tidak tepat dapat menyebabkan bahaya kebakaran akibat pengisian baterai yang berlebihan atau *overcharge* (jika diatur di atas batasan) atau pengisian yang tidak mencukupi pada akhir tahap pengisian (jika diatur di bawah batasan).



Nomor ID akan membantu operator atau teknisi untuk mengidentifikasi SCC. Nomor harus sesuai dengan nomor kotak penggabung.



- 16 solar charge controller tidak dilengkapi dengan nomor ID dapat menimbulkan kesulitan saat melakukan perbaikan

Bab 5:

Inverter Jaringan

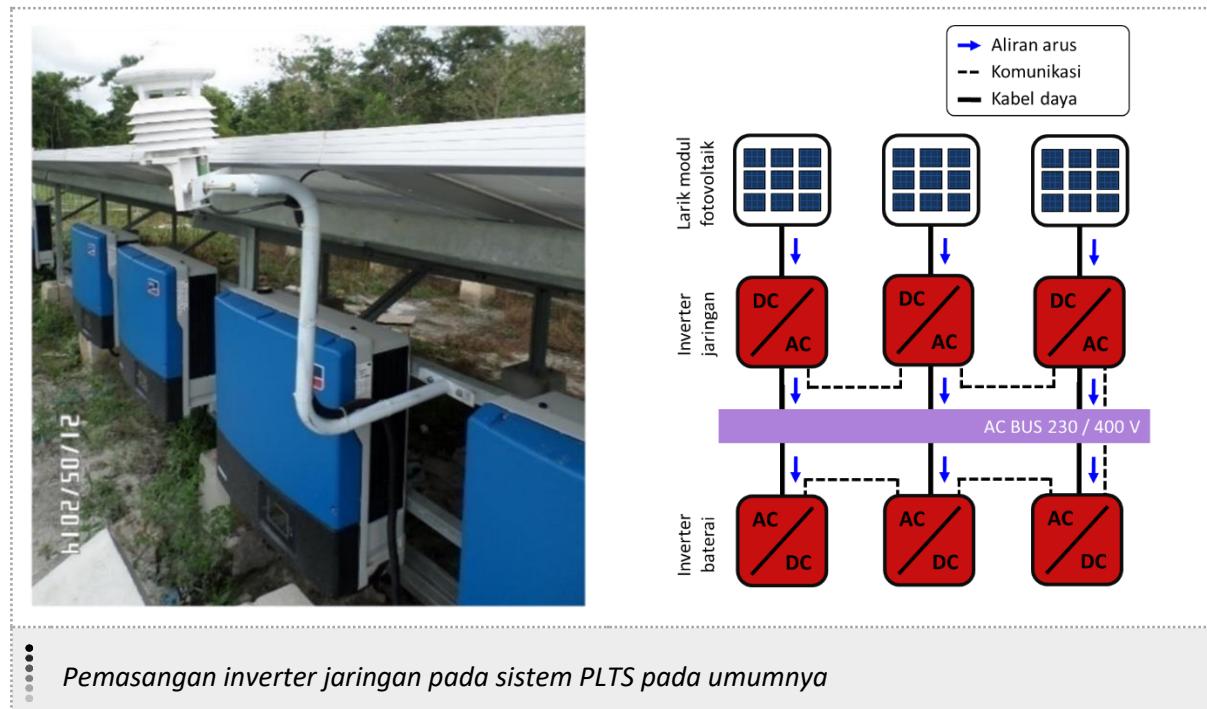
- ✓ Apa fungsi dari inverter jaringan?
- ✓ Contoh pemasangan inverter jaringan yang baik dan kurang baik
- ✓ Hal-hal yang harus dipertimbangkan ketika mengatur parameter inverter



5.1 Dasar-dasar inverter jaringan

Inverter jaringan atau dikenal juga sebagai inverter PV atau *grid inverter* adalah komponen elektronik daya yang mengonversi tegangan DC dari larik modul fotovoltaik menjadi tegangan AC baik untuk pemakaian langsung atau untuk menyimpan kelebihan daya ke dalam baterai. Serupa dengan *solar charge controller* (SCC), perangkat ini juga dilengkapi dengan MPPT (*maximum power point tracker*) untuk mengoptimalkan daya yang ditangkap dari larik modul fotovoltaik.

Karena inverter ini tidak dapat beroperasi tanpa tegangan dan frekuensi jaringan, inverter baterai harus tetap dalam kondisi operasional dan menjaga bank baterai tetap pada state of charge baterai yang ditetapkan. Pada kasus khusus dimana tersedia tegangan jaringan, inverter akan melakukan sinkronisasi dengan tegangan dan frekuensi jaringan agar dapat bergabung dengan jaringan tersebut dan mengirimkan daya yang telah dikonversi ke jaringan AC.



⌚ Apa saja fungsi lain inverter jaringan?

- *Anti-islanding*¹ atau mematikan otomatis inverter dari jaringan ketika jaringan listrik tidak tersedia untuk memberikan keamanan terhadap jaringan.
- Memaksimalkan transfer daya dari larik modul fotovoltaik ke baterai dengan menggunakan algoritma MPPT.

¹ *Anti-islanding* adalah sebuah fitur inverter jaringan untuk mengetahui bila ada penghentian daya dan secara otomatis akan mematikan sendiri dan menghentikan produksi listrik.

■■■ Spesifikasi inverter jaringan

Keluaran dari inverter dapat dimasukkan ke dalam satu-fasa (220 VAC) atau tiga-fasa (380 VAC) tergantung pada jenis dan konfigurasi jaringan. Beberapa inverter jaringan biasanya memiliki masukan dari *multi-string* untuk memungkinkan beberapa *string* dihubungkan tanpa menggunakan kotak penggabung tambahan. Spesifikasi inverter jaringan ditetapkan berdasarkan parameter-parameter berikut.

U_{DC} max [V]	Tegangan DC masukan maksimum dari larik modul fotovoltaik
U_{DC} MPP [V]	Rentang tegangan MPPT
I_{DC} max [A]	Arus DC masukan maksimum dari larik modul fotovoltaik
U_{AC} rated [V]	Tegangan keluaran (satu-fasa atau tiga-fasa)
P_{AC} rated [W]	Daya keluaran pada kondisi normal, pada umumnya pada frekuensi 50 Hz
S max [VA]	Maksimum daya nyata (<i>apparent</i>). Daya nyata adalah kombinasi dari daya aktif [kW] dan daya reaktif [var]
I_{AC} max [A]	Arus keluaran maksimum pada tegangan yang ditentukan



Label yang terpasang pada inverter yang menunjukkan karakteristik kelistrikan inverter jaringan yang terpasang.



Informasi yang tertulis pada label bermanfaat untuk mengidentifikasi jenis dan spesifikasinya, terutama ketika melakukan pemeriksaan atau pemeliharaan.



Apa yang harus dipertimbangkan saat memilih inverter jaringan?

- **Daya keluaran inverter jaringan** harus berada pada **kisaran 0,9 sampai 1,25** kali dari kapasitas terpasang larik modul fotovoltaik yang tersambung. Namun demikian, disarankan untuk menggunakan rasio 1:1 antara kapasitas PV dan daya inverter dalam pengukuran agar tidak terjadi inefisiensi² yang disebabkan oleh ukuran inverter yang terlalu besar.

0,9 P_{DC} larik modul surya $\leq P_{AC}$ inverter jaringan $\leq 1,25 P_{DC}$ larik modul

P_{AC} inverter jaringan $\leq 2 \times P_{AC}$ inverter baterai

Nilai tegangan dan arus harus dipilih berdasarkan tegangan dan arus maksimum dari larik modul fotovoltaik yang tersambung dalam kondisi apapun, dengan mempertimbangkan koefisien temperatur modul fotovoltaik.

- **Efisiensi konversi yang tinggi ($\geq 98\%$)** dan dilengkapi dengan MPPT.
- Dilengkapi dengan sistem proteksi berikut ini:
 - Input reverse polarity** (alat proteksi polaritas terbalik di sisi masukan) bila secara tidak sengaja salah menghubungkan kabel dari larik modul fotovoltaik.
 - Proteksi arus lebih (overcurrent) di sisi DC dan AC**, nilai perangkat ini harus setidaknya 125% dari arus hubung pendek larik modul fotovoltaik.
 - Proteksi ground fault dari modul fotovoltaik** untuk melindungi kabel apabila konduktor modul fotovoltaik menyentuh sistem pembumian (*grounding*).
 - Proteksi tegangan berlebih (overvoltage)** di sisi masukan dari larik modul fotovoltaik.
- Sebaiknya terdapat **minimum dua inverter** untuk menambah keandalan sistem PLTS jika salah satu rusak. Direkomendasikan untuk hanya menggunakan inverter jaringan dengan merk sama untuk menjaga konsistensi dalam protokol komunikasinya.
- **Tampilan yang mudah digunakan** yang menunjukkan status inverter jaringan. Ini akan membantu operator atau teknisi untuk memantau sistem dengan mudah.
- **Diuji dan disertifikasi menurut EN 50530**, yang menjelaskan standar efisiensi keseluruhan inverter yang tersambung ke jaringan listrik PLN, serta IEC 62109 yang menguraikan standar keselamatan pengubah daya yang digunakan dalam sistem PLTS.
- **Diproduksi oleh perusahaan terkemuka** yang memiliki rekam jejak yang bagus dan prosedur garansi yang jelas.
- Dilengkapi dengan **masukan multi-string** dan **modul komunikasi** untuk keperluan pemantauan.

² Masyarakat Energi Jerman (*the German Energy Society*) (2008). *Planning and Installing photovoltaic systems* (Edisi kedua). Earthscan.



Inverter jaringan harus memenuhi persyaratan dan diuji menurut EN 50530 dan IEC 62109 untuk memastikan kualitas inverter. Inverter juga harus memiliki masa garansi selama lebih dari lima (5) tahun.

5.2 Instalasi dan pengkabelan inverter jaringan

■■■ Lokasi dan pengaturan unit

Inverter jaringan ini dapat dipasang baik di luar maupun di dalam rumah pembangkit tergantung pada rating IP yang telah ditentukan oleh pabrikan. Dalam kedua kasus tersebut, jarak antar komponen penting diperhatikan untuk menghindari panas berlebih. Jarak minimum 30 cm secara horizontal dan 50 cm secara vertikal perlu dijaga agar tersedianya ruang untuk pelepasan panas secara alamiah. Harus disediakan pula ventilasi yang baik di dalam ruangan untuk mendapatkan sirkulasi udara yang baik.



- Jarak yang cukup antar inverter memungkinkan sirkulasi udara yang baik dan pelepasan panas.



- Jarak yang tidak cukup antar perangkat akan meningkatkan temperatur perangkat.

Memasang inverter jaringan di dekat larik modul fotovoltaik lebih disarankan untuk mengurangi rugi-rugi daya serta efisiensi biaya untuk kabel DC. Selain itu, memasang inverter di luar juga akan memberikan pendinginan alamiah untuk inverter. Namun demikian, beberapa pertimbangan mengenai perlindungan terhadap cuaca harus diperhitungkan.

⌚ Apa yang harus diperhatikan ketika memasang inverter jaringan di luar?



- Lokasi pemasangan harus berada di bawah atap atau di bawah modul fotovoltaik.
- Kelas IP inverter minimal harus proteksi dengan kelas IP 54.
- Struktur penopang harus sesuai untuk dapat menahan beban inverter..
- Ventilasi inverter jaringan harus tetap bersih untuk meningkatkan pendinginan. Bersihkan dengan lap kering untuk menghindari penumpukan debu yang menghalangi ventilasi.
- Kabel AC harus memiliki nilai yang sesuai untuk pemakaian di luar ruangan dan terlindung dari paparan sinar matahari secara langsung.



- Inverter jaringan dipasang di bawah modul fotovoltaik dan terlindungi dari paparan sinar matahari langsung.



- Inverter jaringan terpapar sinar matahari langsung. Tambahan atap yang memadai untuk menghindari panas berlebih.



Untuk menghindari komponen terlalu panas, inverter jaringan harus terlindungi dari paparan sinar matahari secara langsung. Meningkatnya temperatur bisa menurunkan kinerja dan umur pakainya.



- Inverter jaringan dipasang dekat dengan kotak combiner untuk menghindari rugi-rugi pada kabel DC.



- Penggunaan kabel DC yang panjang. Instalasi seperti ini meningkatkan biaya investasi untuk kabel serta meningkatkan tegangan jatuh.



- Struktur penopang dari bahan galvanis yang baik akan menjamin kualitas instalasi.



- Struktur penopang inverter yang berkarat. Struktur penopang yang buruk dapat berisiko terhadap daya tahan beba instalasi.

■■■ Pemasangan kabel inverter jaringan

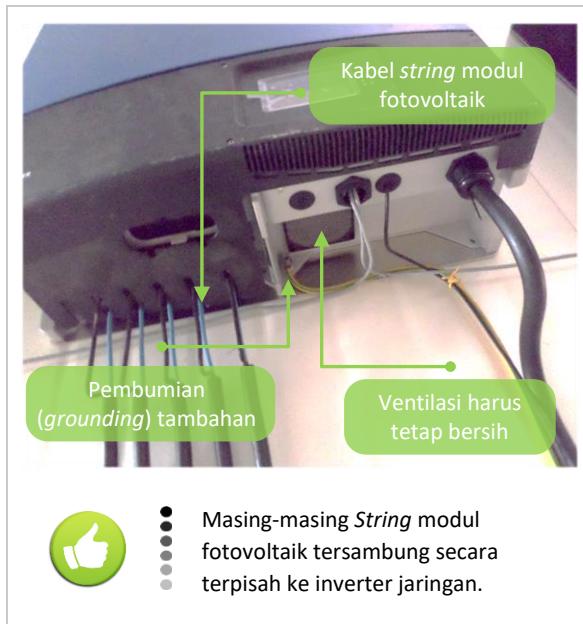
Interkoneksi inverter jaringan terdiri dari kabel daya, kabel komunikasi untuk pengiriman atau pengambilan data, dan pembumian (*grounding*) komponen. Kabel dan pemasangannya harus diukur dan dirancang sesuai standar nasional dan rekomendasi dari pabrikan.



- Pemasangan kabel yang rapi. Faktor *derating* kabel dan pemisahan antara kabel daya dan kabel komunikasi harus diperhitungkan.



- Tempat masuk kabel yang kurang baik dan kabel dipasang tanpa kondut atau kabel tray.



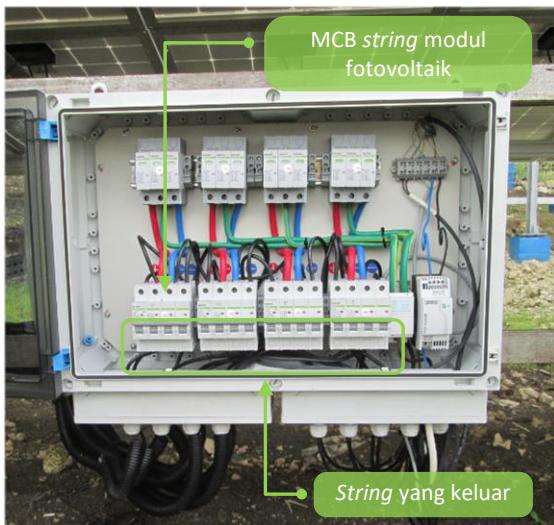
Tambahan pembumian (*grounding*) diperlukan untuk melindungi operator atau teknisi dari tegangan sentuh atau tersengat listrik jika pembumian pada terminal kabel AC bermasalah. Pastikan penampang minimum dan maksimum sesuai standar dan rekomendasi pabrik. Umumnya, penampang berukuran antara 10 sampai 16 mm².

⦿ Bagaimana cara memperbaiki pemasangan kabel?

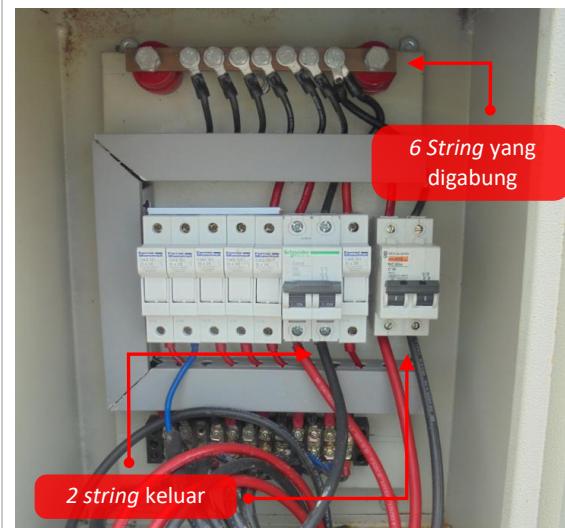
- Pastikan kabel komunikasi tersambung dan berfungsi dengan baik. Gunakan kabel data khusus untuk komunikasi antarmuka inverter.
- Lakukan instalasi ulang terhadap kabel *string* modul fotovoltaik dan hubungkan kabel secara langsung dari *string* modul fotovoltaik ke sisi masukan inverter jaringan. Lakukan perancangan *string* ulang jika diperlukan sesuai dengan spesifikasi masukan (*input*) inverter jaringan.



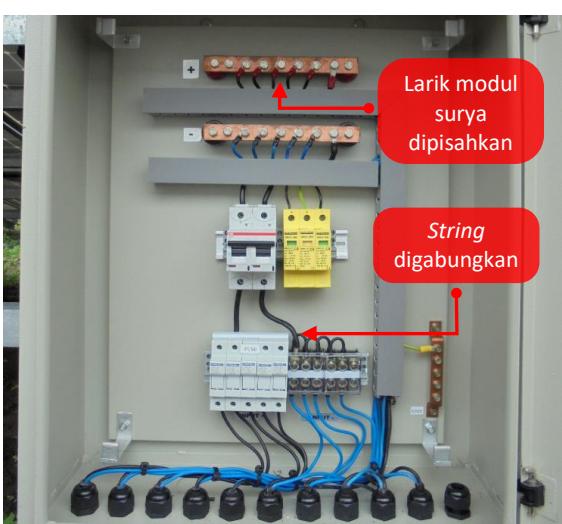
Perlu diingat bahwa tegangan *string* larik modul fotovoltaik dapat mencapai 1000 VDC. Selalu putuskan MCB pada sisi keluaran inverter jaringan, sisi masukan modul fotovoltaik pada kotak penggabung, dan sakelar pemutus secara berurutan ketika bekerja di inverter jaringan.



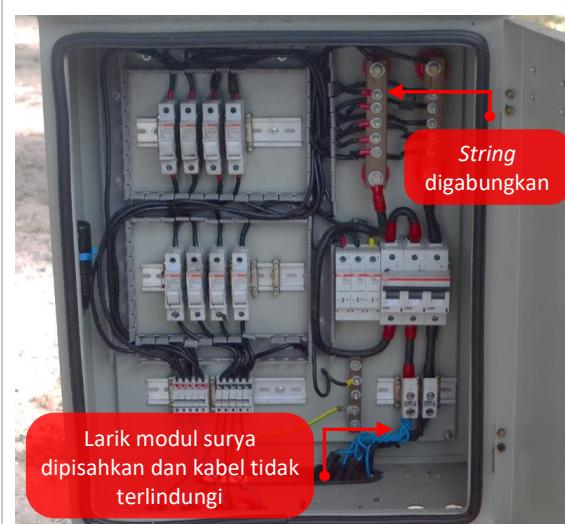
- *String* masuk ke inverter jaringan dengan *multi-string input* secara individu.



- *String* digabungkan terlebih dahulu di *busbar* dan dipisah menjadi dua keluaran untuk disambungkan ke inverter dengan 6 *input string*.



- *String* digabungkan menjadi larik (*array*) dan kemudian dipecah menjadi "string" individual untuk menyesuaikan dengan terminal multi-input inverter jaringan. Kabel keluar dari kotak *combiner* ke inverter jaringan harus dilindungi konduit kabel.





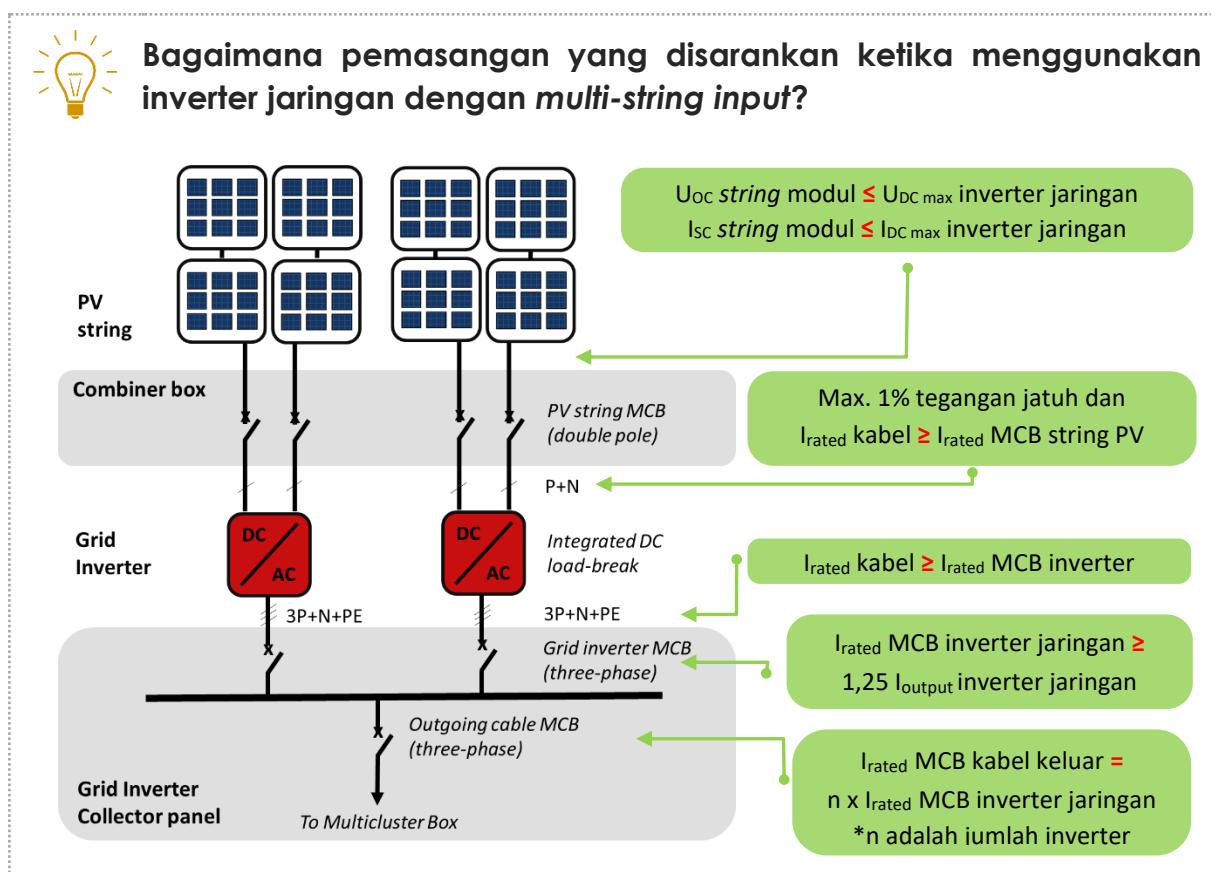
Apabila menggunakan inverter *multi-string*, input sebaiknya datang langsung dari *string* modul fotovoltaik, bukan digabungkan di dalam kotak penggabung terlebih dahulu dan kemudian dibagi secara merata.

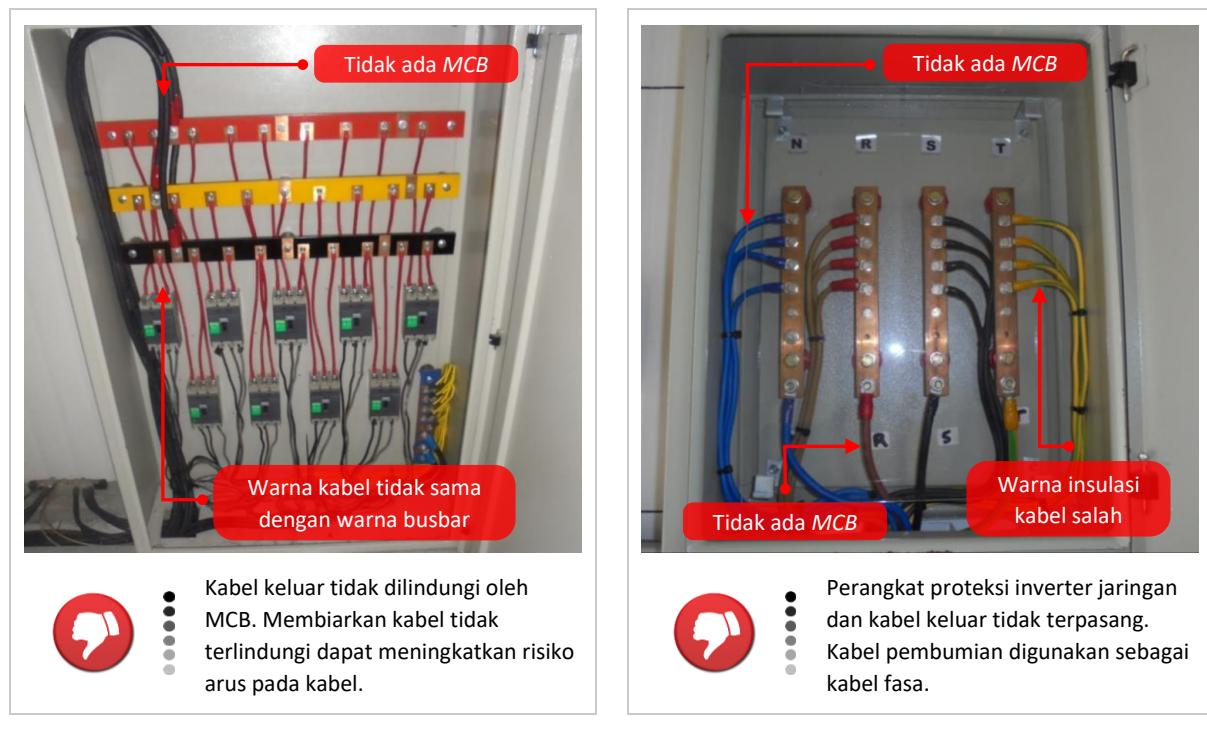
⦿ Mengapa koneksi *multi-string* lebih baik?

- Masukan tunggal hanya akan menyediakan data larik modul fotovoltaik, sedangkan masukan *multi-string* dapat menunjukkan kinerja setiap *string*. Sehingga data performa modul fotovoltaik lebih detil.
- Masukan *multi-string* biasanya dilengkapi dengan pelacak MPPT ganda. MPPT ganda akan meningkatkan fleksibilitas sistem serta jumlah energi yang didapat.
- Minimalkan jumlah komponen dalam kotak *combiner* misalnya busbar dan pemutus sambungan utama. Beberapa inverter jaringan dilengkapi dengan sekering elektronik terintegrasi dan proteksi tegangan surja di sisi DC. Arus masukan maksimum per *string* harus dipastikan pada saat proses perancangan sistem.



Bagaimana pemasangan yang disarankan ketika menggunakan inverter jaringan dengan *multi-string* input?





Setiap inverter jaringan dan kabel keluar tidak boleh dibiarkan tidak terlindungi. Jenis dan ukuran perangkat proteksi yang tepat sangatlah penting dalam memberikan keamanan pada instalasi.

5.3 Pengaturan parameter inverter jaringan

Pada prinsipnya, inverter jaringan dapat digunakan baik di sistem *off-grid* maupun *on-grid*. Inverter bekerja dengan cara yang sama, yaitu dengan mengikuti tegangan dan frekuensi jaringan. Dalam sistem *on-grid*, inverter akan terus memberikan daya selama matahari bersinar dan jaringan mampu mandistribusikan daya yang dikonversi.

Di sisi lain, jika berbicara mengenai sistem PLTS *off-grid*, dimana operasinya berdasarkan pada penyimpanan baterai dan beban, inverter jaringan dikendalikan oleh inverter baterai. Inverter baterai harus berkomunikasi dengan inverter jaringan untuk membatasi daya keluarannya jika bank baterai sudah terisi penuh dan daya yang dihasilkan modul fotovoltaik lebih tinggi dari beban. Hal ini dapat dilakukan dengan mengubah frekuensi jaringan sehingga inverter jaringan mengurangi daya keluarannya. Besarnya daya keluaran tersebut tergantung pada perubahan frekuensi dengan menggunakan kontrol *droop*³.

Pengaturan inverter jaringan harus dikonfigurasi dengan benar ke mode *off-grid*. Mode *off-grid* akan memungkinkan inverter untuk mengatur nilai rujukan yang dikhawasukan untuk aplikasi *off-grid*.

³ *Droop* adalah strategi kontrol yang biasa diterapkan pada pembangkit untuk mengendalikan frekuensi utama (dan terkadang untuk mengendalikan tegangan).



Parameter apa yang harus dipertimbangkan ketika mengatur parameter inverter jaringan?

- **Country data set** untuk menyesuaikan parameter ke jaringan yang dikehendaki. Untuk sistem yang berdiri sendiri (*stand-alone*), pilih mode *off-grid* atau *island grid*.
- **Frekuensi dasar** adalah frekuensi jaringan *off-grid* (*stand-alone*), yaitu 50 Hz.
- **Tegangan AC minimum** adalah tegangan minimum sistem untuk beroperasi. Nilainya tergantung pada kisaran inverter baterai.
- **Tegangan AC maksimum** adalah tegangan maksimum sistem untuk beroperasi.
- **Frekuensi AC minimum** adalah frekuensi minimum sistem untuk beroperasi. Umumnya, frekuensi ini didefinisikan dalam persentase dari frekuensi dasar (50 Hz).
- **Frekuensi AC maksimum** adalah frekuensi maksimum sistem untuk beroperasi.
- **Start power control frequency** adalah titik di mana kontrol daya *droop* frekuensi mulai bekerja.
- **Maximum power control frequency** adalah batas maksimum frekuensi untuk mengendalikan daya keluaran. Daya inverter jaringan pada frekuensi ini harus bernilai nol.

Bab 6: Baterai

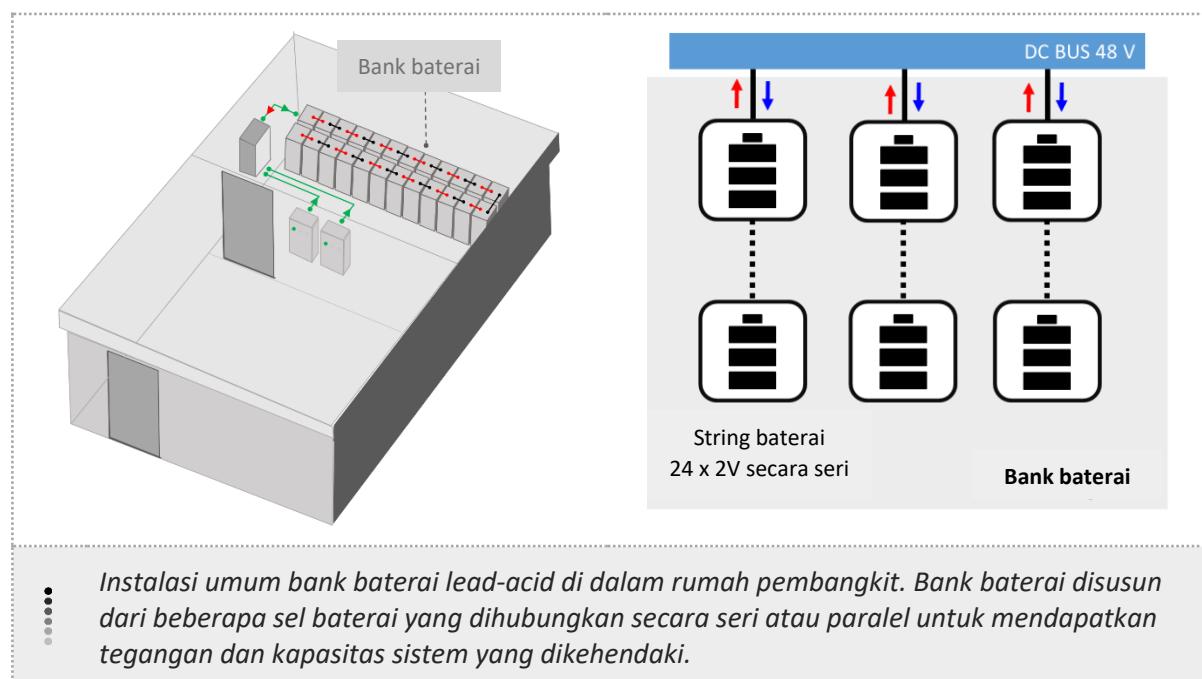
- ✓ Jenis baterai apa yang digunakan di PLTS off-grid
- ✓ Istilah teknis untuk baterai
- ✓ Pemasangan bank baterai yang baik dan buruk
- ✓ Hal-hal yang harus dipertimbangkan untuk memperpanjang usia pakai baterai

6.1. Dasar-dasar baterai

Baterai digunakan dalam sistem PLTS komunal untuk menyimpan energi yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik di siang hari, lalu memasok ke beban di malam hari atau saat cuaca berawan. Baterai bertindak sebagai penyimpan energi sementara (*buffer*) untuk mengatasi perbedaan antara pasokan listrik dari modul fotovoltaik dan permintaan listrik. Saat ini, baterai merupakan cara paling praktis untuk menyimpan tenaga listrik yang dihasilkan oleh rangkaian modul fotovoltaik melalui reaksi elektrokimia. Komponen ini merupakan salah satu komponen yang penting dan sekaligus rentan dalam sistem PLTS *off-grid*. Desain yang kurang baik atau ukuran baterai yang tidak tepat dapat mengurangi umur pakai yang diharapkan, berkurangnya energi, kerusakan, hingga bahaya keselamatan pada pengguna. Baterai memiliki keterbatasan umur pakai yang bergantung pada perilaku penggunaan serta temperatur pengoperasian.

⦿ Apa fungsi lain dari bank baterai?

- Sebagai suplai bagi beban dengan tegangan dan arus yang stabil melalui inverter baterai, juga dalam hal terjadi putusnya pasokan daya (*intermittent*) dari modul fotovoltaik.
- Bertindak sebagai cadangan untuk mengatasi perbedaan antara daya yang tersedia dari modul fotovoltaik dan permintaan dari beban.
- Menyediakan cadangan energi untuk digunakan di hari-hari dengan cuaca berawan atau pada kondisi darurat. Penentuan kapasitas baterai harus memperhitungkan hari-hari ketika sistem berjalan penuh tanpa pasokan daya dari modul fotovoltaik untuk memenuhi kebutuhan listrik (hari otonom).
- Memasok daya ke komponen elektronika daya seperti *solar charge controller* dan *inverter*.



Terdapat banyak teknologi baterai yang tersedia untuk sistem PLTS *off-grid* seperti *lead-acid*, *lithium ion*, *Zinc air*, *Nickel cadmium*, dll. Namun, mempertimbangkan kematangan teknologi, kinerja, serta keamanannya, hanya sedikit jenis baterai yang digunakan di daerah terpencil. Baterai *lead-acid* paling

umum digunakan pada sistem PLTS *off-grid*, meskipun terdapat alternatif baterai penyimpan yang lebih baru seperti *Lithium ion* dan *Zinc air* yang sudah mulai dipertimbangkan dengan umur pakai yang lebih panjang. Baik baterai *Lithium ion* maupun *Zinc air* memerlukan sistem pengelolaan baterai (*battery management system*) untuk keamanannya dan memperpanjang umur pakai baterai. Dikarenakan densitas energi baterai lithium yang lebih tinggi (Wh/kg) dibanding *lead acid*, terkadang penggunaannya lebih menguntungkan untuk dipakai di daerah terpencil.



- Baterai OPzV *lead acid* dipasang dalam susunan vertikal.



- Baterai OPzV *lead acid* dipasang dalam susunan horizontal.



- Bank baterai *Zinc air*. Setiap bank memiliki kapasitas 21 kWh pada tegangan nominal 48 V.



- Blok baterai *lithium ion* dipasang secara paralel pada rak baterai. Tiap blok berkapasitas nominal 100Ah di tegangan nominal 48V.

Baterai berjenis *lead acid* dengan pemakaian hingga *charge* rendah (*deep cycle*) banyak digunakan karena andal dalam waktu lama, lebih aman, mudah digunakan, dan biaya yang relatif lebih rendah per siklusnya. Penting untuk menggunakan jenis baterai yang mudah dirawat untuk dipasang di daerah terpencil dan sulit diakses. Jenis baterai OPzV atau *Ortsfest* (stasioner) *Panzerplatte* (pelat tubular) *Verschlossen* (tertutup) adalah salah satu jenis baterai yang paling banyak digunakan untuk sistem PLTS *off-grid*. Baterai ini adalah baterai *valve regulated lead acid* (VRLA) dengan teknologi pelat tubular dan gel yang tidak bergerak (*immobilized*) sebagai elektrolitnya untuk kinerja yang lebih tinggi.

Baterai ini mampu mencapai setidaknya 1500 siklus dengan 80% *depth of discharge*, dimana sangat ideal untuk digunakan. Bab ini hanya akan menjelaskan instalasi untuk jenis baterai tersebut.

■■■ Spesifikasi baterai

Baterai biasanya ditentukan oleh tegangan dan kapasitas nominalnya. Tegangan nominal pada dasarnya adalah tegangan titik tengah baterai atau tegangan yang diukur saat baterai memiliki status pengisian sebesar 50%. Sedangkan kapasitasnya adalah jumlah arus yang dapat disediakan baterai untuk waktu tertentu (Ah). Kapasitas nominal biasanya diukur dengan pemakaian baterai dalam 10 jam dengan pemakaian arus 1/10 dari kapasitas baterai.

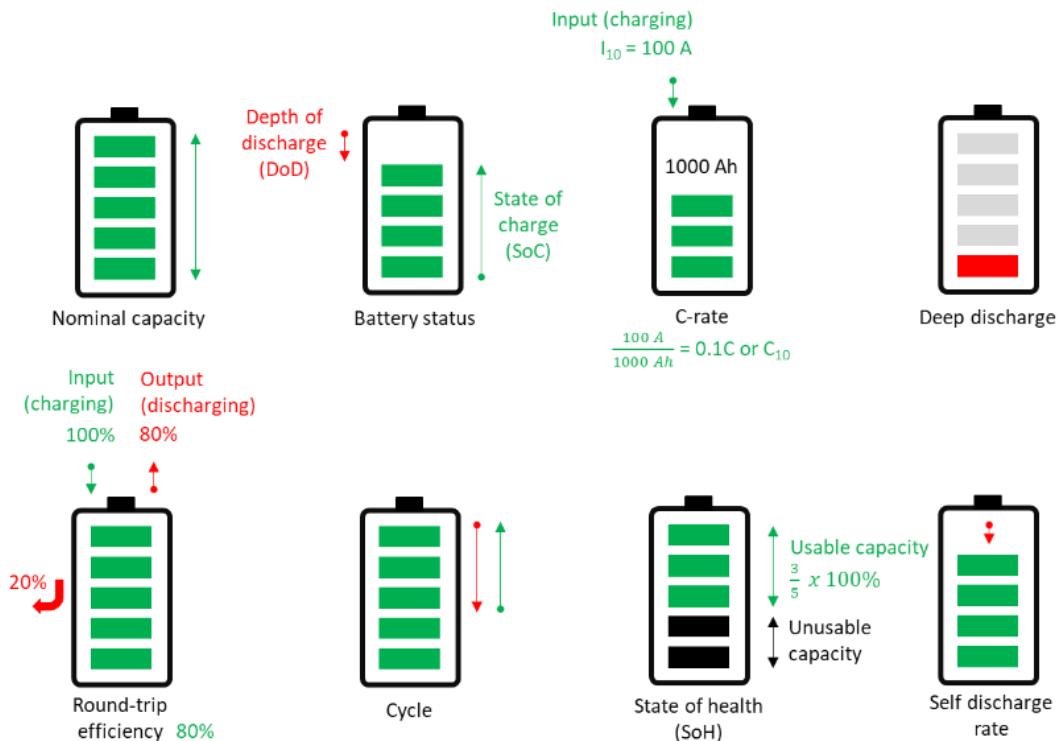


Disarankan agar baterai harus diuji sesuai dengan standar sebagai berikut: IEC 60896-21 – “Baterai *lead acid* stasioner – Bagian 21: Jenis dengan pengatur katup – Metode pengujian”; IEC 60896-22 - “Baterai *lead acid* stasioner – Bagian 22: Jenis dengan pengatur katup – Persyaratan”; serta IEC 61427 – “Sel dan baterai sekunder untuk penyimpanan energi terbarukan – Persyaratan umum dan metode pengujian” untuk memenuhi standar kualitas minimum.

Harga baterai masih relatif mahal dan mengambil porsi yang besar dari biaya modal di PLTS *Off-grid* sehingga pemilihan dan penetapan kapasitasnya harus dilakukan dengan benar agar kapasitas yang digunakan tidak terlalu besar atau terlalu kecil. Kapasitas yang kurang dapat menyebabkan pelepasan energi (*depth of discharge*) yang terlalu dalam sehingga mengurangi umur pakainya serta energi yang tidak mencukupi di malam hari. Sedangkan kapasitas yang berlebihan mengakibatkan penggunaan baterai yang tidak efektif. Penetapan kapasitas dilakukan dengan menggunakan perhitungan matematis lalu dapat dikoreksi menggunakan perangkat lunak simulasi seperti HOMER atau yang serupa untuk mencari solusi optimal.



Istilah dalam baterai



- **Kapasitas nominal atau C** menunjukkan jumlah pengisian yang dapat disimpan di dalam baterai atau yang dapat diambil dari sel baterai yang terisi penuh berdasarkan tingkat pemakaian tertentu. Kapasitas nominal menggunakan satuan Ampere-jam (*Ampere-hour, Ah*), atau terkadang dapat dikonversi ke dalam Watt-jam jika tegangan sistem diketahui.
- **State of charge atau SoC** adalah kondisi *charge* dalam baterai atau rasio antara kapasitas sisa dan kapasitas nominal yang dinyatakan dalam persentase (%).
- **Depth of discharge atau DoD** adalah jumlah energi yang digunakan dari baterai. Ini adalah kebalikan dari *state of charge*. Oleh karena itu, ketika spesifikasi baterai menyatakan bahwa siklus hidupnya mungkin lebih besar dari 1500 siklus dengan DoD 80%, artinya hal tersebut hanya akan terjadi jika penggunaan energi tidak melebihi 80% dari kapasitas nominalnya.
- **C-rate** biasanya menyatakan pengisian atau pemakaian energi yang sama dengan kapasitas baterai dibagi dengan waktu. Sebagai contoh: tingkat pemakaian C10 (atau I10) untuk 1000 Ah adalah sebesar 1000/10 atau sebesar 100 A.
- **Deep discharge** adalah ketika energi baterai dipakai di bawah tegangan *end-of-discharge* atau tegangan di pemakaian akhir. Tegangan *end-of-discharge* itu sendiri adalah titik tegangan baterai ketika baterai telah benar-benar habis terpakai atau ketika SoC kurang dari 20%.
- **Round-trip efficiency** adalah menyatakan rasio antara energi yang digunakan selama pemakaian dan energi untuk mengisi kembali baterai sampai penuh. Efisiensi termasuk rugi-rugi selama pemakaian dan pengisian. Baterai *lead acid* pada umumnya memiliki efisiensi sekitar 85% atau sedikit lebih rendah dari lithium-ion yang efisiensinya mencapai 95%.

- **Overcharge** adalah kondisi ketika arus berlebih diterapkan pada baterai di akhir pengisian. *Overcharge* menyebabkan terjadinya elektrolisis sehingga terjadi pembentukan gas serta hilangnya air.
- **Siklus/ Cycle** adalah satu kali urutan pengisian dan pemakaian. Lead acid baterai ditentukan sebagai siklus pakai atau jumlah siklus sebelum baterai mengalami penurunan kapasitas atau rusak. Idealnya, baterai yang baik harus memiliki setidaknya 2000 siklus atau setara dengan 5 tahun operasi.
- **State of health (SoH)** adalah rasio kondisi baterai saat ini terhadap kondisi ideal atau kapasitasnya ketika masih baru. SoH dinyatakan dalam persentase (%). Salah satu alasan turunnya nilai SoH adalah meningkatnya hambatan internal baterai yang membuat sebagian dari kapasitas baterai tidak dapat digunakan
- **Self-discharge rate** adalah tingkat penurunan kapasitas baterai tanpa terhubung ke beban atau karena aktivitas kimia internal. Tingkat penurunan kapasitas pada baterai *lead acid* biasanya maksimal 2% per bulan pada temperatur 20° C. Angka ini akan menentukan persyaratan untuk pengisian daya baterai di saat tidak digunakan.
- **Open circuit voltage** adalah tegangan baterai tanpa beban.

➲ Faktor apa yang harus dipertimbangkan di saat menentukan kapasitas baterai?

- Kebutuhan energi di malam hari dan profil beban. Energi akan menentukan kapasitas, sedangkan daya puncak menentukan pengeluaran arus maksimum yang harus dijaga pada tingkat yang disarankan.
- Perkiraan jumlah hari yang mampu menyediakan energi tanpa pasokan tenaga listrik dari modul fotovoltaik atau selama cuaca berawan. Perkiraan umumnya dua atau tiga hari.
- Efisiensi bolak-balik (*round-trip efficiency*) baterai harus dipertimbangkan ketika menetapkan kapasitas baterai, karena menimbulkan rugi-rugi di baterai secara signifikan.
- *Depth of discharge* yang diizinkan harus diketahui untuk mencegah pemakaian energi baterai yang terlalu banyak (*deeply discharged*). *Depth of discharge* juga mempengaruhi siklus umur pakai baterai secara signifikan.
- Jumlah siklus yang diperlukan untuk mencegah seringnya melakukan penggantian baterai.
- Temperatur berpengaruh terhadap umur pakai dan kapasitas baterai.



Bagaimana cara untuk menentukan kapasitas bank baterai?

1. Energi harian yang dibutuhkan di malam hari. Beban di siang hari harus tercukupi dari modul surya dan sebagian lagi oleh baterai selama terjadi fluktuasi. Beban puncak harus diidentifikasi.

Perkiraan energi = 60 kWh
Perkiraan beban puncak = 15 kW

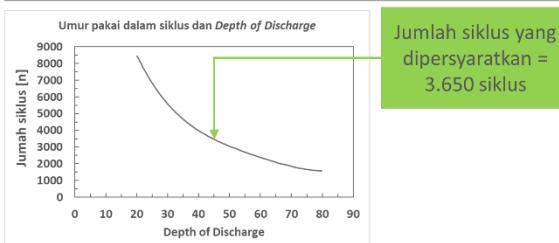
2. Energi yang dibutuhkan dengan memperhitungkan hari-hari ketika sistem dapat berjalan tanpa sinar matahari (otonom).

Hari otonom yang dibutuhkan = 2 hari →
Energi yang dibutuhkan dengan hari otonom =
60 kWh x 2 hari = 120 kWh

3. Perkiraan usia pakai berdasarkan suhu ruangan, yang diketahui dari data produsen baterai. Menurut hukum Arrhenius, usia pakai baterai berkurang hingga 50% tiap kenaikan suhu sebesar 10°C. Usia pakai 100% umumnya dicapai pada suhu ruangan sebesar 20°C.

Perkiraan suhu ruang = 30°C → 50% koreksi
Perkiraan usia pakai = 5 tahun → 365 hari x 5 = 1.825 siklus
Siklus yang dipersyaratkan dengan koreksi suhu =
1825 siklus / 50% = 3650 siklus

4. Tetapkan *depth of discharge* (DoD) yang disyaratkan untuk mencapai usia pakai yang diharapkan sesuai teknologi baterai. Berikut ini untuk jenis baterai OPzV



DoD minimum yang dipersyaratkan ≈ 45%

Efisiensi baterai = 85%

Kapasitas yang dibutuhkan = $\frac{\text{Energi yang dipersyaratkan dengan hari-hari otonom}}{\text{Efisiensi x DoD yang dipersyaratkan}}$

$\frac{120 \text{ kWh}}{0,85 \times 0,45} = 313 \text{ kWh}$

6. Periksa silang (*crosscheck*) dengan beban puncak. Beban puncak tidak boleh lebih tinggi dari tingkat pemakaian C10.

Tingkat C10 = 313 kWh / 10 jam → 31,3 kW
Beban puncak sebesar 15 kW < 31,3 kW

* Sumber siklus umur pakai: Hessecke

6.2. Pengoperasian baterai

■■■ Pelepasan energi (*discharging*)

Pada saat pelepasan energi baterai, tegangan rangkaian tertutup (*closed-circuit voltage*, CCV) dari baterai penurunan awal disebabkan oleh rugi-rugi hambatan (*ohmic losses*). Tegangan tersebut menurun secara bertahap tergantung pada karakteristik baterainya, hingga terjadi pemutusan karena tegangan yang rendah (*low voltage disconnection*, LVD). Dalam hal ini, beban harus diputus untuk menghindari pelepasan energi sampai habis (*deep discharge*) dari baterai sehingga menurunkan konsentrasi asam di dalam elektrolit dan timbul sulfidasi pada terminal baterai.

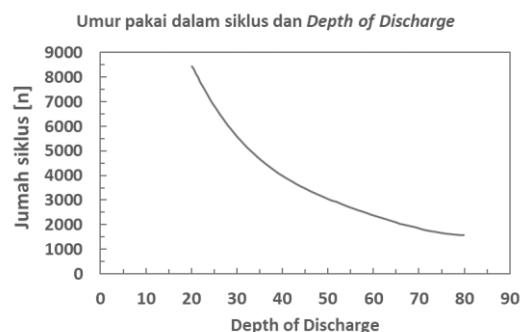
⌚ Apa yang harus dipertimbangkan ketika menggunakan baterai?

- Hindari pemakaian baterai sampai habis. Sebaiknya, paling sedikit 1,95 V per sel dengan waktu pemakaian hingga 24 jam. Hal ini berarti tegangan sistem sebesar 48 V, tegangan pelepasan terakhir sebesar 46,8 V.
- Baterai tidak boleh diisi dengan arus yang terlalu tinggi. Semakin tinggi arus maka semakin cepat tegangannya menurun, sehingga LVD akan dicapai lebih cepat. Energi total yang dapat diambil juga menurun. Produsen baterai sering menyatakan kapasitas baterai dalam fungsi *C-rate*. Biasanya, kapasitas nominal *lead acid* diperoleh dengan C_{10} *rate*.



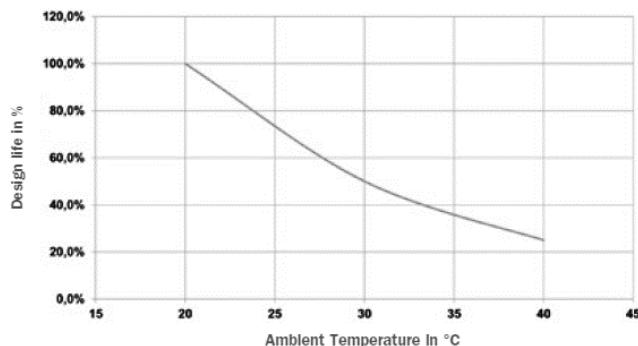
Faktor apa saja yang mempengaruhi umur pakai dan kapasitas baterai?

- *Depth of discharge (DoD)* → Semakin besar *depth of discharge*, maka semakin kecil jumlah siklus umur pakainya. Untuk mencapai minimum 1.825 siklus (5 tahun) pada temperatur 20° C, DoD dari baterai tidak boleh lebih tinggi dari sekitar 75%.



Siklus umur pakai OPzV dalam fungsi DoD dan temperatur¹.

- Temperatur ruangan → Semakin tinggi temperatur ruangan, maka semakin berkurang siklus umur pakainya. Grafik menunjukkan bahwa umur pakai berkurang hingga setengahnya dengan peningkatan temperatur sebesar 10°C.

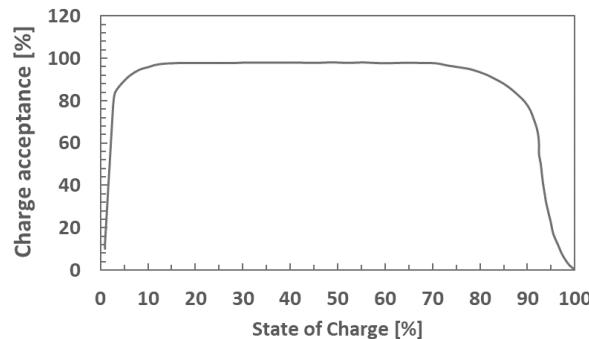


Rancangan umur pakai OPzV sebagai fungsi temperatur ruangan²

¹ Hoppecke, "Installation, commissioning and operating instructions for valve-regulated stationary lead-acid batteries," 2013.

² Hoppecke, "Installation, commissioning and operating instructions for valve-regulated stationary lead-acid batteries," 2013.

- *Swallow discharge* atau pelepasan energi baterai dengan *depth of discharge* yang sangat rendah, dapat mengurangi *charge acceptance* atau efisiensi baterai. Dianjurkan untuk menggunakan baterai secara efektif setidaknya hingga mencapai 30% DoD.



Charge acceptance dari baterai lead acid³

- Arus pelepasan energi (*discharging current*) → Semakin tinggi arus yang dipakai maka semakin rendah kapasitas yang dapat digunakan.
- Pengaturan tegangan pengisian. Tegangan yang tinggi saat pengisian baterai diatas batas yang ditetapkan dapat menyebabkan pengisian berlebih pada baterai. Hal ini dapat mengakibatkan proses timbulnya gas sehingga mengurangi jumlah cairan.

II. Pengisian baterai

Selama proses pengisian, khususnya di tahap absorpsi, terjadi pemuaian gas di dalam baterai karena pemisahan air menjadi oksigen dan hidrogen sebagai akibat dari proses elektrolisis. Gas terperangkap di dalam baterai dengan tekanan rendah dan membentuk air. Dalam beberapa kasus, ketika tekanan meningkat secara signifikan dan mencapai batasnya, katup akan melepaskan gas sehingga cairan elektrolit akan berkurang. Dalam hal ini, konsentrasi gas hidrogen meningkat di dalam ruangan sehingga harus disediakan ventilasi yang baik. Fungsi katup baterai penting untuk dijaga agar dapat mencegah kehilangan oksigen yang tidak perlu pada tekanan yang lebih rendah. Efek munculnya gas ini juga lambat laun menyebabkan karat pada pelat positif dari baterai.

➲ Bagaimana cara meningkatkan proses pengisian untuk memperpanjang umur pakai baterai?

- Bank baterai harus diisi sesuai dengan spesifikasi dengan metode pengisian tiga tahap, yaitu *bulk*, *absorption*, dan *float*. Pengisian dengan cara penyetaraan (*equalization*) tidak boleh dilakukan untuk baterai berjenis *lead acid* OPzV atau GEL.
- Hindari mengisi daya baterai dengan tegangan sangat tinggi yaitu tegangan maksimum sebesar 2,4 V selama tahap *bulk* dan *absorption*. Arus pengisian baterai tidak boleh lebih tinggi dari tingkat C10 dari bank baterai. Daya baterai yang berlebihan menyebabkan berkurangnya kapasitas, peningkatan konsentrasi asam di dalam elektrolit, serta baterai yang terlalu panas.

³ D. Linden and T. B. Reddy, "Handbook of batteries," 2001.

- Selama pengiriman dan penyimpanan, baterai kehilangan sebagian dayanya karena terjadinya *self-discharge*. Oleh karena itu, selama komisioning disarankan untuk mengisi baterai minimal selama 16 jam dengan tegangan tetap.



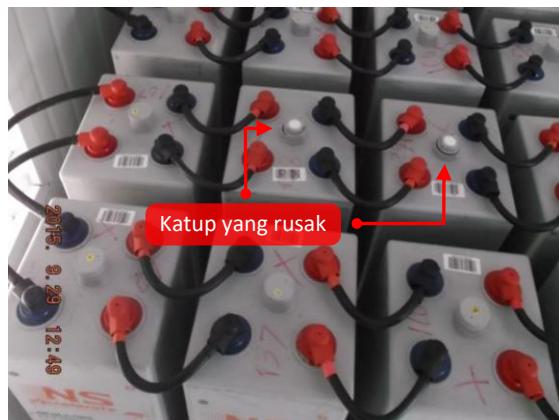
- Katup dengan kondisi baik mencegah kehilangan oksigen yang tidak perlu selama pengoperasian normal.



- Tanda adanya kebocoran bahan kimia aktif baterai dari katup.



Asam sulfat bersifat korosif dan berbahaya yang dapat menyebabkan cedera serius serta kebutaan. Hindari kontak dengan kulit dan segera bersihkan dengan air jika terkena cairan ini. Selalu gunakan sarung tangan yang diinsulasi saat membersihkan cairan.



- Katup baterai yang rusak akan mudah mengeluarkan sebagian gas dan mengurangi kapasitas baterai.



- Kantong plastik digunakan untuk menutup katup pelepas tekanan.
- Katup yang rusak sebaiknya diganti.
- Tekanan yang berlebihan dapat merusak baterai.

⌚ Mengapa katup yang rusak tidak boleh dipasang?

- Kerusakan katup baterai dapat menyebabkan kebocoran gas hidrogen dan mungkin elektrolit. Kebocoran campuran hidrogen dan oksigen dapat menyebabkan risiko ledakan apabila kandungan hidrogen di udara mencapai 4%, sementara elektrolit sangat berbahaya dan korosif jika tumpah.
- Pelepasan oksigen pada tekanan rendah akan menyebabkan kerugian yang tidak dapat diperbaiki



Pastikan baterai dalam kondisi yang baik tanpa adanya kerusakan sebelum dipasang. Baterai harus dikemas dengan benar selama pengiriman. Jangan pasang baterai dengan katup yang rusak atau terminal yang rusak.



- Terminal baterai dalam kondisi baik dan bebas dari korosi dan kristal sulfida.



- Korosi pada terminal mengurangi luas permukaan pada timbal dan meningkatkan tahanan internal baterai.



- Tanda kebocoran bahan kimia aktif mengenai rak baterai, disebabkan oleh pelepasan gas yang berlebihan (pengisian yang berlebihan).



- Munculnya kristal sulfat dapat menyebabkan korosi pada rak baterai. Bersihkan baterai dan kurangi tegangan pengisian jika perlu.

⇒ Bagaimana cara menghindari korosi pada terminal?

- Baterai harus diisi penuh setidaknya setiap bulan dan lakukan siklus pengisian baterai. Caranya dengan memutus beban agar baterai terisi penuh dan menghubungkannya kembali untuk melepas energi baterai. Jangan mengisi penuh baterai dan membiarkan baterai kurang terisi karena menyebabkan korosi atau munculnya kristal sulfida (*sulphation*) pada terminal negatif.
- Baterai tidak boleh disimpan dalam waktu yang sangat lama dan dibiarkan pada kondisi *SoC* yang rendah.
- Hindari kontak langsung antara timbal (terminal baterai) dengan tembaga (konduktor).

■■■ Batasan temperatur

Temperatur ruang yang ideal dari ruang baterai harus berada di antara 20° C hingga 30° C. Di beberapa lokasi, temperatur luar mungkin lebih tinggi. Dalam hal ini, perbedaan temperatur antara ruang dalam dan luar ruang sebaiknya tidak lebih tinggi dari 2° C.



- Temperatur ruang baterai yang dapat diterima dan ideal. Peningkatan sebesar 4° C dari nominal hanya akan mengurangi 20% dari umur pakai.



- Temperatur ruang baterai yang sangat tinggi menyebabkan penurunan umur pakai baterai yang signifikan, yaitu lebih dari 50%.



- Sensor temperatur dari *solar charge controller* berada di bagian tengah badan baterai.



- Sensor berada di tutup baterai.
- Sensor tidak dapat mengukur temperatur pelat tubular secara akurat.



Perbedaan temperatur antar bank baterai tidak boleh lebih besar dari 3°C. Penyimpangan temperatur akan menyebabkan kondisi pengoperasian yang berbeda dan menyebabkan penurunan umur pakai yang berbeda pula.

⇒ **Bagaimana cara menentukan baterai yang buruk?**

- Baterai yang rusak dapat dilihat dari peningkatan temperatur yang terjadi ketika pengisian atau pemakaian karena tahanan internal yang tinggi dari baterai yang rusak.
- Tahanan internal yang tinggi juga dapat dilihat dari peningkatan atau penurunan tegangan yang signifikan selama pengisian dan pemakaian. Baterai yang buruk cenderung mencapai tahap *absorption* lebih cepat dalam proses pengisian atau mengalami pemutusan yang lebih awal dalam proses pelepasan dan lebih cepat habis.
- Deviasi dalam tegangan rangkaian terbuka yang lebih besar dari 0,5 V menandakan bahwa baterai tidak pada *state of charge* dan *state of health* (SoH) yang sama.

6.3. Interkoneksi bank baterai

Bank baterai terdiri dari satu rangkaian atau beberapa rangkaian baterai yang terhubung secara paralel. Satu rangkaian terdiri dari sel baterai individual yang dihubungkan secara seri. Masing-masing sel menghasilkan tegangan sekitar 2,1 V untuk baterai *lead acid* dan bervariasi tergantung pada teknologi baterai serta kondisi *state of charge*-nya. Bank baterai kemudian dikonfigurasi berdasarkan tegangan sistem yang diinginkan (tegangan baterai) dan kapasitas.

Ketika membutuhkan tegangan yang lebih tinggi, baterai dengan kapasitas yang sama dihubungkan secara seri sampai tegangan rangkaian baterai mencapai tegangan yang dibutuhkan, biasanya senilai 48 VDC. Sementara untuk meningkatkan kapasitas, rangkaian baterai dengan tegangan dan karakteristik nominal yang sama dihubungkan secara paralel.

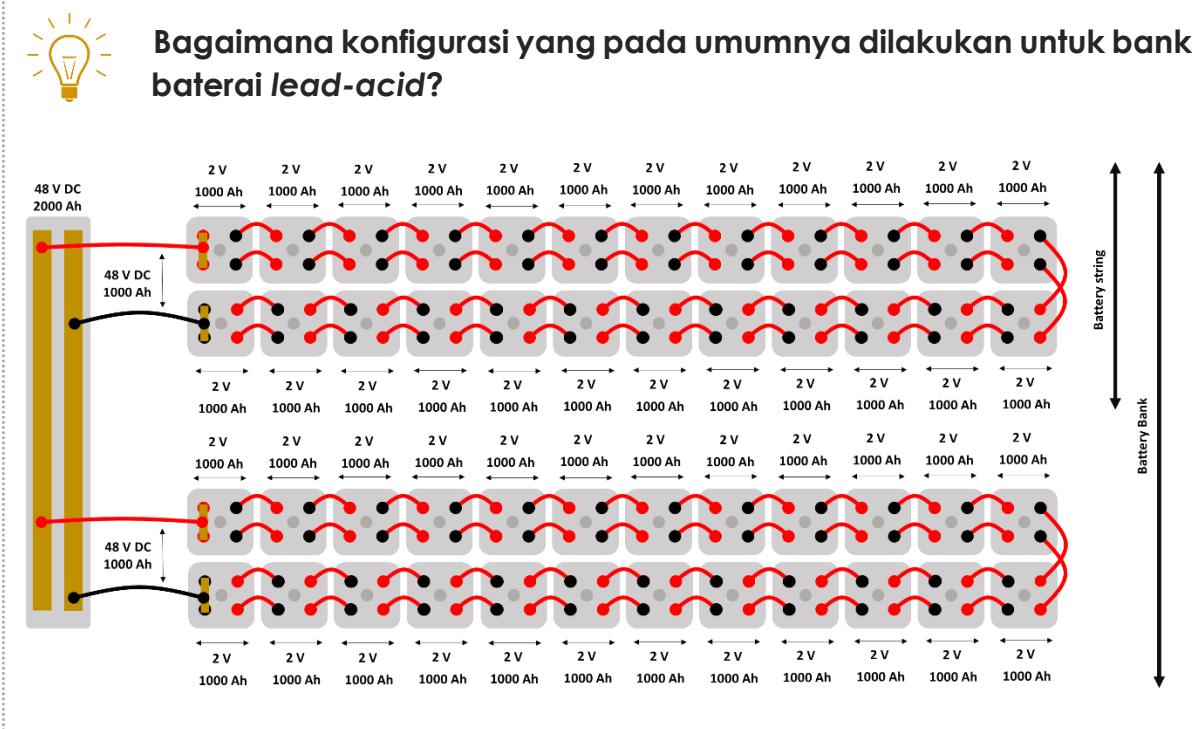
⇒ **Apa yang harus dipertimbangkan saat menghubungkan baterai?**

- Sebaiknya hanya menyambungkan baterai dengan teknologi, pabrikan, jenis, kapasitas nominal, serta *state of health* yang sama di bank baterai. Karakteristik yang berbeda dapat mengakibatkan pengisian dan pemakaian yang tidak efisien bahkan mungkin merusak baterai.
- Ketidakcocokan kapasitas baterai dapat menyebabkan baterai yang lebih besar tidak terisi penuh dan baterai yang kecil akan terisi penuh bahkan berlebih. Selama berlangsungnya pemakaian, baterai yang kecil akan habis lebih cepat dan memungkinkan membuat rusak baterai.
- Sebaiknya tidak menghubungkan lebih dari empat (4) *string* baterai secara paralel, untuk menghindari masalah pengisian dan pemakaian karena adanya perbedaan *state of charge* dan *state of health* dari setiap rangkaian.
- Perangkat proteksi arus berlebih harus dipasang pada setiap sisi positif dan negatif dari rangkaian baterai. Perangkat proteksi arus berlebih tersebut harus ditentukan berdasarkan $1,25 \times$ tegangan baterai dan $1,25 \times$ kemungkinan pengisian atau pemakaian arus, biasanya $I_{10-rate}$. Kompensasi untuk temperatur maksimal 45°C harus diterapkan dalam perhitungan.

- Baterai di bank baterai harus berada pada *state of health* dan *state of charge* yang sama. *State of charge* dilihat dari tegangan setiap sel selama kondisi rangkaian terbuka atau tanpa beban. Tegangan di tiap sel sebaiknya tidak memiliki perbedaan hingga 0,02 V atau mengacu pada ketentuan pabrikan. *State of charge* harus disesuaikan sebelum pemasangan dilakukan.
- Tegangan, arus, dan temperatur baterai harus diperiksa secara berkala untuk dapat mengambil tindakan pencegahan jika tegangan dan temperatur baterai menunjukkan penurunan *state of health*.



Bagaimana konfigurasi yang pada umumnya dilakukan untuk bank baterai lead-acid?



Kabel NYAF 50 mm² digunakan untuk menangani maksimum 104 A. Faktor koreksi karena temperatur ruangan dan pengelompokan yang digunakan adalah 0,75.



Kabel NYAF berukuran kecil digunakan dalam rangkaian baterai yang mungkin dilalui arus lebih tinggi dari kelas (*rating*) kabelnya.



- Kabel interkoneksi antara sel baterai memiliki panjang dan tahanan yang sama.



- Kabel paralel dengan panjang yang berbeda menyebabkan tahanan kabel yang berbeda.



- Meski jenis dan luas penampangnya mirip. Kabel dengan insulasi warna kabel *grounding* tidak bisa digunakan untuk konduktor aktif.



- Warna kabel yang berbeda untuk terminal yang sama dapat membingungkan. Pemanjangan kabel menyebabkan rugi-rugi tambahan.

⦿ Bagaimana cara untuk meningkatkan kualitas pengkabelan?

- Kabel untuk rangkaian baterai harus dirancang dengan baik untuk mengakomodasi arus selama pengisian dan pemakaian daya, serta memiliki ukuran kabel (rating) yang lebih tinggi dari ukuran gawai proteksi arus berlebih di rangkaian tersebut. Sebaiknya tiap kabel rangkaian baterai berpenampang minimal 50 mm^2 , meski nilai aktual seharusnya mengikuti arus beban.
- Gunakan jenis kabel, panjang, penampang lintang, dan pengaturan kabel yang serupa untuk memperoleh tahanan listrik dan penurunan tegangan yang sama diantara rangkaian baterai.
- Hindari memperpanjang kabel menggunakan konektor tambahan serta gunakan kabel yang utuh. Kualitas buruk dari konektor dan penyambungan kabel akan meningkatkan tahanan.



- Panel distribusi DC diatur secara merata untuk mencegah perbedaan panjang kabel antar rangkaian baterai.



- Perbedaan panjang kabel antara rangkaian baterai. Sebaiknya panel distribusi DC lebih dekat ke rangkaian baterai.

Panjang kabel antara perangkat proteksi arus berlebih dan terminal baterai harus sependek mungkin untuk menghindari penurunan tegangan yang signifikan. Hal ini dapat menyebabkan pemutusan awal di saat pengisian dan pelepasan energi.



- Kabel dipasang rapi di dalam konduit.
- Faktor koreksi pemasangan perangkat penutup (enclosed) dan terkelompok diterapkan sesuai IEC 60364-5-52.



- Kabel tidak dipasang di dalam konduit. Pemasangan kabel di dalam konduit akan melindungi kabel serta mencegah operator tersandung kabel.



Contoh mengenai cara untuk menentukan ukuran kabel bank baterai

1. Perkirakan kemungkinan pengisian dan pemakaian arus ke dan dari bank baterai. Ini bisa dilakukan dengan memeriksa arus DC maksimum dari charge controller dan inverter baterai.

Daya maksimum *inverter* baterai = 15.000 W
 Daya DC maksimum *solar charge controller* = 15.000 W
 Tegangan baterai = 48 V
 Jumlah bank baterai = 3

→

Arus pengisian = $15.000 / (48 \text{ V} \times 3) = 104 \text{ A}$
 Arus pemakaian = $15.000 \text{ W} / (48 \text{ V} \times 3) = 104 \text{ A}$

2. Perkirakan kondisi pemasangan untuk pengaturan suhu dan kabel

Metode pemasangan B1 → Kabel tunggal berinsulasi di dalam konduit (*conduit*) di dinding
 Perkiraan suhu ruang = 35 °C
 Jumlah pengelompokan kabel = 3

3. Masukkan faktor koreksi karena kondisi suhu ruang dan pengaturan kabel

$$\text{Koreksi suhu ruang} = 104 \text{ A} / 0,94 = 110,6 \text{ A}$$

$$\text{Faktor koreksi jumlah pengelompokan kabel} = 110,6 / 0,7 = 158 \text{ A}$$

158 A < Nilai arus dari kabel 70 mm² metode B1 (192 A)

4. Periksa silang dengan nilai arus MCB atau sekering. Nilai arus kabel harus lebih tinggi dari nilai arus MCB atau sekering pada faktor koreksi yang sama. Nilai arus dari MCB atau sekering harus 1,25 kali dari kemungkinan besarnya arus pengisian atau pemakaian

$$\text{Arus beban} \leq \text{Nilai arus dari peralatan proteksi} (1,25) \leq \text{Nilai arus kabel}$$

5. Hitung tegangan jatuh (*voltage drop*) yang mungkin timbul. Tegangan jatuh tidak boleh melebihi 1%

$$\text{Tegangan jatuh} = \frac{2 \times \text{arus beban} \times \text{tahanan} \times \text{panjang}}{1.000}$$

$$\frac{2 \times 104 \times 0,272 \times 5}{1.000} = 0,28 \text{ V} \rightarrow 0,5\% \rightarrow \text{OK}$$

Size (mm ²)	Current Rating for 2 x PVC Insulated Copper Conductors								
	Reference Installation Method								
	A1	A2	B1	B2	C	D1	D2	E	F
1,5	14,5	14	17,5	16,5	19,5	22	22	22	—
2,5	19,5	18,5	24	23	27	29	28	30	—
4	26	25	32	30	36	37	38	40	—
6	34	32	41	38	46	46	48	51	—
10	46	43	57	52	63	60	64	70	—
16	61	57	78	69	85	78	83	94	—
25	80	75	101	90	112	99	110	119	131
35	99	92	125	111	138	119	132	148	162
50	119	110	151	133	168	140	156	180	196
70	151	139	192	168	213	173	192	232	251
95	182	167	232	201	258	204	230	282	304
120	210	192	268	232	299	231	261	328	352
150	240	219	300	258	344	261	293	379	406
185	273	248	341	294	392	292	331	434	463
240	321	291	400	344	461	336	382	514	546
300	367	334	458	394	530	379	427	593	629
400	—	—	—	—	—	—	—	—	754
500	—	—	—	—	—	—	—	—	868
630	—	—	—	—	—	—	—	—	1006

°C	Ambient Temperature Derating Factor	
	PVC	EPR / XLPE
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

Nominal cross-sectional area mm ²	Resistance at 20 °C		Current Carrying Capacity at 30 °C max	Short circuit current of conductor at 1.0 sec max kA
	DC conductor max 0/km	Insulation min MΩ.Km		
1,5	13,3	50	15	24
2,5	7,98	50	20	32
4	4,95	50	25	42
6	3,30	50	33	54
10	1,91	50	45	73
16	1,21	40	61	98
25	0,780	40	83	128
35	0,554	40	103	158
50	0,386	30	132	197
70	0,277	30	165	245
95	0,206	30	197	290
120	0,161	30	235	345
150	0,129	20	—	390
185	0,106	20	—	445
240	0,0801	20	—	525
300	0,0641	20	605	34,50
400	0,0486	20	725	46,34

Installation	Above Ground Grouping on a Single Layer Derating Factor												Reference Method
	Number of Grouped Cables												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20	
Bunched in air, on a surface, embedded or enclosed	1.0	0.8	0.7	0.65	0.6	0.57	0.54	0.52	0.5	0.45	0.41	0.38	A to F
Single layer on wall, floor or unperforated cable tray systems	1.0	0.85	0.79	0.75	0.73	0.72	0.72	0.71	0.7	0.7	0.7	0.7	C
Single layer fixed directly under a wooden ceiling	0.95	0.81	0.72	0.68	0.66	0.64	0.63	0.62	0.61	0.61	0.61	0.61	C
Single layer on a perforated horizontal or vertical cable tray systems	1.0	0.88	0.82	0.77	0.75	0.73	0.73	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	E, F
Single layer on cable ladder systems or cleats etc.	1.0	0.87	0.82	0.8	0.8	0.79	0.79	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	E, F

Sumber tabel: IEC 60364-5-52⁴

⁴ International Electrotechnical Commission, "Low-voltage electrical installations - Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment - Wiring systems," 2009.

■■■ Penyambungan terminal baterai



- Terminal baterai diberi penutup papan akrilik dan diberi label dengan tanda bahaya tegangan.



- Terminal baterai terbuka, berpotensi jadi timbul hubungan arus pendek di baterai yang menyebabkan percikan dan ledakan.



- Terminal baterai terlindung dengan baik dengan bahan isolator, dan kabel dipasang dengan rapi.



- Karton digunakan untuk menutupi terminal baterai. Solusi darurat ini tidak cukup menutup terminal.



Terminal baterai selalu memiliki tegangan, oleh karena itu jangan meninggalkan terminal tanpa proteksi. Bagian logam dapat memicu hubungan arus pendek yang tidak disengaja. Gunakan kunci baut yang terisolasi ketika memasang sambungan.



● Konektor terminal dilengkapi dengan pelindung karet.



● Penggunaan selang plastik yang salah untuk mengisolasi terminal baterai.



● Pelat konektor digunakan untuk menghubungkan terminal akhir dari rangkaian baterai.



● Hanya satu kabel yang terhubung ke terminal. Perlu disediakan pelat sambungan.



Pastikan bahwa baterai selalu bersih dari debu dan uap air yang berlebihan untuk meningkatkan jarak rambat (*creepage distance*) di antara terminal. Gunakan hanya lap kain yang dibasahi air untuk membersihkan baterai. Lap yang kering dapat menyebabkan timbulnya muatan elektrostatik melalui gesekan dan meningkatkan risiko ledakan.

6.4. Instalasi bank baterai

⇒ Apa yang harus dipertimbangkan ketika memasang baterai?

- Pemasangan baterai mencakup penyusunan, pemasangan pada rak, dan persyaratan ruang baterai harus didasarkan pada IEC 62485-2 - *Persyaratan keselamatan untuk baterai sekunder dan instalasi baterai - Bagian 2: Baterai stasioner*.
- Baterai dapat disusun secara vertikal atau horizontal. Namun, perlu ada tanda peringatan khusus dari produsen seperti indikator panah ketika memasang baterai secara horizontal. Pastikan bahwa pelat internal disusun secara vertikal (polaritas yang sama disusun vertikal).
- Baterai harus dipasang pada rak yang stabil dan kokoh untuk mencegah baterai jatuh serta untuk pendinginan yang lebih baik.
- Ruang baterai harus memiliki ventilasi yang memadai untuk mencegah konsentrasi gas hidrogen yang tinggi di dalam ruangan selama pengisian. Baterai *lead acid* dapat menghasilkan gas hidrogen yang dapat terbakar karena adanya busur listrik atau percikan api.

■■■ Lokasi dan tata letak



- Rangkaian baterai secara zig-zag dengan ventilasi mencegah paparan sinar matahari secara langsung.



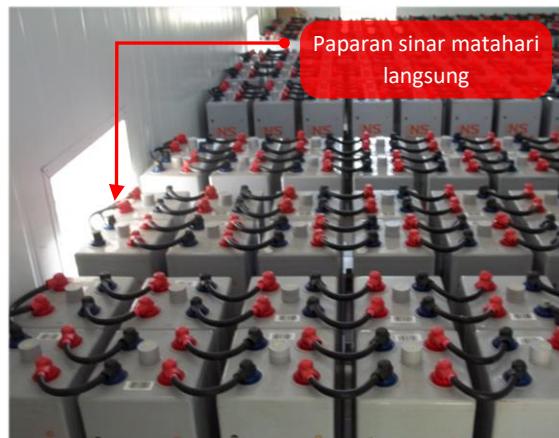
- Beberapa baterai terpapar sinar matahari langsung. Pemanasan dalam jangka panjang dapat memperpendek umur pakai baterai tersebut .



Bank baterai tidak boleh ditempatkan dekat dengan sumber panas atau di tempat yang langsung terkena sinar matahari. Temperatur tinggi dapat menyebabkan berkurangnya umur pakai, kebocoran, atau bahkan ledakan.



- Jarak yang cukup antara baterai dan dinding. Konfigurasi ini mengalirkan udara lebih baik dan lorong yang lebih besar untuk pemeliharaan.



- Ruang terlalu sempit antara dinding rumah pembangkit dan baterai. Paparan sinar matahari dapat meningkatkan temperatur baterai.



- Sel baterai dipasang dengan jarak yang cukup agar baterai dapat melepaskan panas.



- Jarak antar sel baterai yang tidak memadai. Harus disediakan jarak minimum sebesar 1 cm.



- Bank baterai dipasang dengan ruang yang cukup di antara rangkaian baterai.



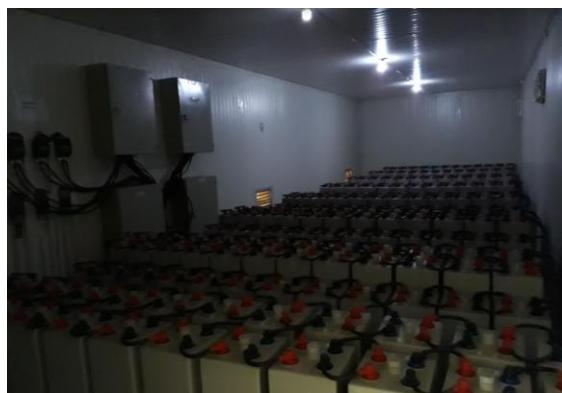
- Baterai yang sangat banyak di dalam ruangan dapat meningkatkan sumber panas dan konsentrasi gas hidrogen di dalam ruangan.

⦿ **Bagaimana cara memperbaiki pemasangan diatas?**

- Rak baterai dengan dinding harus memiliki jarak yang cukup untuk mengakses baterai agar dapat dibersihkan. Semua baterai harus mudah diakses untuk pemeliharaan.
- Geser rak baterai dari dinding hingga berjarak 50 cm. Pastikan bahwa baterai tidak terkena sinar matahari secara langsung dan terdapat cukup ruang untuk melakukan perawatan.



- Ruang baterai dengan pencahayaan alami dan tanda peringatan yang terpasang di ruang baterai.



- Ruang baterai yang sangat gelap dengan ventilasi yang tidak memadai dan luminasi yang rendah. Sulit untuk melakukan perawatan.



Jauhkan baterai dari komponen yang dapat memercikan api sehingga mungkin menimbulkan kebakaran seperti: api terbuka, busur listrik, percikan api, atau muatan listrik statis.

⦿ **Bagaimana cara memperbaiki pemasangan seperti itu?**

- Jumlah baterai di dalam ruang baterai perlu dihitung berdasarkan ruang yang tersedia dan kemungkinan produksi gas selama pengisian. Jika jumlah baterai relative banyak, pastikan agar ventilasi mampu menyediakan laju aliran yang dibutuhkan. Biasanya, dibutuhkan laju aliran sebesar $6,8 \text{ m}^3/\text{h}$ untuk setiap $48 \text{ V} / 1000 \text{ Ah}$ selama berlangsungnya pengisian⁵. Hal ini membutuhkan bukaan ventilasi minimal sebesar 200 cm^2 .
- Sediakan pencahayaan alami dengan memberi ventilasi tambahan. Ventilasi tambahan juga akan meningkatkan aliran udara di dalam ruangan. Disarankan agar intensitas cahaya setidaknya 100 lx.
- Pasanglah tanda peringatan seperti tanda “Dilarang merokok”, risiko ledakan gas, bahan korosif, dan adanya aliran tegangan yang aktif, yang dapat dilihat jelas di ruang baterai.

⁵ North Star, “NSB OPzV Batteries - Tubular Gel Technology,” 2017.

■■■ Rak baterai

⇒ Apa yang harus dipertimbangkan dari rak baterai?

- Pastikan rak baterai dan lantai mampu menopang berat baterai.
- Semua barang yang dipasang di ruang baterai harus tahan korosi untuk memberikan dukungan yang stabil dan kokoh pada baterai relatif berat.
- Hindari penggunaan kayu, terutama di tempat yang banyak rayapnya.



- Baterai dipasang di dalam rak baterai dengan diberi pinggiran (edges) untuk menjaga agar baterai tidak jatuh.



- Baterai tidak dipasang dengan benar di rak atau tanpa penopang yang memadai.



- Rak baterai yang kokoh tanpa tanda korosi. Rak dilengkapi pelindung samping (sidebar) untuk melindungi baterai agar tidak jatuh.



- Rak yang terbuat dari kayu rawan terhadap rayap dan risiko kayu melapuk, sehingga dapat menyebabkan seluruh bank runtuh.



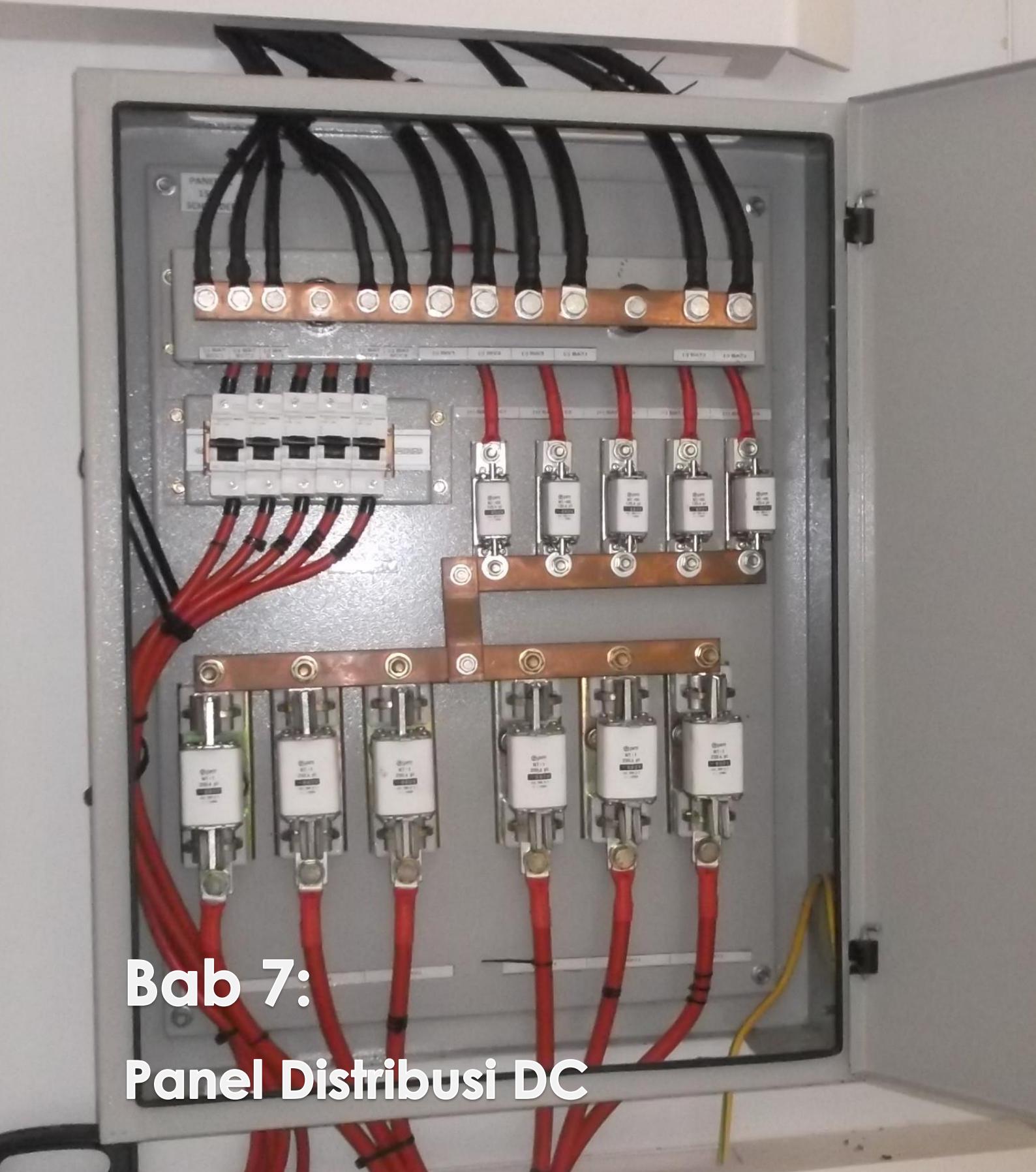
- Pemasangan baterai dengan susunan secara horizontal pada struktur rak besi yang dilapisi *hot-dip galvanis* tanpa adanya tanda-tanda korosi.



- Rak yang berkarat akan mengurangi ketebalan material yang mengakibatkan hilangnya kekuatan mekanik.



Mempertimbangkan berat masing-masing sel baterai kira-kira 70 kg sehingga totalnya adalah 1.680 kg untuk seluruh bank, melemahnya kekuatan material yang cukup serius akan menyebabkan kegagalan atau kerusakan struktural.



Bab 7: Panel Distribusi DC

- ✓ *Apa fungsi panel distribusi DC?*
- ✓ *Apa saja yang seharusnya ada di dalam panel ini?*
- ✓ *Contoh pemasangan panel yang baik dan kurang baik*

7.1. Dasar-dasar panel distribusi DC

Panel distribusi DC atau dikenal juga dengan DC *power distribution board* (DCPDB) adalah tempat terhubungnya *solar charge controller* (SCC), bank baterai, dan inverter baterai. Panel ini mendistribusikan daya DC yang dikonversi dari *solar charge controller* ke bank baterai dan dari bank baterai ke inverter baterai yang umumnya pada tegangan sistem 48 VDC. Panel distribusi DC pada umumnya terdiri dari *busbar* sebagai titik sambungan dan perangkat proteksi untuk melindungi bank baterai serta melindungi kabel dari SCC dan ke inverter baterai.



⌚ Apa yang harus diperhatikan ketika merancang sebuah panel distribusi DC?

- Kondisi temperatur ruangan dan rugi-rugi daya komponen berpengaruh terhadap panas di dalam panel. Pengelolaan panas yang baik diperlukan untuk menghindari penurunan daya mampu (*derating*) komponen yang disebabkan oleh panas berlebih.
- Pemisahan antara konduktor positif dan negatif harus dijaga agar tidak terjadi hubungan arus pendek yang tidak disengaja. Bank baterai memiliki kandungan energi yang tinggi, sehingga mungkin akan timbul percikan api yang berarti.
- Semua sambungan kabel harus dikencangkan dengan aman untuk mencegah bahaya kebakaran.

7.2. Selungkup pelindung

⌚ Apa yang harus dipertimbangkan untuk selungkup?

- Bahan polikarbonat, poliester, atau baja yang dicat dapat digunakan sebagai selungkup.
- Panel harus memiliki insulasi ganda atau kelas proteksi II. Selungkup memiliki beberapa lapisan bahan insulasi antara komponen-komponen internal dan permukaan selungkup untuk melindungi operator atau teknisi dari tegangan sentuh.
- Tindakan pengamanan tambahan seperti label dan perlindungan dari personel yang tidak berwenang harus disediakan karena sistem beroperasi pada tegangan maksimal 56 VDC yang dapat berbahaya untuk disentuh terutama pada kondisi basah.
- Panel distribusi harus diukur dengan benar sesuai jumlah SCC, inverter baterai, dan bank baterai yang perlu untuk dihubungkan.

■■■ Kualitas selungkup

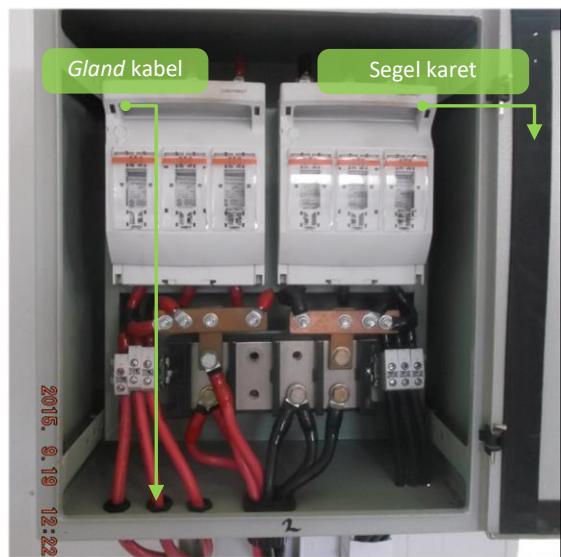
Panel harus memiliki kelas proteksi minimal IP 3X atau terlindung terhadap benda padat berukuran lebih besar dari 2,5 mm. Untuk mencapai hal ini, *gland* kabel pada tempat masuknya kabel harus digunakan dan ventilasi selungkup tidak boleh terlalu besar untuk mencegah binatang masuk.



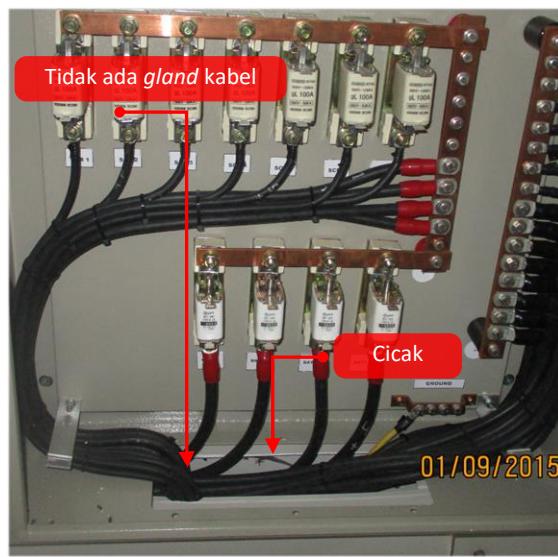
- Kotak terbuat dari polikarbonat yang memberikan insulasi yang baik dan diberi label bahaya sengatan listrik.



- Kotak tidak disambung pembumian dan penggunaan sealant akan membuat pemasangan kabel menjadi semi permanen.



- *Gland kabel* digunakan untuk mencegah masuknya binatang ke dalam panel.



- Lubang masukan kabel yang besar memberikan akses masuknya binatang.

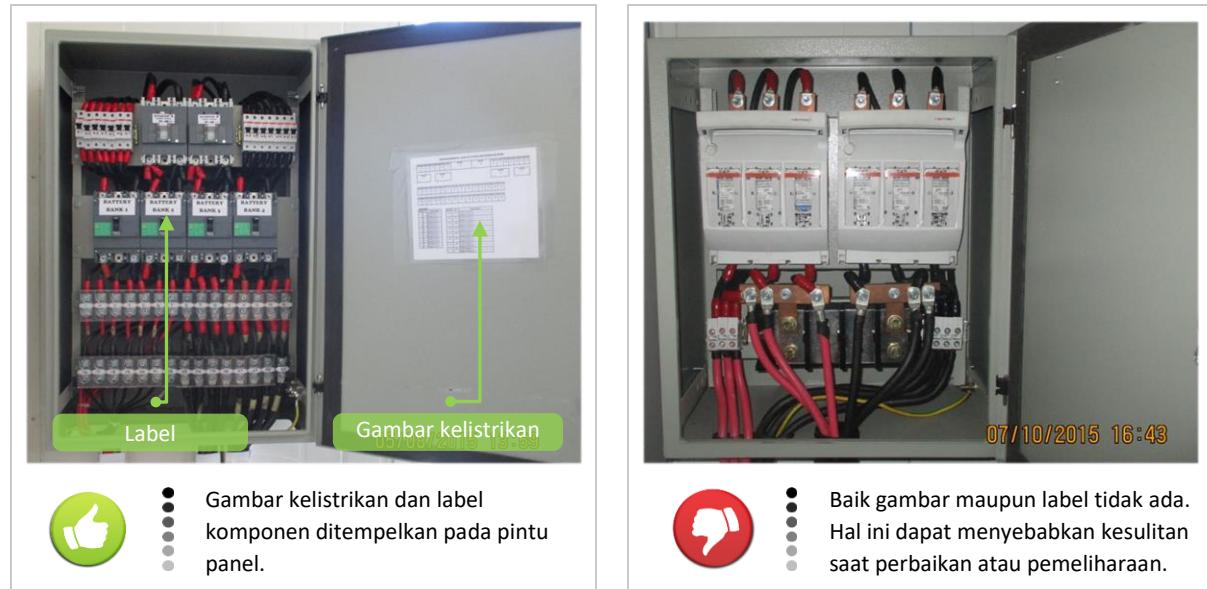
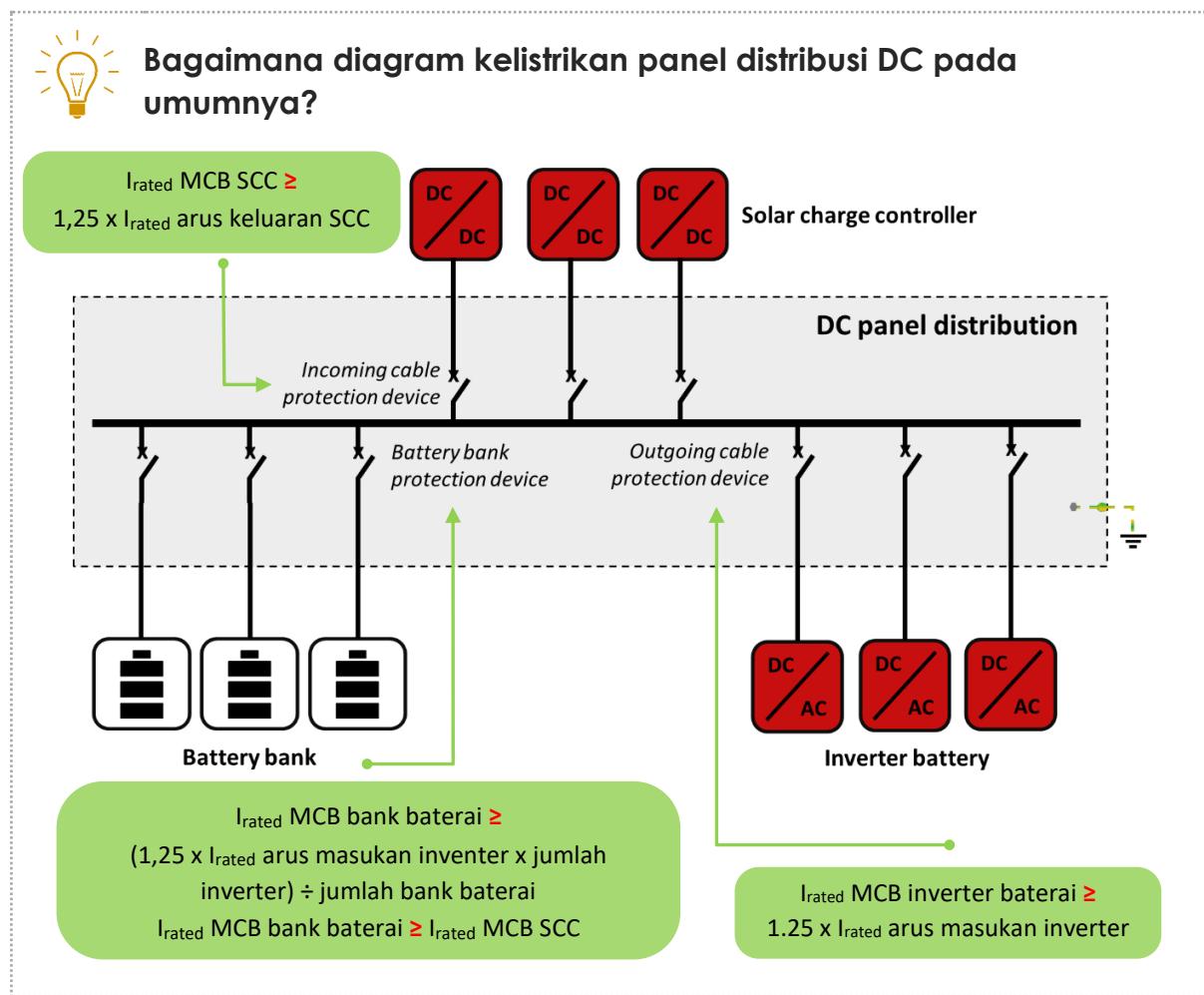
⇒ Bagaimana cara meningkatkan kualitas panel diatas?

- Tutup bukaan besar di tempat masuknya kabel dengan menggunakan papan yang kuat dan buatlah lubang untuk tempat *gland kabel*.
- Gunakan *gland kabel* yang tepat sesuai dengan penampang kabel dan pasang kembali semua kabel melalui *gland kabel* ini.
- Gunakan warna insulasi kabel yang benar untuk menghindari salah tafsir fungsi untuk setiap jenis kabel.
- Pintu harus ditutup rapat dan dikunci.
- Jika selungkup terbuat dari logam, pastikan panel dicat menggunakan spray anti karat.



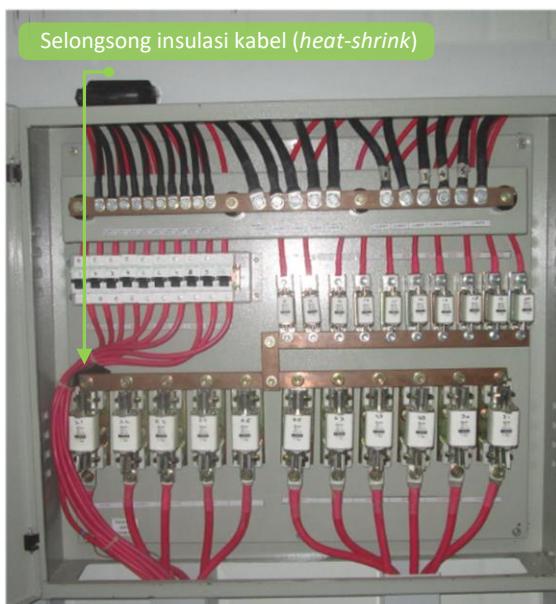
Panel harus aman untuk disentuh pada kondisi apapun. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan kotak yang memiliki insulasi ganda atau membumikan panel beserta pintunya, jika menggunakan bahan logam.

7.3. Komponen listrik di dalam panel distribusi DC





Gambar kelistrikan dan label untuk semua komponen harus tersedia di lokasi dan mungkin ditempelkan pada panel untuk membantu operator, teknisi, atau petugas pemeriksa untuk mengidentifikasi komponen yang terpasang.



- Jarak yang memadai antar komponen dan ruang internal yang lebih besar memungkinkan komponen listrik melepaskan panas.



- Pemasangan yang rapi namun relatif rapat. Pemasangan yang rapat dapat menimbulkan kesulitan untuk pengukuran dan pemeliharaan.

■■■ Perangkat proteksi arus lebih

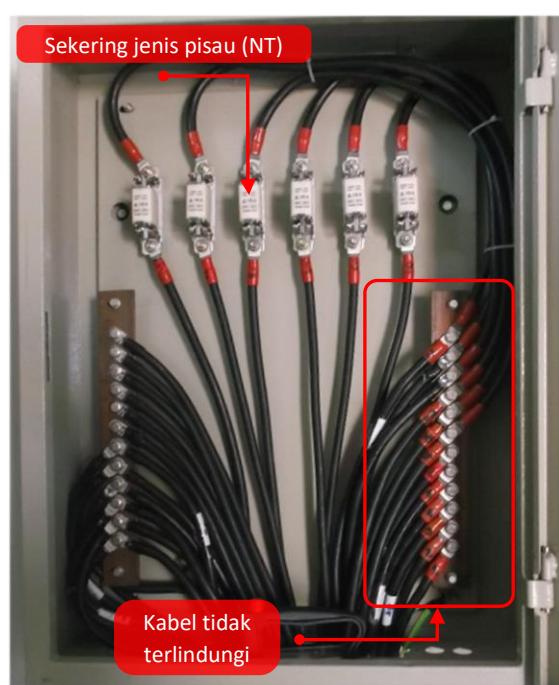
Perangkat proteksi melindungi kabel dan bank baterai dari arus berlebih dan hubungan arus pendek. Perangkat ini akan memutuskan perangkat atau jalur yang rusak jika terjadi hubungan arus pendek dan menjaga perangkat yang lain tetap beroperasi.

⦿ Apa yang harus diperhatikan ketika memasang perangkat proteksi?

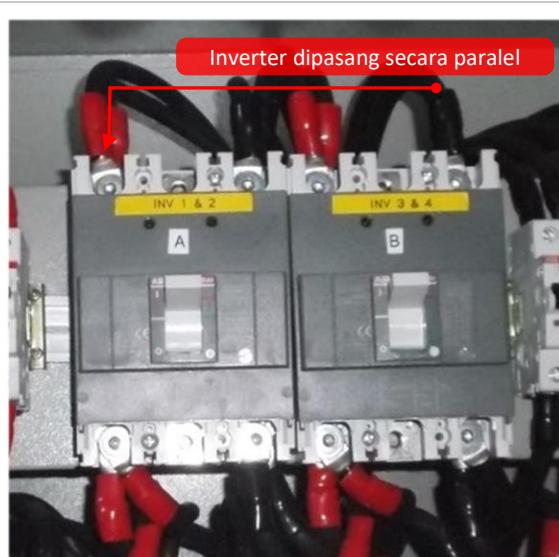
- Gunakan hanya perangkat proteksi yang telah terbukti memiliki kemampuan memutus arus DC dan dengan aman beroperasi pada tegangan sistem baterai.
- Dianjurkan menggunakan MCB dibandingkan sekering. MCB atau MCCB (*molded-case circuit breaker*) lebih sensitif, mudah mengidentifikasi kerusakan, dapat diset ulang, lebih aman, dan bisa memutus sambungan dengan mudah. Menggunakan sekering akan membutuhkan peralatan khusus dan suku cadang yang seringkali tidak tersedia di daerah pedesaan.
- Kemampuan perangkat proteksi untuk memilih untuk menjaga MCB, yang melindungi bank baterai, menjadi perangkat terakhir yang jatuh (*trip*) jika terjadi kerusakan.



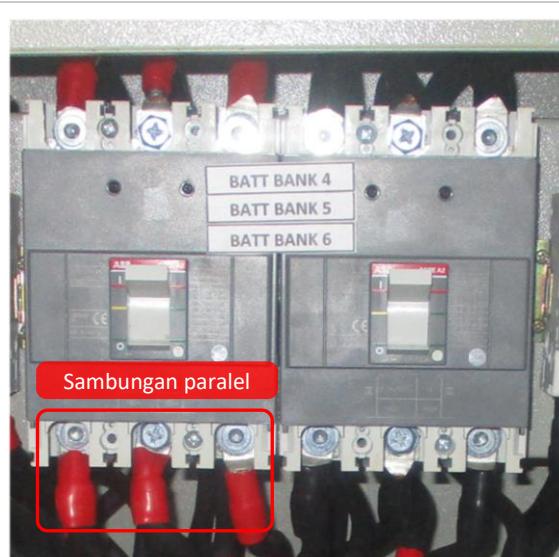
- Bank baterai, SCC, dan inverter baterai dilindungi oleh MCB dan MCCB di sisi positif dan negatif.



- Kabel dari SCC dan ke inverter baterai tidak terlindungi oleh perangkat proteksi.



- Dua inverter tersambung ke dalam satu terminal dari tiga kutub MCCB.



- Satu pemutus arus digunakan untuk melindungi tiga bank baterai.

➊ Bagaimana cara memperbaiki instalasi diatas?

- Pasanglah MCB khusus untuk tegangan DC pada setiap kabel masuk ke SCC dan kabel keluar dari inverter baterai.
- Jangan gabungkan beberapa instalasi ke dalam satu perangkat proteksi. Proteksi gabungan akan kehilangan fleksibilitas instalasi, misalnya tidak dapat memutus hanya jalur yang rusak.

- Pisahkan sambungan dan pasang MCB untuk setiap jalur.
- Ganti ukuran kabel dengan ukuran penampang yang benar. Kapasitas pembawa arus kabel setidaknya harus lebih besar dari arus maksimum yang mungkin masuk dan keluar dari bank baterai.



Penggunaan sekering sakelar-pemutus. Perangkat ini memberi perlindungan, keamanan, serta memudahkan penggantian sekering.



Menggunakan sekering standar tipe NT atau NH tanpa sakelar pemutus memerlukan penarik sekering dan mungkin menimbulkan busur listrik saat memutus hubungan.

➲ Apa yang harus diperhatikan ketika menggunakan sekering?

- Gunakan hanya jenis sekering sakelar-pemutus dan jenis yang tersedia secara luas di dalam negeri untuk memudahkan proses pemeliharaan dan perbaikan, serta untuk menghindari kesulitan dalam mencari komponen pengganti.
- Lakukan pemeriksaan secara rutin untuk memantau kondisi sekering. Pengukuran perlu dilakukan jika ada tanda-tanda terbakar.
- Kerusakan listrik harus ditemukan dan dihilangkan sebelum menyetel ulang (*reset*) MCB atau mengganti sekering.
- Harus disediakan sekering cadangan sebanyak 20% dari total jumlah sekering yang terpasang dengan ukuran dan kelas yang sama di dalam kotak.

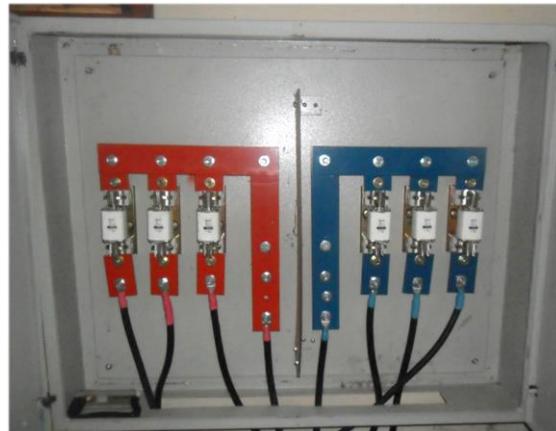


Jangan pernah menginterupsi rangkaian atau melepas sekering selama operasi atau jika sedang ada beban. Inverter baterai dan SCC harus dimatikan sebelum melepas sekering.

⌚ Tindakan pengamanan apa yang harus dipertimbangkan sebelum melakukan pemeriksaan?

- Pastikan SCC dan inverter baterai dalam keadaan tidak beroperasi dan buka MCB atau fuse yang menghubungkan komponen tersebut dengan busbar sebelum membuka sambungan baterai.
- Kabel yang terhubung ke bank baterai selalu teraliri arus. Gunakan sarung tangan karet berinsulasi untuk mencegah terkena sengatan listrik.

☰ Pemasangan busbar dan kabel



- Jarak antar busbar yang mencukupi. Terdapat pemisah untuk menghindari hubungan arus pendek yang tidak disengaja.



- Jarak antara busbar positif dan negatif yang sangat dekat. Penataan ulang komponen harus dilakukan.



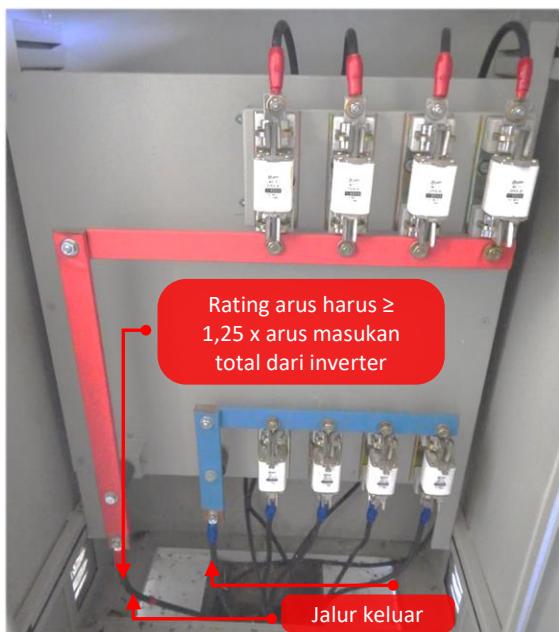
- Pemasangan busbar kanan- kiri secara horizontal membuat pemasangan jalur kabel lebih mudah dan pemisahan yang jelas.



- Beberapa kabel positif menyentuh busbar negatif dan sebaliknya dikarenakan letak busbar atas-bawah.



Pemisahan yang cukup antara terminal positif dan negatif diperlukan untuk menghindari hubungan arus pendek yang tidak diinginkan. Lebih mudah memisahkan sambungan jika dipasang dengan pengaturan kiri dan kanan. Lihat Bab 3 mengenai *cara memasang busbar positif dan negatif dengan aman*.



Kabel bank baterai memiliki ukuran kabel yang sama dengan kabel keluar dan tidak dilindungi oleh perangkat proteksi arus berlebih.



Temperatur kabel yang berlebih karena ukuran kabel yang terlalu kecil dan kabel tidak terlindungi oleh perangkat proteksi.



Jangan pernah membiarkan kabel tanpa proteksi arus lebih dan selalu gunakan ukuran kabel yang sesuai. Hitung kuat hantar arus yang diperlukan berdasarkan kemungkinan besarnya arus yang lewat serta metode pemasangannya¹.

¹ SNI 0225:2011 Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011)

Bab 8:

Inverter Baterai

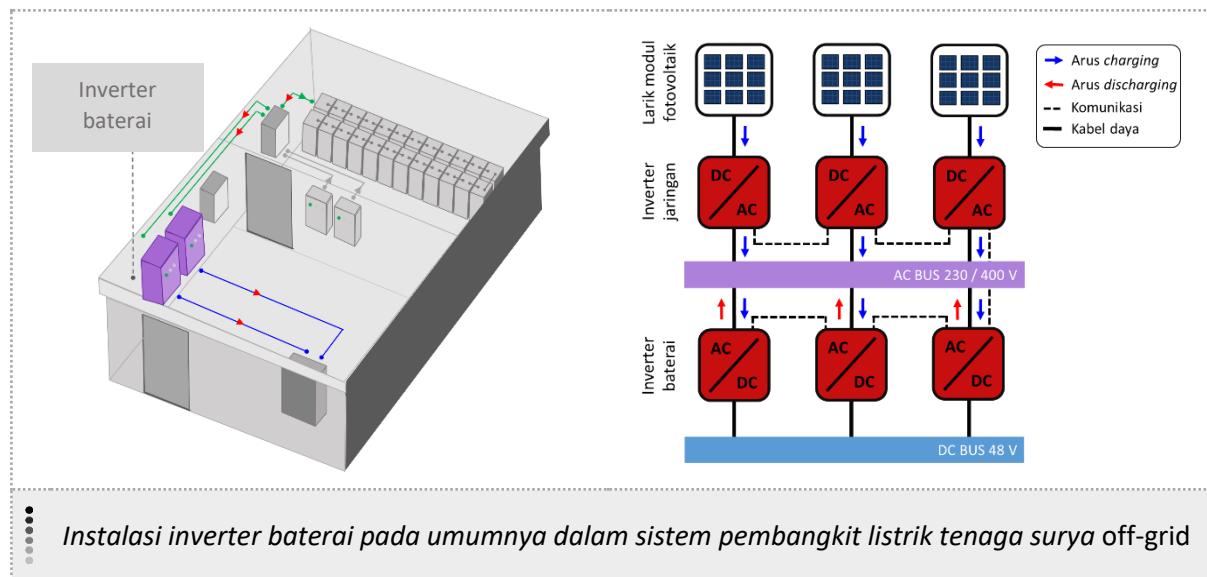
- ✓ *Apa fungsi dari inverter baterai?*
- ✓ *Contoh instalasi inverter baterai yang baik dan kurang baik*
- ✓ *Hal-hal yang harus dipertimbangkan pada saat melakukan pengaturan parameter*



8.1. Dasar-dasar inverter baterai

Inverter baterai atau juga dikenal sebagai inverter yang berdiri sendiri (stand-alone) adalah otak dari sistem PLTS *off-grid* berbasis komunal. Inverter baterai bertugas untuk membentuk jaringan distribusi AC dengan mengatur tegangan dan frekuensi dalam batas yang diijinkan dan menjaga keseimbangan energi di dalam jaringan. Inverter baterai biasanya dapat digunakan secara dua arah (*bidirectional*) atau satu arah (*unidirectional*) tergantung pada konfigurasi dari sistem. Dalam sistem penyambungan *AC-coupling*, inverter baterai berfungsi sebagai inverter (pengubah tegangan DC-AC) serta *charger* (pengubah tegangan AC-DC). Jika terdapat kelebihan energi dari modul fotovoltaik dan baterai tidak terisi penuh, inverter baterai bertindak sebagai *charger*. Dan jika terdapat kekurangan energi dan baterai masih memiliki energi yang tersisa, baterai akan mengeluarkan daya untuk memenuhi permintaan melalui inverter.

Beberapa inverter baterai dapat ditingkatkan dayanya atau diinterkoneksi secara modular untuk mencapai keluaran (*output*) yang lebih besar. Inverter baterai dapat dikonfigurasi secara paralel sebagai klaster tunggal (*single-cluster*) dalam konfigurasi satu fasa atau tiga fasa serta beberapa klaster (*multi-cluster*) dengan panel distribusi tambahan. Dalam konfigurasi *multi-cluster*, jika satu klaster tambahan bermasalah, yang lainnya masih dapat beroperasi.



⦿ Apa saja fungsi dari inverter baterai?

- Mengubah tegangan DC dari bank baterai (48 VDC) ke jaringan listrik AC 230 VAC
- Melindungi bank baterai dari pengisian yang berlebihan dengan mengurangi arus pengisian (*charging*) ketika baterai sudah penuh. Pengisian baterai yang berlebihan dapat menyebabkan timbulnya gas atau ledakan, tergantung pada teknologi baterai.
- Melindungi bank baterai dari terkurasnya energi secara berlebih (*deeply discharged*) dengan cara menghentikan keluaran ketika kondisi penyimpanan energi pada baterai (*state of charge*) turun di bawah batas minimum. Karena inverter baterai membutuhkan baterai untuk dapat beroperasi, terkurasnya daya baterai secara berlebih dapat menyebabkan tidak beroperasinya inverter baterai atau terhentinya pasokan daya listrik ke jaringan.

- Memantau tegangan dan arus pengisian serta tegangan dan arus pelepasan (*discharging*) dan energi ke dan dari bank baterai serta tegangan dan arus keluaran AC
- Saklar pemindah secara otomatis (*automatic transfer switch*) di saat inverter baterai terhubung ke sumber daya lain seperti jaringan listrik eksternal atau pembangkit listrik eksternal. Jaringan listrik eksternal atau pembangkit listrik eksternal dapat digunakan sebagai cadangan ketika kondisi penyimpanan daya baterai sedang rendah.



■■■ Spesifikasi inverter baterai



Bagaimana spesifikasi dari inverter baterai yang ideal?

- Minimal harus menggunakan **dua inverter baterai** untuk meningkatkan redundansi dalam sistem satu fasa dan tiga inverter dalam sistem tiga fasa. Lebih baik menggunakan merek atau tipe yang sama atau inverter manapun yang kompatibel yang direkomendasikan oleh produsen.
- **Inverter baterai harus dapat beroperasi secara paralel.** Kontrol daya inverter dilakukan dengan cara menyesuaikan frekuensi jaringan AC atau yang disebut sebagai *frequency shift power control* (FSPC). Jika baterai terisi penuh, frekuensi jaringan meningkat dan daya dari sumber daya lainnya seperti inverter jaringan menurun. Setelah tegangan baterai menurun, frekuensi jaringan juga menurun dan dengan demikian meningkatkan daya yang diperbolehkan masuk dari inverter jaringan.
- Fleksibel untuk **dikonfigurasi dalam sistem fasa tunggal atau tiga fasa** dan mudah diperluas dengan **konfigurasi multi-klaster**. Inverter juga kompatibel untuk konfigurasi TN.
- **Ukuran inverter baterai harus sesuai dengan beban rata-rata dan beban puncak yang beroperasi selama lebih dari 30 menit.** Perkiraan atau profil beban yang diukur harus ditetapkan untuk mengidentifikasi beban kontinyu dan beban puncak. Kapasitas (*rating*) inverter baterai tidak boleh lebih tinggi dari kapasitas modul fotovoltaik.

Kapasitas daya AC kontinyu @ 25°C ≥ Daya beban rata-rata

Kapasitas daya AC @ 25°C selama 30 menit ≥ Beban puncak selama 30 menit

Kapasitas daya kontinyu @ 25°C ≤ modul fotovoltaik

- Efisiensi yang tinggi ($\geq 94\%$) pada tegangan puncak sistem dan dilengkapi dengan MPPT.
- Dilengkapi dengan sistem proteksi berikut ini:
 - **Proteksi arus lebih dan arus hubung pendek di sisi tegangan AC**, perangkat harus dilindungi terhadap beban berlebih dan hubungan pendek selama pemakaian.
 - **Proteksi tegangan tinggi baterai**, yang secara otomatis menghentikan proses pengisian ketika tegangan baterai mencapai batas yang ditetapkan untuk menghindari pengisian baterai yang berlebihan (*overcharge*).
 - **Proteksi tegangan rendah baterai**, yang secara otomatis mengalihkan inverter ke status siaga atau benar-benar mati bila tegangan baterai atau *SoC* berada di bawah batas yang telah ditetapkan untuk menghindari penggunaan energi yang berlebih (*deeply discharged*) pada baterai.
 - **Pengisian baterai dengan kompensasi temperatur (*temperature-compensated battery charging*)** adalah kemampuan inverter baterai dalam mengendalikan tegangan pengisian berdasarkan temperatur baterai.
- **Tampilan antar muka yang ramah pengguna** yang menunjukkan status inverter baterai dan *SoC* dari bank baterai. Sistem manajemen baterai harus didasarkan pada penetapan *SoC* yang tepat. Ini akan membantu operator atau teknisi untuk memantau sistem dengan mudah.
- **Pengambilan data atau pemantauan data** untuk mendapatkan data kinerja dari sistem secara langsung dari inverter atau melalui sistem pemantauan jarak jauh yang terpisah.
- **Sesuai dengan tegangan sistem dan teknologi baterai yang terpasang** (yaitu baterai *lead-acid*, *lithium-ion*, *zinc-air*, dll.). Inverter harus dapat beroperasi dengan tegangan sistem sebesar 48 VDC. Pengisian dan pengeluaran arus dan tegangan inverter baterai tidak boleh lebih tinggi dari nilai yang diizinkan dari baterai yang terpasang. Batas proteksi tegangan tinggi (*high-voltage disconnect*) dan proteksi tegangan rendah (*low-voltage disconnect*) baterai harus dikonfigurasi secara berbeda untuk setiap teknologi baterai. Jika jenis baterai lithium-ion atau zinc-air yang dipakai, sistem manajemen baterai (*battery management system, BMS*) harus mampu membangun komunikasi dengan inverter.

Max. arus pengisian dari SCC $\leq I_{10}^*$ baterai (*lead-acid*)

Tegangan pada tahap *bulk* dan *absorption* \leq Tegangan maksimum baterai

* I_{10} atau arus pelepasan nominal dalam 10 jam (Kapasitas [Ah] / 10 jam)

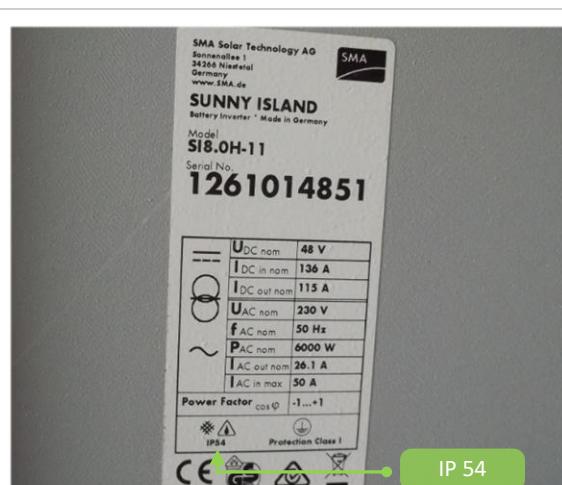
- **Diujji dan disertifikasi sesuai dengan standar IEC 61000, IEC 62109, dan IEC 61683.** Standar ini menjelaskan gangguan kompatibilitas elektromagnetik (*electromagnetic compatibility*, EMC), keselamatan unit konversi daya, dan panduan mengenai cara mengukur efisiensi inverter yang digunakan dalam sistem yang berdiri sendiri (*stand-alone*).
- **Diproduksi oleh perusahaan terkemuka** yang memiliki rekam jejak yang baik dan prosedur garansi yang jelas.
- **Rating ingress protection (IP)** dari inverter baterai setidaknya IP 40 untuk pemakaian di dalam ruangan (*indoor*) untuk menghindari masuknya serangga, debu, zat korosif, kelembaban dan air.



Tiga inverter dari jenis Leonics Apollo S-219C terhubung secara paralel menghasilkan daya keluaran total 15 kW.



Tiga inverter dari jenis Kehua Tech DBX 12-5 kW dipasang untuk menghasilkan daya keluaran sebesar 15 kW.



Rating IP54 memberikan perlindungan terhadap debu dan percikan air yang dapat menyebabkan kerusakan

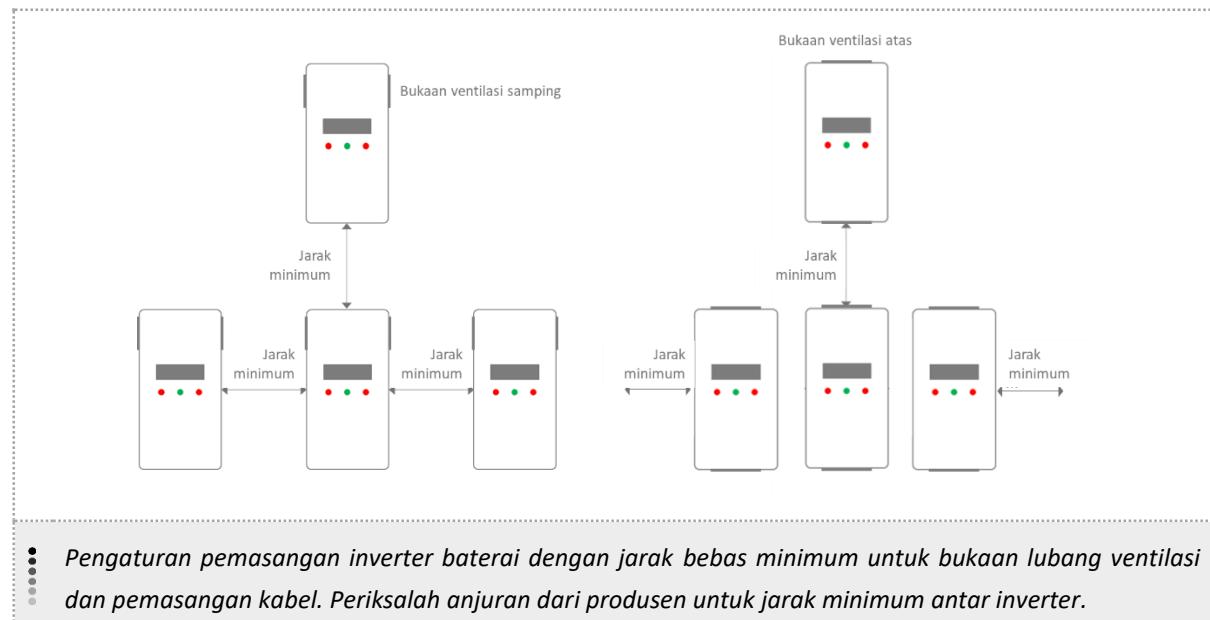


Rating IP yang rendah dapat menyebabkan benda-benda kecil seukuran 12,5 mm untuk dapat memasuki kompartemen

8.2. Instalasi dan interkoneksi perangkat keras inverter baterai

■■■ Lokasi dan penyusunan unit

Inverter baterai harus dipasang di dalam rumah pembangkit untuk melindungi perangkat dari paparan sinar matahari secara langsung dan lingkungan yang keras. Pengelolaan panas yang baik di dalam ruangan harus dipertimbangkan dengan menyediakan sirkulasi aliran udara yang baik. Jarak bebas yang cukup antara inverter baterai harus dijaga untuk memungkinkan terjadinya pembuangan panas.



Jarak bebas yang memadai antara inverter untuk memastikan pasokan udara dan memungkinkan terjadinya pelepasan panas.



Inverter baterai dipasang sangat dekat satu sama lain. Ventilasi terhalang oleh konduit kabel.



- Lubang bukaan ventilasi bebas dari benda-benda yang memungkinkan untuk terlepasnya udara hangat.



- Lubang bukaan ventilasi dari inverter baterai terhalang oleh benda-benda asing.



Lubang bukaan ventilasi dari inverter baterai tidak boleh terhalang oleh benda apa pun untuk menghindari peningkatan panas yang signifikan pada inverter. Meningkatnya panas akan mengurangi daya keluaran. Ventilasi inverter baterai harus dibersihkan secara teratur dari penumpukan debu.



- Bagian depan inverter baterai memiliki jarak bebas lebih dari satu meter.



- Jarak bagian depan yang tidak mencukupi dapat menyebabkan kesulitan saat melakukan perbaikan dan pemeliharaan.

⌚ Bagaimana cara meningkatkan penyusunan inverter?

- Posisi inverter baterai harus diatur berdasarkan tata letak yang disarankan oleh produsen. Tergantung pada lokasi ventilasi, jarak minimum antar inverter dianjurkan tidak kurang dari 30 cm untuk menyediakan ruang pelepasan panas dan untuk pemasangan kabel. Jarak bebas pada sisi depan inverter juga tidak boleh kurang dari 1 meter.
- Pastikan temperatur ruangan dari rumah pembangkit tidak melebihi 35°C atau perbedaan antara temperatur ruangan dan luas tidak lebih dari 2°C dikarenakan inverter yang dipasang di dalam ruangan yang jumlahnya berlebihan.





- Struktur penopang dari kayu digunakan untuk menambah ketinggian instalasi inverter.



- Inverter baterai dipasang di atas blok beton yang berdiri bebas sangat beresiko jatuh.

⇒ Bagaimana cara memperbaiki instalasi diatas?

- Karena kayu rentan terhadap kerapuhan akibat basah, ganti struktur penopang dengan struktur logam anti korosi. Jika rumah pembangkit tidak rawan banjir, inverter baterai dapat dipasang diatas lantai secara langsung.
- Blok beton yang berdiri bebas sangat tidak stabil. Pergerakan pada inverter dapat dengan mudah menyebabkan robohnya seluruh instalasi. Gunakan struktur yang lebih stabil untuk menambah ketinggian instalasi inverter.

■■■ Pemasangan kabel inverter baterai

⇒ Mengapa pemasangan inverter baterai harus dilakukan dengan benar?

- Mengurangi risiko terjadinya kabel yang terlalu panas, gangguan listrik, dan mungkin bahaya sengatan listrik pada operator atau teknisi.
- Agar pengoperasian paralel antar inverter baterai master dan slave serta antara klaster utama dan kluster tambahan dapat berjalan dengan baik.
- Memperoleh data pengukuran dari inverter baterai melalui kabel komunikasi.



- Inverter baterai dan kabel dipasang dengan rapi dan kabel dipasang melalui saluran kabel.



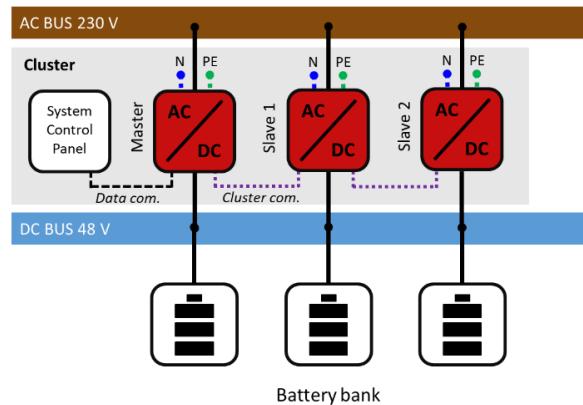
- Kabel yang sangat panjang mengurangi efisiensi sistem dan menambah jatuh tegangan.



Bagaimana konfigurasi dari beberapa inverter baterai yang dihubungkan secara paralel?

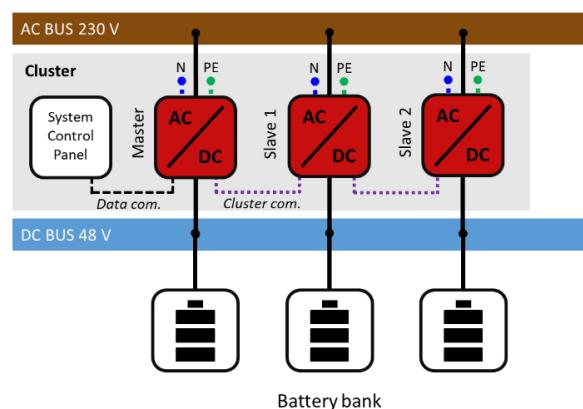
- **Satu klaster, satu fasa**

Dalam konfigurasi ini, tiga atau empat inverter baterai (tergantung pada merek) terhubung pada sebuah bank baterai dan membentuk klaster. AC keluaran dari inverter baterai terhubung secara paralel pada jaringan distribusi satu fasa. Komunikasi klaster atau sinkronisasi AC harus terhubung antar inverter baterai di dalam klaster yang sama.



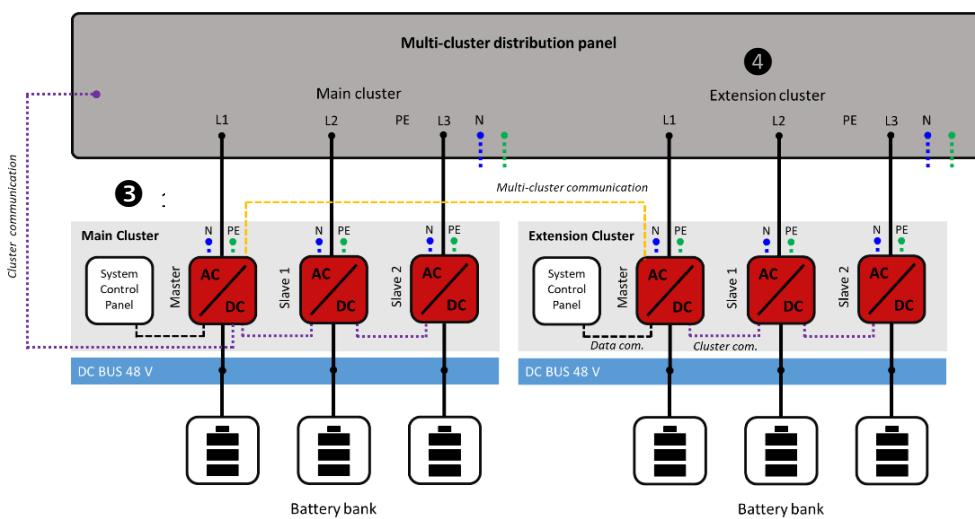
- **Satu klaster, tiga fasa**

Tiga inverter baterai dihubungkan secara paralel di bus DC dan membentuk sistem distribusi tiga fasa. Setiap inverter baterai mewakili satu fasa dari tiga fasa dan beroperasi pada pergeseran fasa sebesar 120° atau 240° antara satu sama lain.



- **Multi-cluster, tiga fasa**

Sistem *multi-cluster* terdiri dari beberapa klaster yang terhubung secara paralel. Daya keluaran dari sistem *multi-cluster* meningkat seiring dengan jumlah klaster. Karena sistem *multi-cluster* ditujukan untuk konfigurasi tiga fasa, jumlah inverter baterai yang dipasang harus kelipatan tiga. Tergantung pada mereknya, panel distibusi *multi-cluster* mungkin diperlukan untuk menghubungkan klaster-klaster tersebut seperti yang ditunjukkan di bawah ini. Komunikasi *multi-cluster* harus terbentuk di antara para *master* di setiap klaster



- **Master** bertindak sebagai pusat kendali dan pemantauan serta berkomunikasi dengan para *slave* di dalam klaster yang sama dan dengan master yang lainnya. *Master* mengatur frekuensi dan tegangan yang harus diikuti oleh *slave*. *Master* tersebut juga mengontrol operasi baterai dan menghubungkan atau memutuskan *slave* serta memonitor status baterai.
- **Slave** mengikuti pengaturan konfigurasi dan perintah dari *master* di dalam klaster. *Slave* beroperasi berdasarkan perintah yang dikeluarkan oleh inverter dan memberikan *feedback* kepada *master*-nya.
- **Main cluster** adalah klaster yang memiliki tingkatan yang tertinggi di dalam sistem *multi-cluster*. *Master* dari klaster utama lebih tinggi kedudukannya dibandingkan dengan *master* dari klaster tambahan (*extension*). Tugas *master* adalah berkomunikasi dengan panel *multi-cluster*, memulai dan menghentikan operasi dari seluruh sistem, dan mengontrol serta memantau master lainnya.
- **Extension cluster** adalah klaster tambahan dalam sistem *multi-cluster* yang berada di bawah kendali klaster utama. Master dari klaster tambahan tersebut harus mengikuti perintah yang dikirim oleh master dari klaster utama. Klaster tambahan tersebut independen terhadap operasional seluruh sistem, yang berarti jika klaster mengalami kerusakan, klaster lain masih bisa tetap beroperasi.

Sumber: SMA¹ dan Schneider²



- Kabel daya dan kabel komunikasi terlindung di dalam konduit kabel dan terpasang dengan rapi.



- Pemasangan kabel yang buruk bisa mengurangi umur pakai kabel dan memengaruhi kinerja sistem.

⌚ Bagaimana cara meningkatkan pemasangan kabel inverter baterai?

- Pasang konduit kabel untuk melindungi kabel serta mencegah beban mekanis pada kabel dengan mencegah agar kabel tidak menggantung.

¹ SMA, "Installation - Quick Reference Guide Off-Grid Systems," 2014.

² Schneider Electric, "Conext XW Multi-Unit Power Systems Design Guide," 2016.

- Panjang kabel di antara inverter baterai dan bank baterai serta panel distribusi AC di dalam klaster yang sama harus identik untuk menghindari operasi yang tidak simetris.
- Gunakan jenis kabel yang tepat berdasarkan tegangan operasi, arus pengisian dan pelepasan maksimum, dan arus keluaran AC. Ukuran kabel harus dihitung berdasarkan IEC 60364 atau PUIL dan tidak boleh kurang dari 70 mm^2 untuk DC dan 10 mm^2 untuk AC atau sesuai instruksi produsen. Arus puncak keluaran AC harus dipertimbangkan ketika menetapkan ukuran kabel dan perangkat proteksi (*rating* arus kabel \geq arus nominal MCB \geq arus puncak keluaran AC).
- Inverter baterai harus dipasang dekat dengan bank baterai yang terhubung. Panjang kabel antara bank baterai dan inverter baterai tidak boleh melebihi 10 meter. Dan total panjang jaringan komunikasi tidak boleh melebihi 40 meter.
- Kabel daya dan kabel komunikasi tidak boleh dipasang berdekatan atau disatukan di dalam konduit yang sama.
- Beri label untuk setiap kabel daya dan kabel komunikasi untuk memudahkan identifikasi kabel.





- Kabel ethernet untuk sinkronisasi antara inverter baterai dan jaringan komunikasi terpasang dengan baik



- Menggunakan kabel ethernet buatan sendiri yang berkualitas rendah. Jaket luar tidak dijepit dengan aman di dalam konektor



- Tidak adanya terminator jaringan dapat menyebabkan terjadinya masalah komunikasi.



- Kabel komunikasi Sinkronisasi AC antara master dan slave tidak dipasang.

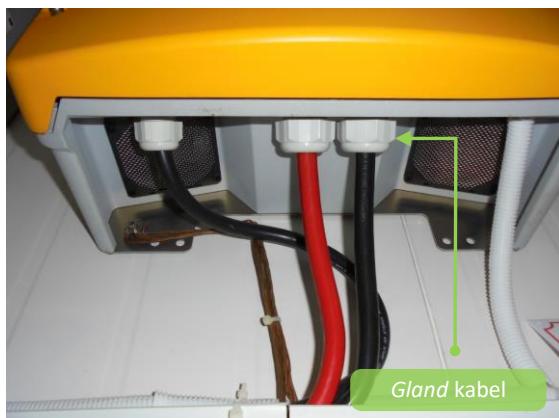


Terminator jaringan biasanya digunakan untuk terminasi perangkat pertama dan terakhir dari rantai komunikasi. Periksalah instruksi produsen untuk perlunya dilakukannya terminasi jaringan komunikasi.

➲ Bagaimana cara memperbaiki instalasi diatas?

- Pada jenis inverter baterai seperti di atas, jaringan klaster untuk sinkronisasi AC tidak boleh diterminasi dengan terminator jaringan. Terminator jaringan hanya boleh dipasang pada perangkat yang pertama dan yang terakhir dari jaringan komunikasi data.
- Silakan merujuk ke manual untuk jenis kabel komunikasi yang direkomendasikan. Beberapa produsen hanya mengizinkan jenis kabel *straight-thru Category 5* (CAT 5 atau CAT 5e) dengan konektor RJ45. Menggunakan kabel twisted pair untuk koneksi sinyal dapat mengurangi *noise*.

- Ganti kabel ethernet dengan crimping berkualitas tinggi atau gunakan kabel yang disediakan oleh produsen inverter. Kabel kecil mungkin tidak dapat menahan beban mekanis. Panjang kabel yang berlebih harus dipotong dan konektor harus dapat menahan jaket luar dengan menjepitkannya ke dalam konektor.
- Gunakan *strain relief boot* di sekitar konektor untuk melindungi konektor dari tekanan ekstrem pada kabel



- *Gland kabel* digunakan untuk mengamankan kabel daya pada inverter baterai.



- Tidak adanya *gland kabel* dapat merusak isolasi kabel karena terkena tepi yang tajam dan juga menyebabkan turunnya *rating IP*



- Koneksi pembumian pada casis inverter baterai untuk mengurangi bahaya terkena sengatan listrik jika ada gangguan.



- Kotak yang tidak dibumikan dapat menyebabkan bahaya sengatan listrik jika bersentuhan langsung dengan bagian konduktif inverter.

■■■ Multi-cluster box

Beberapa produsen memerlukan adanya panel distribusi tambahan untuk membangun sistem multi-cluster dan untuk menghubungkan antara inverter baterai, inverter jaringan, dan beban. Panel tersebut biasanya sudah dilengkapi dengan perkabelan, saklar, dan perangkat proteksi. Panel biasanya tersedia sesuai dengan jumlah inverter yang harus dihubungkan.



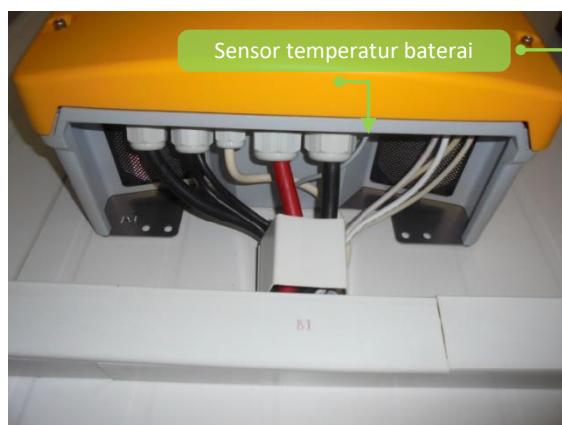
- SMA Multicuster box 12.3 digunakan untuk menghubungkan tiga klaster yang terdiri dari sembilan inverter baterai



- SMA MC box 6.3 digunakan untuk memasang enam inverter baterai secara paralel sebelum didistribusikan ke jaringan distribusi.

■■■ Sensor temperatur baterai

Mirip dengan *solar charge controller*, informasi mengenai temperatur baterai diperlukan untuk mencegah pengisian baterai pada temperatur yang tinggi. Kompensasi pengisian daya dilakukan dengan menyesuaikan tegangan pengisian berdasarkan peningkatan temperatur baterai.



- Sensor temperatur baterai terhubung ke inverter baterai (*master*) dan dipasang pada baterai untuk fitur kompensasi *charging* baterai. Lihat bab 4 mengenai cara memasang sensor temperatur baterai dengan benar.



8.3. Pengaturan parameter inverter baterai

Penetapan parameter inverter baterai merupakan langkah yang penting selama pemasangan untuk memastikan operasi paralel dari beberapa inverter dan operasi baterai dapat berjalan dengan aman. Parameter tersebut harus dikonfigurasi sesuai dengan instruksi produsen dan nilai yang direkomendasikan dari produsen baterai. Konfigurasi inverter baterai dapat dilakukan menggunakan panel kontrol sistem yang terhubung ke inverter *master* melalui jaringan komunikasi data.



- Empat panel pengendali SMA dipasang untuk mengkonfigurasi dan memonitor setiap klaster



- Panel Pengendali Sistem Conext dipasang untuk mengatur dan memantau inverter baterai



- Inverter baterai diberi label dengan tanda pengenal (ID) yang menunjukkan jenis perangkat dan koneksi fasa-nya



- Tidak adanya label pada inverter dapat menyebabkan kesulitan di saat melakukan pemeriksaan atau pemeliharaan



Parameter apa yang harus dipertimbangkan ketika melakukan pengaturan parameter inverter baterai?

- **Konfigurasi dasar**
 - **Jenis perangkat** untuk mengidentifikasi master dan slave
 - **Moda operasi** harus diatur ke moda berdiri sendiri (*stand alone*) atau off-grid
 - **Jenis baterai** dapat dipilih antara teknologi baterai *lead acid* (*valve regulated* atau *flooded*) atau jenis lain seperti *lithium-ion*. Spesifikasi baterai OPzV adalah baterai jenis valve regulated lead acid (VRLA).
 - **Tegangan nominal baterai**, yang biasanya ditetapkan pada 48 V DC. Tegangan baterai harus berada dalam kisaran tegangan nominal baterai.
 - **Kapasitas nominal baterai bank dalam Ah (Ampere-hour)** berdasarkan kapasitas C10 bank baterai. Jumlahkan kapasitas bank baterai jika beberapa rangkaian terhubung secara paralel.
 - **Tegangan dan frekuensi** jaringan distribusi diatur di 230 VAC dan 50 Hz.
 - **Jumlah konduktor di jaringan** untuk satu fasa maupun tiga fasa.
 - **Klaster tunggal atau multi-cluster** untuk menentukan konfigurasi sistem.
 - **Jenis klaster** yakni klaster utama (*main cluster*) atau klaster tambahan (*extension cluster*)
 - **Alamat klaster dan jenis panel distribusi** untuk mengidentifikasi alamat klaster tambahan dan panel distribusi *multi-cluster* yang digunakan
 - **Sumber energi yang terhubung** seperti modul fotovoltaik yang dilengkapi dengan inverter jaringan, generator, atau jaringan listrik eksternal
- **Konfigurasi tambahan untuk keluaran arus bertegangan AC hanya dilakukan di master**
 - **Tegangan dan frekuensi AC nominal** dari jaringan yang berdiri sendiri dengan nilai 230 V / 50 Hz
 - **Fungsi frequency droop** adalah untuk mengatur perubahan frekuensi per kW
 - **Tegangan minimum dan maksimum inverter** adalah rentang operasi tegangan AC inverter
 - **Frekuensi minimum dan maksimum inverter** adalah rentang operasi frekuensi inverter
- **Konfigurasi tambahan untuk konfigurasi baterai hanya dilakukan di sisi master**
 - **Pemutusan arus tegangan rendah** adalah batas pemutus (cut-off) dari tegangan baterai di mana inverter harus berhenti beroperasi
 - **Batas arus pengisian** menentukan arus keluaran yang dapat diterima untuk mengisi (*charge*) baterai. Nilai ini biasanya tergantung pada besarnya arus pengisian maksimum yang dapat diterapkan ke baterai.
 - **Siklus pengisian (charge cycle)** adalah proses pengisian tiga tahap atau dua tahap tanpa adanya tegangan *float*. Siklus tiga tahap terdiri dari tahap *bulk* atau tahap arus konstan, tahap *absorption* atau tahap tegangan konstan, dan tahap *float*.
 - **Pengaturan tegangan pengisian** untuk memastikan pengisian baterai yang tepat. Lihat Bab 4 untuk nilai yang direkomendasikan untuk pengaturan tegangan. Tegangan yang direkomendasikan untuk baterai *lead acid* OPzV adalah 2,35 - 2,4 V untuk tahap *bulk* dan *absorption*, dan 2,25 - 2,3 V untuk *float* atau konsultasikan dengan produsen baterai untuk batas yang diperbolehkan.
 - **Kompensasi temperature baterai** adalah penyesuaian yang dibutuhkan per kenaikan temperatur yang ditetapkan dalam mV per °C.



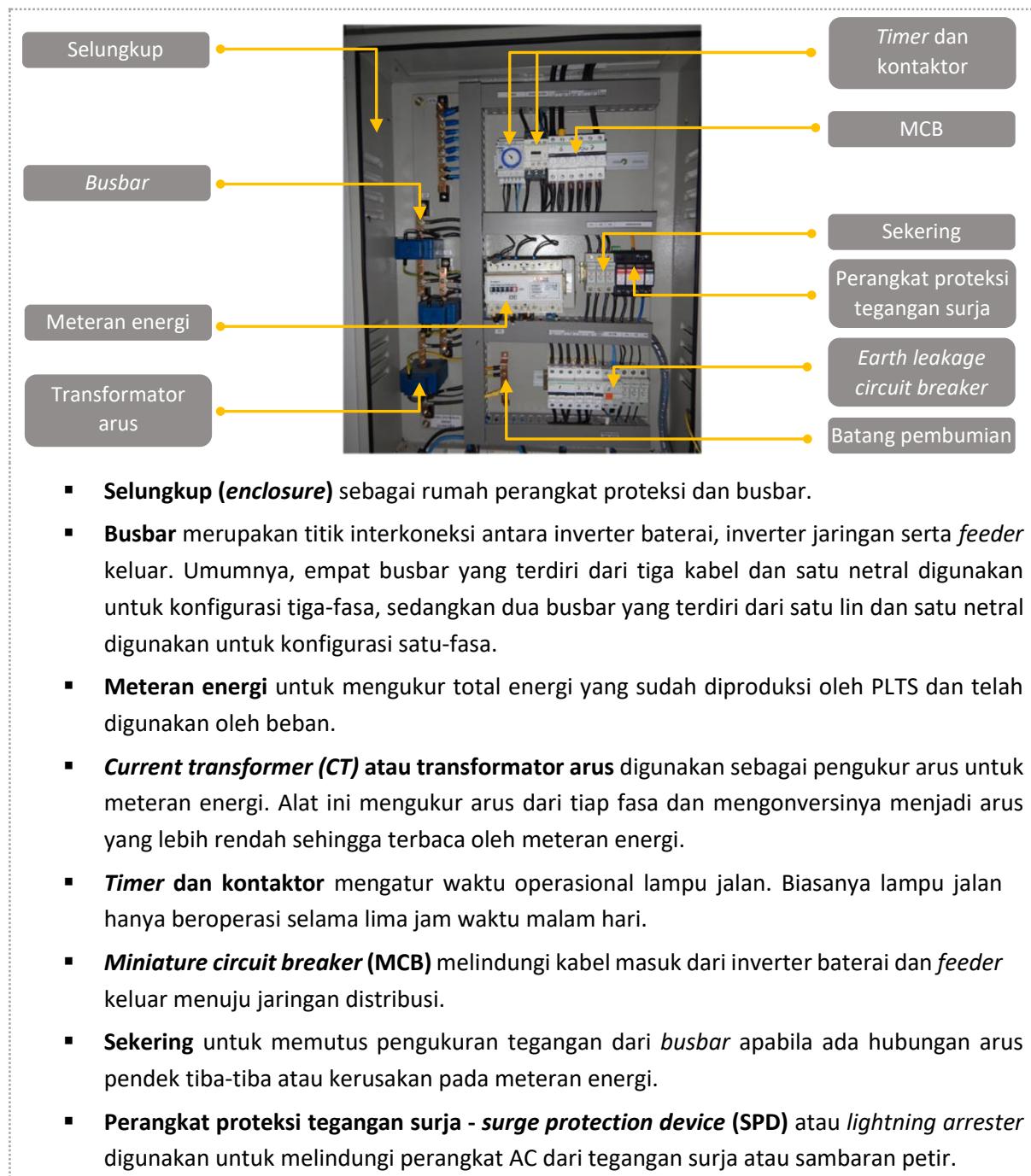
Bab 9: Panel Distribusi AC

- ✓ Apa fungsi panel distribusi AC?
- ✓ Apa saja komponen di dalam panel?
- ✓ Contoh instalasi panel yang baik dan kurang baik

WASTEGANGAN
TINGGI

9.1. Dasar-dasar panel distribusi AC

Panel distribusi AC atau dikenal juga sebagai *AC power distribution box* (ACPDB) digunakan untuk membagi dan mendistribusikan daya dari inverter baterai untuk dialirkan pada beban melalui beberapa lateral penyulang (*sub-feeder*). Panel ini adalah tempat di mana inverter baterai terhubung secara paralel untuk menggabungkan daya keluaran serta perangkat proteksi dari seluruh penyulang. Pada umumnya panel distribusi AC berisikan busbar, perangkat proteksi arus lebih, perangkat proteksi tegangan surja, serta sistem pemantauan lokal seperti energi meter. Panel distribusi AC dapat dikonfigurasikan dalam susunan satu fasa atau tiga fasa, tergantung pada kapasitas dan topologi sistem.



- **Selungkup (enclosure)** sebagai rumah perangkat proteksi dan busbar.
- **Busbar** merupakan titik interkoneksi antara inverter baterai, inverter jaringan serta *feeder* keluar. Umumnya, empat busbar yang terdiri dari tiga kabel dan satu netral digunakan untuk konfigurasi tiga-fasa, sedangkan dua busbar yang terdiri dari satu lin dan satu netral digunakan untuk konfigurasi satu-fasa.
- **Meteran energi** untuk mengukur total energi yang sudah diproduksi oleh PLTS dan telah digunakan oleh beban.
- **Current transformer (CT) atau transformator arus** digunakan sebagai pengukur arus untuk meteran energi. Alat ini mengukur arus dari tiap fasa dan mengonversinya menjadi arus yang lebih rendah sehingga terbaca oleh meteran energi.
- **Timer dan kontaktor** mengatur waktu operasional lampu jalan. Biasanya lampu jalan hanya beroperasi selama lima jam waktu malam hari.
- **Miniature circuit breaker (MCB)** melindungi kabel masuk dari inverter baterai dan *feeder* keluar menuju jaringan distribusi.
- **Sekering** untuk memutus pengukuran tegangan dari *busbar* apabila ada hubungan arus pendek tiba-tiba atau kerusakan pada meteran energi.
- **Perangkat proteksi tegangan surja - surge protection device (SPD)** atau *lightning arrester* digunakan untuk melindungi perangkat AC dari tegangan surja atau sambaran petir.

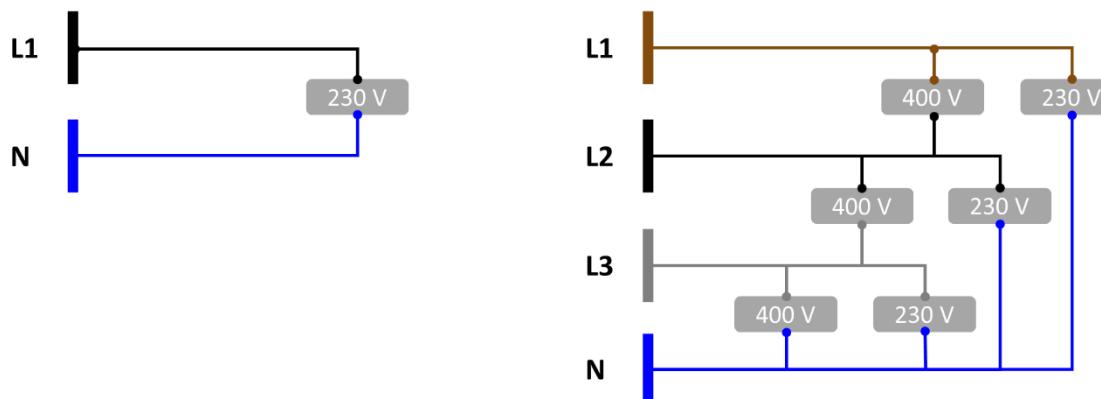
- **Earth-leakage circuit breaker (ELCB)** atau gawai pemutus arus sisa mencegah orang terkena sengatan listrik akibat kontak langsung pada komponen konduktif. ELCB akan *trip* seandainya aliran arus total semua fasa tidak sama dengan aliran arus yang kembali lewat neutral atau terdapat arus sisa yang lebih besar dari rating *ELCB* (biasanya 30 mA untuk proteksi terhadap manusia). *Residual current device (RCD)* juga sering digunakan untuk tujuan ini.
- **Batang pembumian (grounding bar)** memberikan pembumian pada selungkup, perangkat proteksi surja, serta transformator arus.

Panel distribusi AC 30 kW dengan konfigurasi tiga-fasa



Bagaimana warna isolasi kabel pada sistem 1-fasa dan 3-fasa?

Seluruh komponen pada panel distribusi AC beroperasi pada tegangan AC yang dapat mencapai 380 hingga 400 V untuk konfigurasi tiga-fasa. PLTS *Off-grid* dengan kapasitas yang lebih dari 15 kWp biasanya terkonfigurasi dalam tiga fasa. Sedangkan sistem yang kurang dari 15 kWp normalnya beroperasi dalam satu fasa atau 230 V.



Warna isolasi merujuk pada PUIL 2011 dan SNI IEC 60445. Pewarnaan isolasi sebelumnya adalah merah untuk fasa 1, kuning untuk fasa 2, biru untuk fasa 3, dan hitam untuk netral.

⦿ Bagaimana instalasi panel yang baik?

- Selungkup harus aman dari tegangan sentuh jika terjadi gangguan. Hal ini dapat dilakukan dengan pembumian selungkup.
- Tindakan pengamanan tambahan seperti tanda dan label peringatan harus ditempel untuk meningkatkan kesadaran akan adanya tegangan berbahaya pada sistem.
- Diperlukan pengelolaan panas yang baik untuk mencegah penurunan rating daya komponen secara signifikan.
- Indikator meteran dan lampu harus tersedia pada pintu dan terlihat jelas.



Panel dipasang pada dinding dan kabel-kabel terpasang dengan rapi.



Panel distribusi AC yang berdiri bebas dapat menjadi tidak stabil dan mengakibatkan panel jatuh.

9.2. Selungkup pelindung

■■■ Kualitas selungkup

Semua komponen yang teraliri listrik penting untuk diberi label peringatan yang jelas agar operator atau teknisi waspada akan adanya tegangan berbahaya pada konduktor terbuka yang ada di dalam panel. Selain label, panel juga harus dilengkapi dengan kunci untuk mencegah orang yang tidak berkepentingan mengakses instalasi.



Panel dilengkapi dengan label bahaya sengatan listrik.



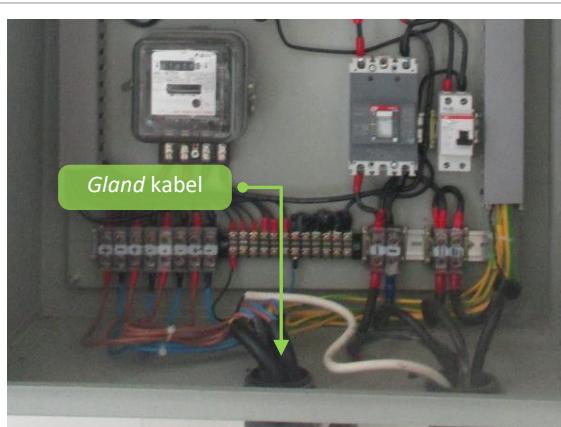
Tidak adanya label mengurangi kesadaran akan adanya tegangan yang berbahaya.



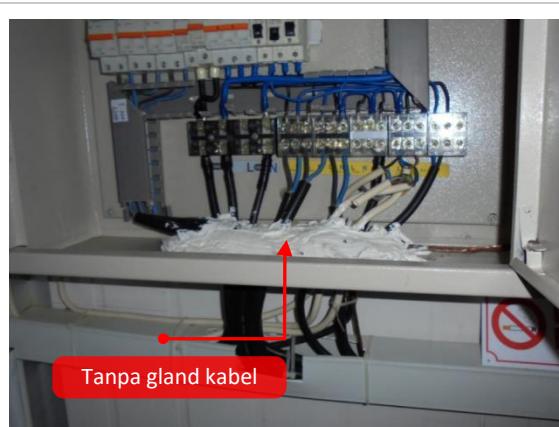
- Papan tambahan untuk melindungi instalasi dari sentuhan langsung.



- Panel harus memiliki minimum IP3x untuk menjaga instalasi dari pengaruh lingkungan.



- Gland kabel digunakan untuk mencegah binatang masuk ke panel.



- Penggunaan sealant pada masukan kabel mengurangi fleksibilitas dari instalasi.



- Seluruh pintu termasuk pintu yang tidak disambung ke pembumian.



- Pintu yang tidak disambung ke pembumian menimbulkan bahaya keselamatan jika terjadi kegagalan isolasi.

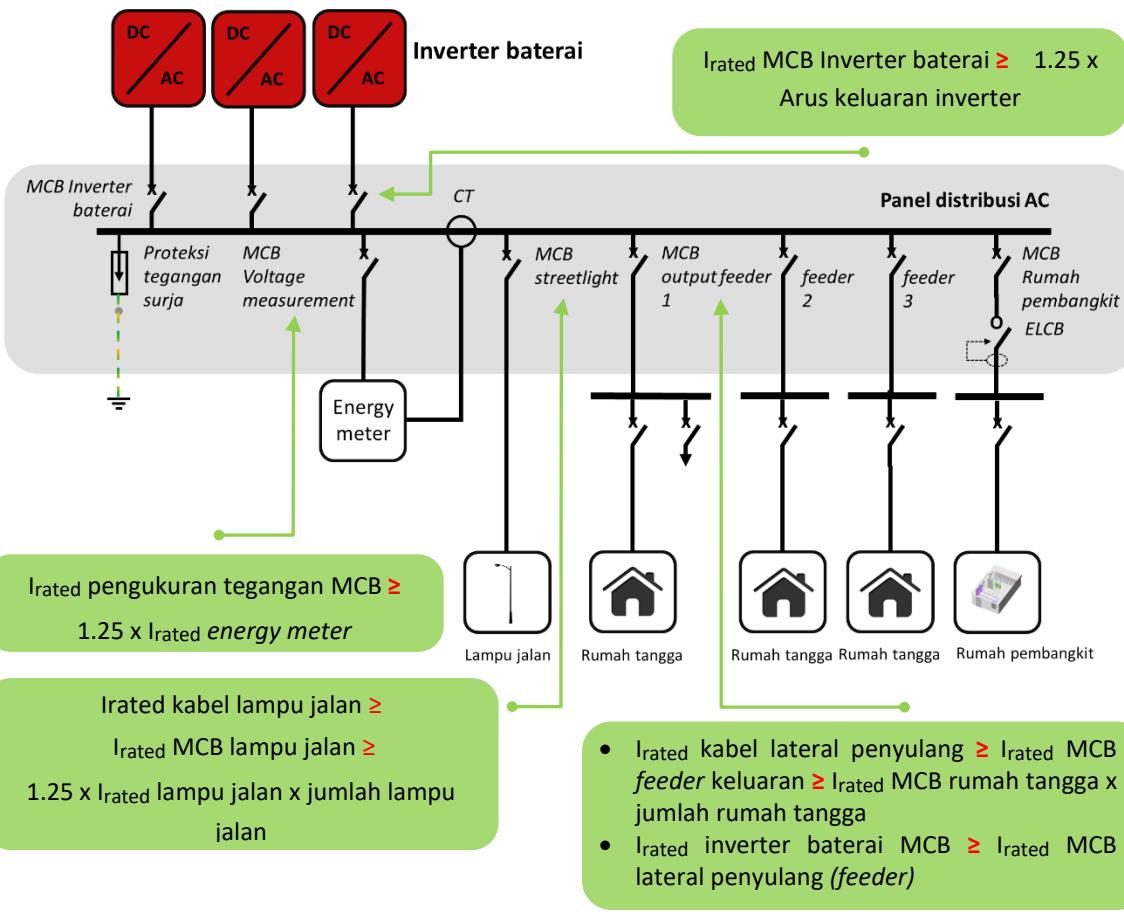


Tidak ada jaminan bahwa pintu panel terhubung secara konduktif dengan selungkup. Menyambungkan kabel pembumian pada pintu akan mengurangi risiko tersengat listrik saat terjadi kegagalan isolasi.

9.3. Komponen listrik di dalam panel distribusi AC



Bagaimana diagram listrik panel distribusi AC satu-fasa pada umumnya?

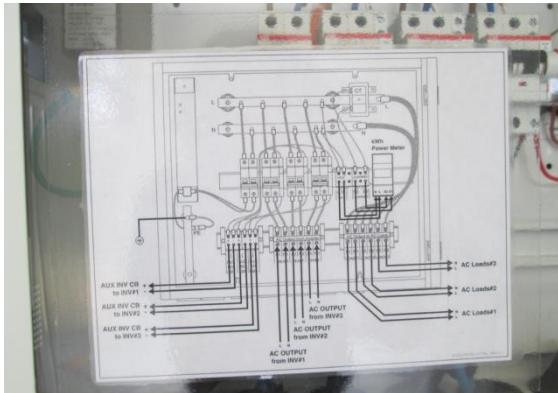


Sangat dianjurkan bahwa jumlah lateral penyulang (sub-feeder) sambungan rumah tangga setidaknya sama dengan jumlah inverter baterai yang terpasang. Hal ini akan memungkinkan koordinasi proteksi yang mencegah *rating* yang lebih tinggi pada MCB lateral penyulang (sirkuit bagian hilir) dibandingkan MCB dari inverter baterai (sirkuit bagian hulu).

⦿ Mengapa diperlukan koordinasi proteksi?

- Untuk memastikan perangkat proteksi beroperasi dengan keandalan yang diperlukan.
- Untuk memutus hanya jalur yang mengalami gangguan dalam sistem.

- Untuk mencegah pemutusan yang tidak perlu pada perangkat proteksi bagian hulu saat terjadi kelebihan beban atau hubungan arus pendek.



- Gambar listrik sesuai instalasi tersedia di tempat untuk menunjukkan lokasi dan interkoneksi antar komponen.

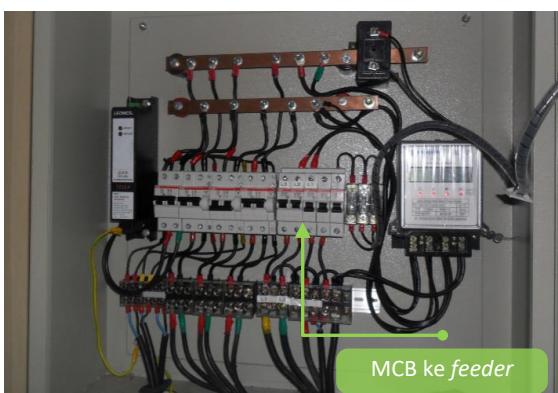


- Panel tanpa gambar dan label komponen menyebabkan sulitnya untuk mengidentifikasi komponen

II. Perangkat proteksi

Ⓐ Apa yang perlu dipertimbangkan saat memasang perangkat proteksi?

- Dianjurkan menggunakan MCB dibanding sekering. Apabila terjadi kerusakan, MCB dapat digunakan kembali dan lebih banyak tersedia di daerah terpencil dibandingkan sekering.
- Proteksi untuk *feeder* harus ditentukan dan dipasang berdasarkan persyaratan yang sesuai standar internasional maupun nasional (IEC 60364 dan PUPL 2011).
- Selalu periksa bahwa rating MCB atau sekering lebih tinggi dari arus beban dan lebih rendah dari *rating* arus kabel yang terproteksi ($I_{beban} \leq I_{MCB} \leq I_{kabel}$).
- Seluruh perangkat harus memiliki rating arus dan rating yang sama dengan atau lebih besar dari tegangan operasional (230VAC / 400 VAC).



- MCB satu-fasa digunakan untuk melindungi masing-masing *feeder*.



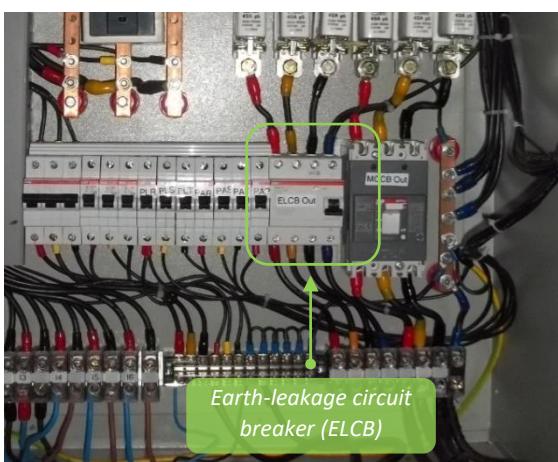
- MCB tiga-fasa digunakan untuk tiga *feeder* berbeda. Kerusakan di salah satu *feeder* akan memutuskan lainnya.



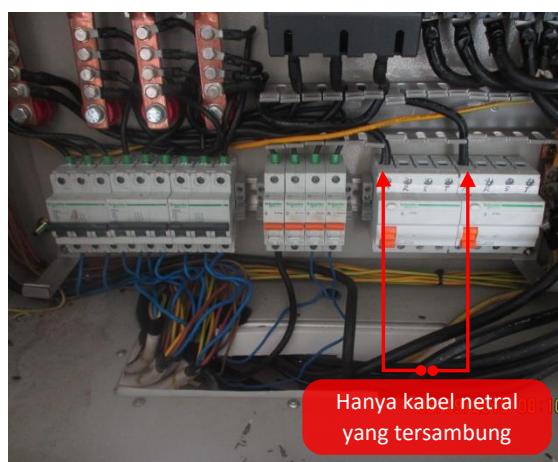
- Instalasi yang tidak aman pada MCB.
- MCB seharusnya terpasang dan terlindungi di dalam panel.



- Busbar dipakai untuk menyambung antar komponen.
- Kabel pembumian digunakan sebagai kabel fasa.



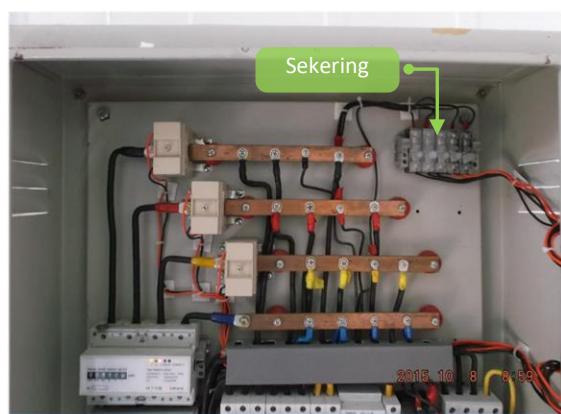
- Instalasi ELCB yang benar. Semua fasa dan netral tersambung pada ELCB.



- ELCB tidak terpasang dengan benar.
- Seluruh fasa seharusnya tersambung pada perangkat proteksi.



Seluruh kabel fasa dan netral harus tersambung pada ELCB untuk mendapatkan pengukuran yang akurat dari arus sisa. ELCB atau RCD hanya dapat digunakan pada sistem pembumian berikut: TT, TN-S, atau TN-C-S.



Pengukuran tegangan untuk meteran energi terlindungi oleh sekering.



Pengukuran tegangan tidak terlindungi oleh perangkat proteksi.



Sambungan kabel dari instrumen pengukuran tegangan ke busbar tidak boleh dibiarkan tanpa proteksi. Meteran energi yang rusak atau sambungan yang salah dapat menyebabkan hubungan arus pendek.

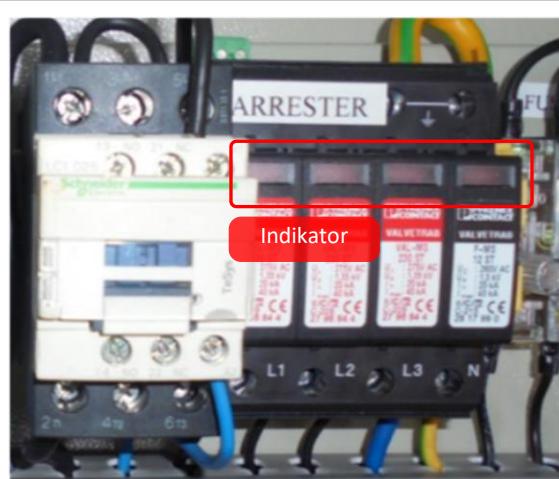
● Bagaimana memastikan pengoperasian perangkat proteksi yang tepat?



- Lakukan verifikasi saat komisioning bahwa perangkat proteksi berfungsi dengan benar dan menggunakan rating yang benar (tidak terlalu rendah atau tinggi).
- Lakukan pemeriksaan untuk memantau kondisi sekering secara berkala. Sekering yang terbakar atau MCB yang jatuh (*trip*) harus segera diperiksa. Kerusakan listrik harus ditemukan dan diperbaiki sebelum menyalakan MCB kembali atau sebelum mengganti sekering.
- Apabila menggunakan sekering, sediakan di dalam kotak minimal 20% cadangan sekering dari total sekering yang terpasang, dengan ukuran dan rating yang sama.



Kabel yang tidak tersambung pada perangkat proteksi tegangan surja membuat sistem dalam keadaan tidak terlindungi.



Perangkat proteksi surja (SPD) perlu diganti sebagaimana ditunjukkan dengan indikator merah pada SPD.

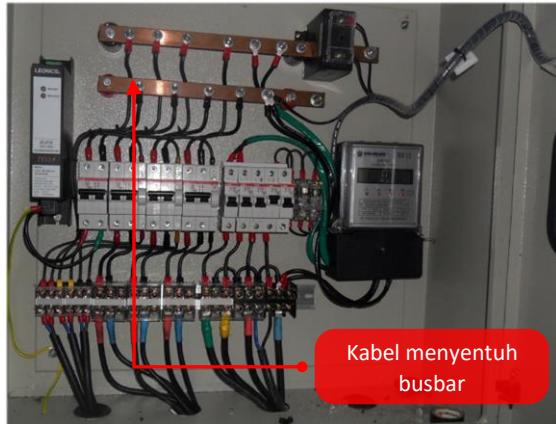


Tegangan surja dapat terjadi pada seluruh fasa, maka dari itu, seluruh fasa termasuk netral harus terhubung pada perangkat perlindungan lonjakan listrik (SPD). SPD harus disambungkan dengan pembumian.

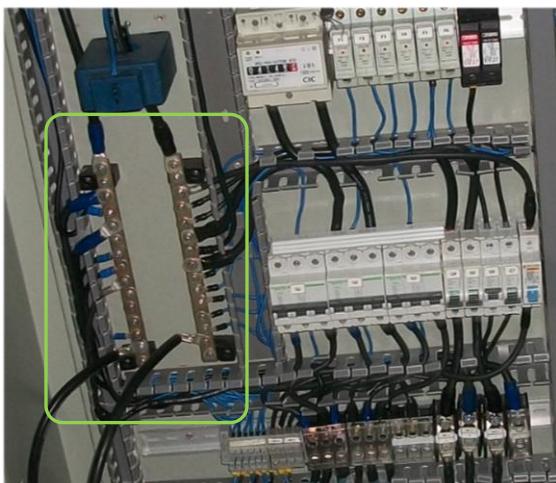
■■■ Terminal busbar



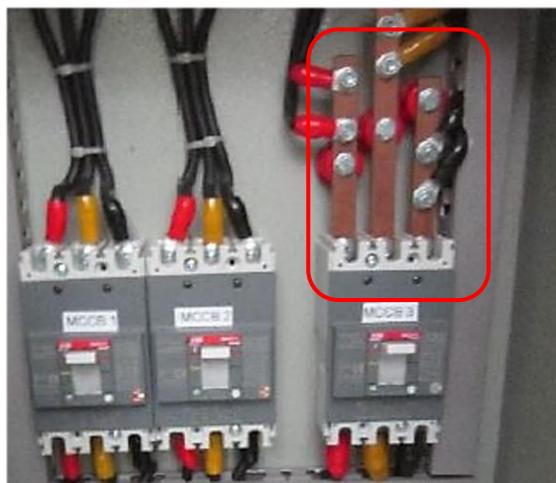
- Kabel fasa tidak melewati busbar netral. Hindari kontak langsung antara kabel dan busbar dari fasa yang berbeda.



- Kontak langsung antara kabel fasa dan busbar netral. Insulasi dapat rusak akibat ujung yang tajam dan gesekan.



- Jarak yang cukup antara busbar fasa dan busbar netral.



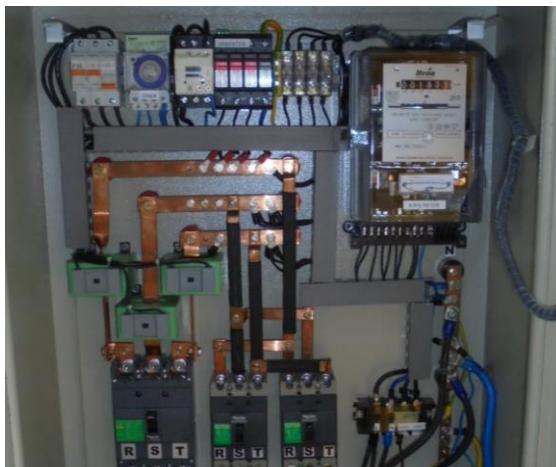
- Instalasi busbar dari fasa terlalu dekat dan tidak tersedia pemisahan.



Seluruh busbar sebaiknya dipisahkan menggunakan bahan insulasi untuk mencegah kontak langsung atau hubungan arus pendek yang tidak disengaja.

■■■ Sistem pemantauan lokal

Sistem pemantauan lokal dibutuhkan untuk memberikan informasi dasar seperti tegangan sesaat, arus, frekuensi, daya, dan total energi yang dialirkan pada beban. Unit pemantauan ini dapat berupa meteran digital atau analog. Sistem pemantauan local terdiri dari meteran energi, pengukuran tegangan dan transformator arus (*current transformer, CT*) sebagai *input* untuk meteran tersebut.



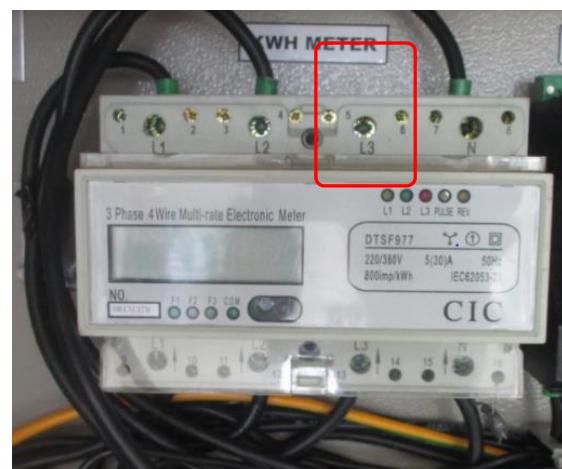
- Meteran energi tersedia untuk memantau penggunaan energi oleh beban.



- Meteran digital pada panel memberikan visualisasi dan akurasi pengukuran yang lebih baik.



- Meteran energi bekerja dengan baik dan seluruh fasa tersambung pada alat ukur.



- Meteran tidak berfungsi dan fasa ketiga tidak tersambung pada meteran.



Pastikan seluruh fasa dan netral tersambung pada meteran energi untuk pembacaan yang benar. Rasio transformator arus harus sesuai dengan arus masukan pada meteran energi.



- Terdapat indikator arus, tegangan, dan frekuensi pada pintu panel.

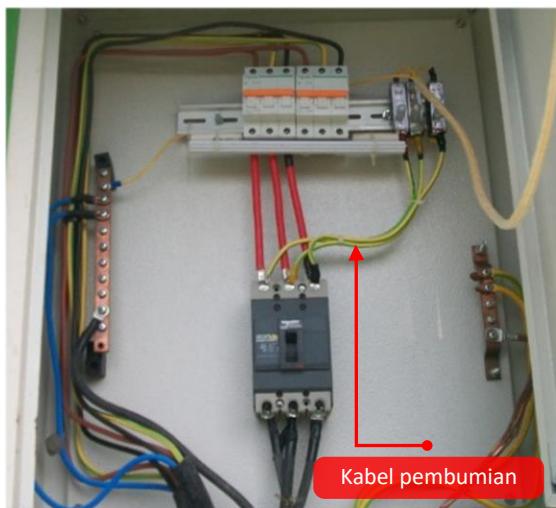


- Arus keluaran tidak terukur pada panel. Arus keluaran diperlukan untuk menghitung daya keluaran.

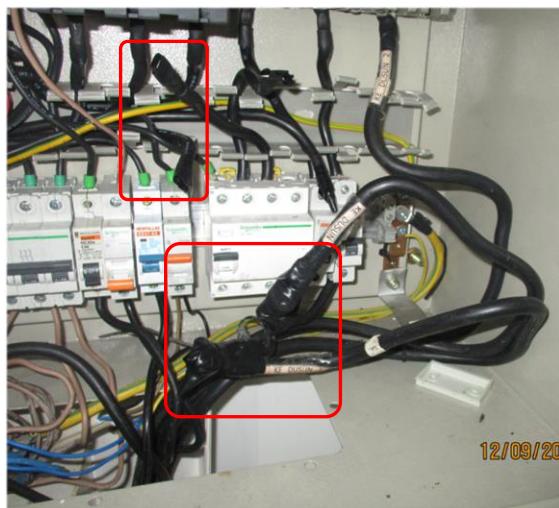


Pengukuran tegangan dan arus keluaran setidaknya harus terpasang pada panel untuk menampilkan daya yang dialirkan ke beban. Informasi ini berguna bagi operator atau teknisi untuk melihat daya sesaat dari pembangkit.

III. Instalasi kabel



- Warna insulasi yang salah (kabel pembumian) digunakan untuk kabel fasa.



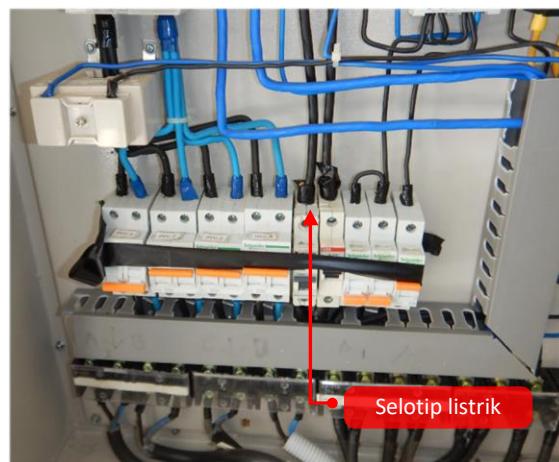
- Sambungan dan insulasi kabel yang tidak benar. Ganti kabel tersebut dengan kabel yang utuh.



Kabel harus diterminasi dan dikencangkan dengan baik. Pemipihan (*crimping*) dan sambungan yang buruk dapat mengakibatkan pemanasan, rugi-rugi pada pengkabelan, serta meningkatkan risiko kemungkinan tersengat listrik dan kebakaran. Selalu periksa kekencangan *crimping* dengan cara sedikit menarik kabel tersebut.



Instalasi yang rapi dan menggunakan kabel skun yang benar.



Slotip listrik digunakan untuk melindungi kabel serabut yang tidak diberi kabel skun.

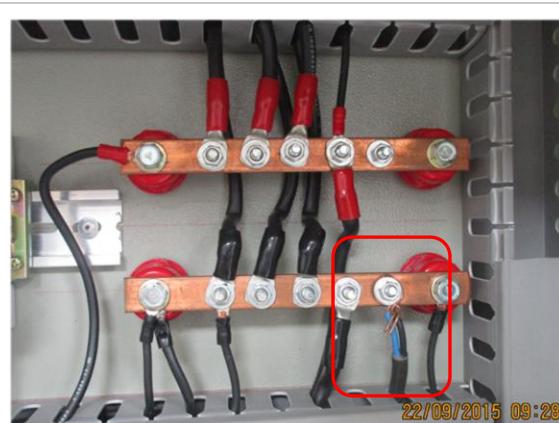
⇒ Bagaimana cara meningkatkan instalasi yang kurang baik?



- Gunakan panel distribusi yang sudah dirakit dan diuji sebelumnya. Panel semacam ini lebih dapat diandalkan karena panel tersebut sudah diuji untuk memastikan kualitas instalasi.
- Saat komisioning pastikan tidak ada kabel atau konektor yang terlalu panas. Verifikasi dapat dilakukan secara visual, secara mekanikal dengan memeriksa kekencangan sambungan, secara elektrikal dengan memeriksa tegangan dan arus, serta berdasarkan panas.
- Kamera infra merah dapat digunakan untuk mendeteksi panas yang tidak normal akibat ukuran kabel yang terlalu kecil atau instalasi yang buruk. Pemeriksaan perlu dilakukan apabila terdapat perbedaan suhu yang signifikan antar komponen. Temperatur kabel dan terminal tidak direkomendasikan lebih dari 50°C saat beroperasi.
- Lakukan pemeriksaan dan pemeliharaan secara rutin untuk memastikan tidak ada baut, sekrup, atau kabel yang kendor akibat getaran atau variasi temperatur. Kencangkan kembali baut apabila diperlukan.



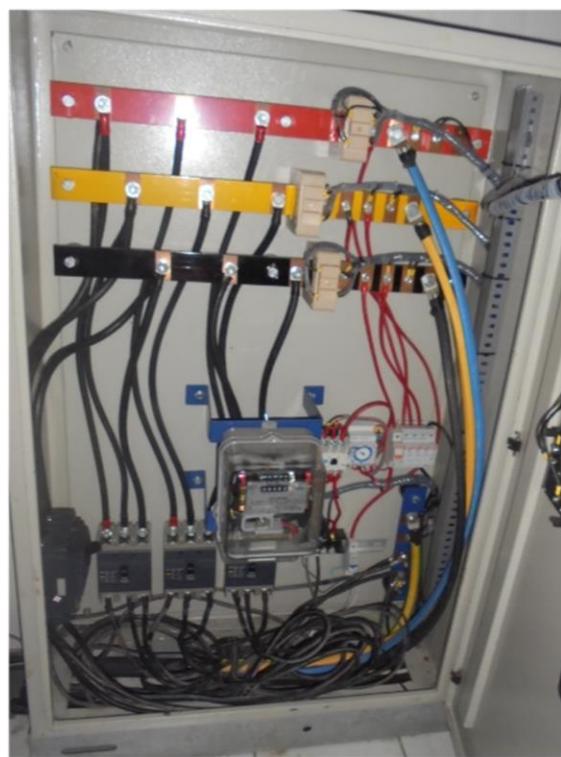
Kabel tidak terpasang dengan baik



Konduktor dari kabel inti ganda tersambung secara paralel dan tidak terlindungi.



- Kabel terpasang dengan rapi dan disusun dalam kabel tray. Kode warna dan label digunakan untuk mengidentifikasi fasa dan komponen.



- Panjang kabel yang tidak perlu dan instalasi yang berantakan dapat meningkatkan risiko kerusakan pada isolasi kabel.

➲ Bagaimana cara memperbaiki instalasi diatas?

- Hindari penggunaan kabel inti ganda yang dihubungkan secara paralel untuk meningkatkan kuat hantar arus kabel. Ganti kabel dengan kabel inti tunggal.
- Lakukan pangaturan ulang instalasi kabel yang tidak rapi dan terlalu panjang. Potong kabel yang tidak perlu dan gunakan konduit kabel untuk menata dan melindungi isolasi kabel.

Bab10:

Sistem Pemantauan

- ✓ *Contoh instalasi baik dan kurang baik dari sistem pemantauan*
- ✓ *Daftar parameter yang harus dipantau*
- ✓ *Hal-hal yang perlu dipertimbangkan saat pengaturan sistem pemantauan*

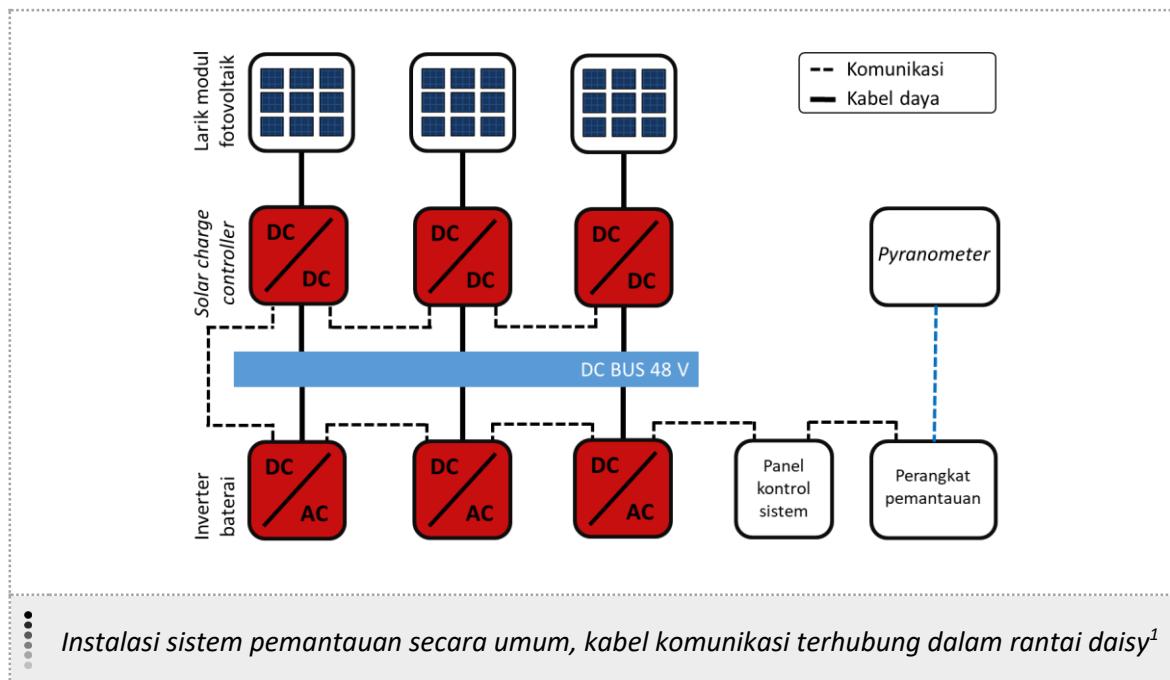


10.1. Dasar-dasar sistem pemantauan

Pemantauan (monitoring) adalah aktivitas yang sangat penting untuk mengevaluasi kinerja sistem serta mendapatkan masukan untuk perbaikan sistem di masa yang akan datang. Pemantauan dapat juga dikategorikan sebagai pemeliharaan prediktif dimana kinerja sistem diukur secara berkelanjutan selama beroperasi. Pemantauan sistem dapat dilakukan dengan pemeriksaan secara local dan/atau dari jarak jauh menggunakan perangkat penyimpan dan pengirim data.

⦿ Apa saja fungsi utama sistem pemantauan?

- Mengevaluasi apakah produksi dari PLTS memenuhi permintaan konsumen.
- Memahami kinerja sistem termasuk efisiensi dan keandalannya.
- Memberikan bantuan pada operator lokal dalam melakukan perbaikan saat terjadi masalah (*troubleshooting*).
- Memberikan informasi penting untuk perbaikan lebih lanjut terhadap desain sistem sehingga mengoptimalkan komponen yang digunakan dalam sistem.



PLTS *off-grid* harus dilengkapi alat pemantauan untuk mengawasi kondisi sistem dan untuk melakukan pemeliharaan saat dibutuhkan. Sistem pemantauan jarak jauh secara umum terdiri dari perangkat pemantauan sebagai pusat data dari perangkat individu serta panel kontrol sistem. Proses pemantauan dilakukan dengan mengambil data seperti tegangan dan arus dari tiap perangkat elektronik daya, data iradiasi dari *pyranometer* kemudian mengirim data ke perangkat pemantauan melalui kabel komunikasi. Selanjutnya, data tersebut dapat secara langsung divisualisasikan, disimpan di *data logger* atau ditransmisikan pada *data cloud* apabila terdapat sinyal GSM/GPRS.

¹ Rantai daisy (*daisy chain*) adalah rangkaian komponen yang saling terhubung atau berhubungan secara seri.

⌚ Apa saja persyaratan sistem pemantauan yang baik?

- Dilengkapi dengan fungsi pencatatan (*logging*) data menggunakan kartu memori. Interval pencatatan data paling sedikit setiap satu jam.
- Dapat diakses dari komputer melalui peramban (*browser*) web.
- Cocok dengan tipe dan merk dari peralatan elektronik daya dan pyranometer. Kecocokan (*kompatibilitas*) berarti kedua perangkat mampu berkomunikasi secara mudah dengan antarmuka (*interface*) dan protokol yang tersedia.
- Dilengkapi dengan antarmuka komunikasi melalui ethernet dan RS 485.



- Sunny WebBox, perangkat komunikasi dan pemantauan untuk SMA.



- Conext ComBox, perangkat komunikasi dan pemantauan untuk Schneider.



- SMA Sunny Remote Control untuk mengontrol dan memantau inverter baterai Sunny Island.



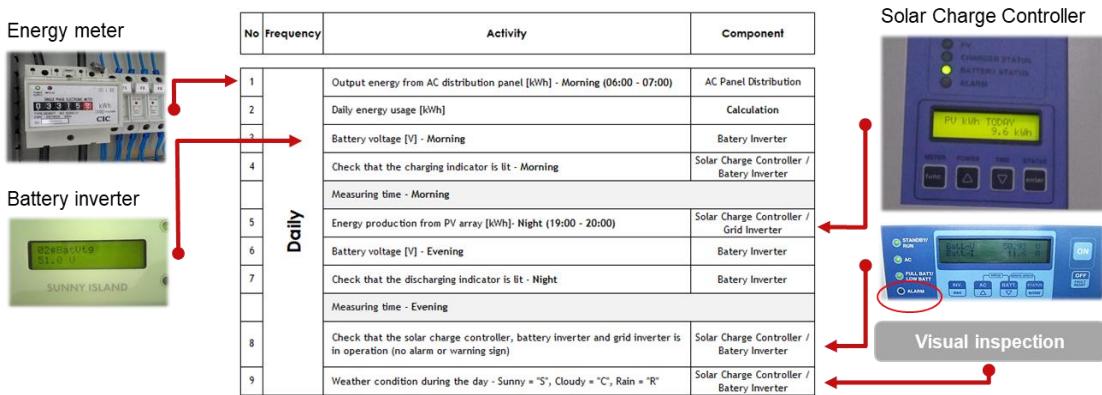
- Schneider XW System Control Panel (SCP) untuk mengontrol dan memantau seluruh elektronik daya yang terhubung



Bagaimana cara memantau sistem PLTS off-grid?

▪ Memeriksa sistem secara manual atau lokal

Pemantauan dilakukan oleh operator setiap hari. Kegiatan ini dilakukan dengan cara memeriksa data pada sistem pemantauan lokal di panel distribusi AC dan pada panel kontrol sistem secara manual. Operator harus mendatangi rumah pembangkit dan mencatat data dasar seperti keluaran energi, tegangan baterai, masukan energi dari modul fotovoltaik, dll. Daftar pemeriksaan tersebut harus dikirim secara rutin oleh operator kepada pemilik sistem.



▪ Sistem pemantauan menggunakan data *logger*

Data dikumpulkan oleh perangkat pemantauan dan disimpan pada kartu memori dengan interval yang telah ditetapkan. Seluruh parameter yang diperlukan untuk analisis harus terdaftar saat pemasangan sistem pemantauan. Saat dibutuhkan pelaporan, kartu memori harus dikirim pada pemilik. Perlu diperhatikan bahwa panjangnya data yang tersimpan dalam kartu memori bergantung pada variasi parameter yang direkam serta ukuran kartu memori yang digunakan untuk sistem tersebut. Data baru akan menghapus data lama apabila kartu memori penuh.

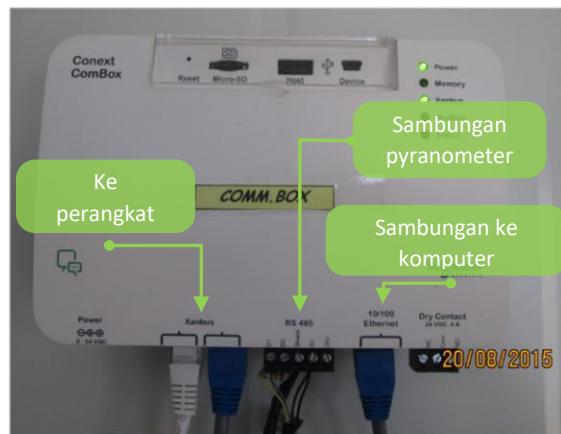
▪ Sistem pemantauan menggunakan GSM/GPRS

Sistem pemantauan menggunakan GSM/GPRS sangat dianjurkan karena lokasi yang jauh. Dengan menggunakan metode ini, pemilik dapat mengakses data dari jauh tanpa harus datang ke lokasi. Sistem ini mengumpulkan data dari parameter-parameter yang terdaftar, kemudian mengirimkan data yang diperoleh ke penyimpanan data (*data cloud*) pemilik atau yang disediakan oleh perangkat pemantauan.

Tiap metode yang disebutkan di atas memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Pemeriksaan secara manual jelas merupakan cara yang paling handal untuk memantau sistem karena operator akan memeriksa sistem secara langsung dan melaporkannya dalam bentuk buku catatan (*log book*). Namun demikian, data detail yang dapat diperoleh dari metode pemeriksaan manual ini terbatas, sehingga kurang menguntungkan untuk analisis lebih lanjut. Implementasi sistem pemantauan bergantung pada situasi lokasi. *Data logger* dapat dipertimbangkan untuk lokasi yang tidak memiliki jaringan seluler yang baik. Akan tetapi, apabila jaringan seluler cukup kuat dan dapat diandalkan, pengiriman data *real time* menggunakan GSM/GPRS harus dijadikan pilihan. Dalam hal ini, perangkat pemantauan harus dilengkapi dengan router dan modem.

10.2. Instalasi sistem pemantauan

■■■ Pemasangan perangkat keras (hardware)



- Sistem pemantauan yang berfungsi dengan sambungan ke perangkat lain menggunakan Xanbus dan RS 485 untuk pyranometer.



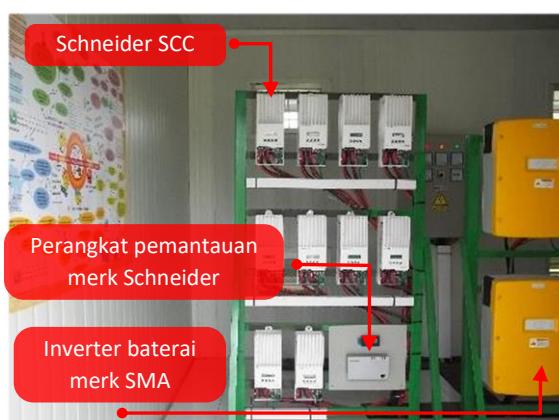
- Sistem pemantauan terpasang namun tidak tersambung pada perangkat apapun.



Pastikan seluruh komponen yang dipantau tersambung perangkat pemantauan. Ada batas maksimum jumlah perangkat yang tersambung pada sebuah perangkat pemantauan yang harus diperhitungkan. Pertimbangkan untuk memiliki perangkat pemantauan tambahan dan membuat konfigurasi *multi-cluster* saat jumlah maksimum perangkat yang terpasang melebihi batas.



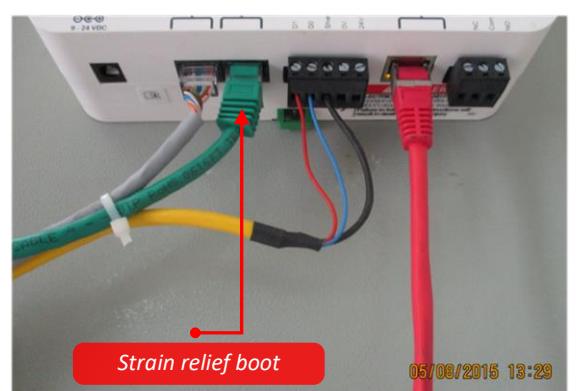
- SCC dan inverter baterai dari pabrikan yang sama dipantau dalam jaringan komunikasi yang sama.



- Kombinasi dari pabrikan yang berbeda mengakibatkan masalah komunikasi antar komponen.



- Kabel ethernet dengan *strain relief boot* digunakan untuk melindungi ujung kabel dan konektor.



- *Strain relief boot* RJ45 tidak digunakan pada kabel berwarna abu-abu.



- Terminator jaringan terpasang pada perangkat pemantauan. Perangkat tersebut adalah perangkat pertama yang terpasang pada jaringan.



- Jaringan komunikasi tidak diterminasi dengan terminator jaringan dapat menimbulkan masalah komunikasi.



- Pemasangan yang rapi pada kabel perangkat pemantauan dan panel kontrol sistem. Router hanya akan digunakan saat pemantauan jarak jauh via GSM/GPRS dapat dilakukan.



- Pyranometer tidak tersambung dengan benar pada perangkat pemantauan. Data bisa jadi tidak dapat terbaca.

⌚ Apa yang perlu dipertimbangkan saat memasang kabel komunikasi?

- Kabel ethernet berkualitas tinggi dengan *strain relief boot* harus digunakan untuk mengurangi tekanan pada konduktor yang dapat mengakibatkan kegagalan jaringan.
- Jenis kabel *straight-through* sering digunakan untuk menyambungkan perangkat dengan tipe yang berbeda. Silakan merujuk pada buku manual penggunaan dari pabrikan untuk tipe kabel yang dianjurkan.
- Saat jaringan tersambung secara rantai *daisy*, terminator jaringan harus tersedia pada kedua ujungnya.



⚠ Pyranometer tidak hanya harus terpasang dengan baik, melainkan juga harus tersambung dengan benar pada perangkat pemantauan. Ketersediaan dan keandalan data harus divalidasi dari perangkat pemantauan. Untuk sistem yang tidak dilengkapi terminator resistor internal pada jaringan RS 485, resistor tambahan sebesar 120 Ω harus terpasang.

⦿ Bagaimana memperbaiki pemasangan yang tidak aman?

- Sambungkan pyranometer ke perangkat pemantauan pada masukan yang tersedia pada sistem pemantauan.
- Apabila antarmuka Modbus RS485 tersedia pada perangkat pemantauan, pastikan pyranometer memiliki protokol komunikasi dan antarmuka yang sama untuk mencegah modul konversi data tambahan.
- Pasang kembali modul masukan analog dan atur ulang rute kabel.
- Pasang resistor terminator pada ujung jaringan serial RS485 jika tidak tersedia pada perangkat.



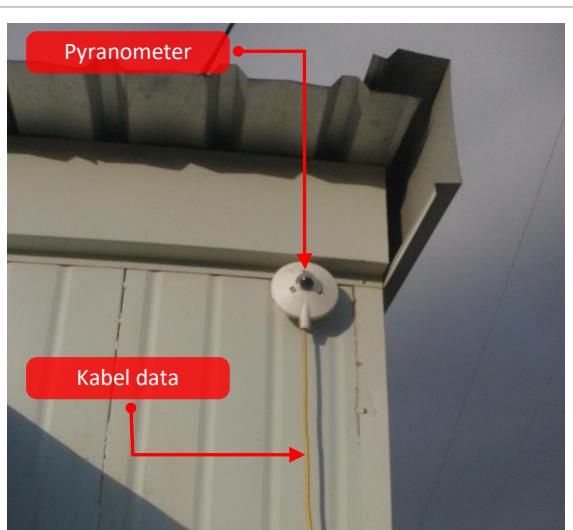
Pyranometer tersambung pada perangkat pengambil data tambahan. Data hanya dapat diperoleh dan dimonitor pada komputer.



Pengukuran iradiasi sesaat. Perangkat hanya akan menunjukkan data sesaat tanpa merekamnya.



Pyranometer terkena cahaya matahari secara langsung dan berada pada bidang yang sama dengan rangkaian modul fotovoltaik. Sunny sensorbox terpasang sebagai sensor tambahan.



Pyranometer memiliki kemungkinan tertutup bayangan dan nantinya akan memberikan data iradiasi yang tidak dapat diandalkan.

⌚ Apa yang perlu dipertimbangkan saat memasang alat pengukur iradiasi?

- Pyranometer harus dipasang pada bidang yang sama dengan rangkaian modul fotovoltaik untuk mewakili iradiasi aktual yang diterima oleh rangkaian modul fotovoltaik.
- Sama dengan modul fotovoltaik, pyranometer harus bebas dari bayangan dan tanpa potensi tertutup bayangan di masa depan.
- Pastikan validitas data iradiasi saat komisioning. Data dapat diambil dari kartu memori pada perangkat pemantauan.
- Permukaan kaca pyranometer harus selalu dibersihkan dan bebas dari kerusakan atau kotoran untuk meningkatkan transmisi cahaya ke dalam elemen *sensor*.



- Pyranometer terbebas dari bayangan namun terpasang sebidang dengan atap. Sudut kemiringan akan mengikuti sudut atap.



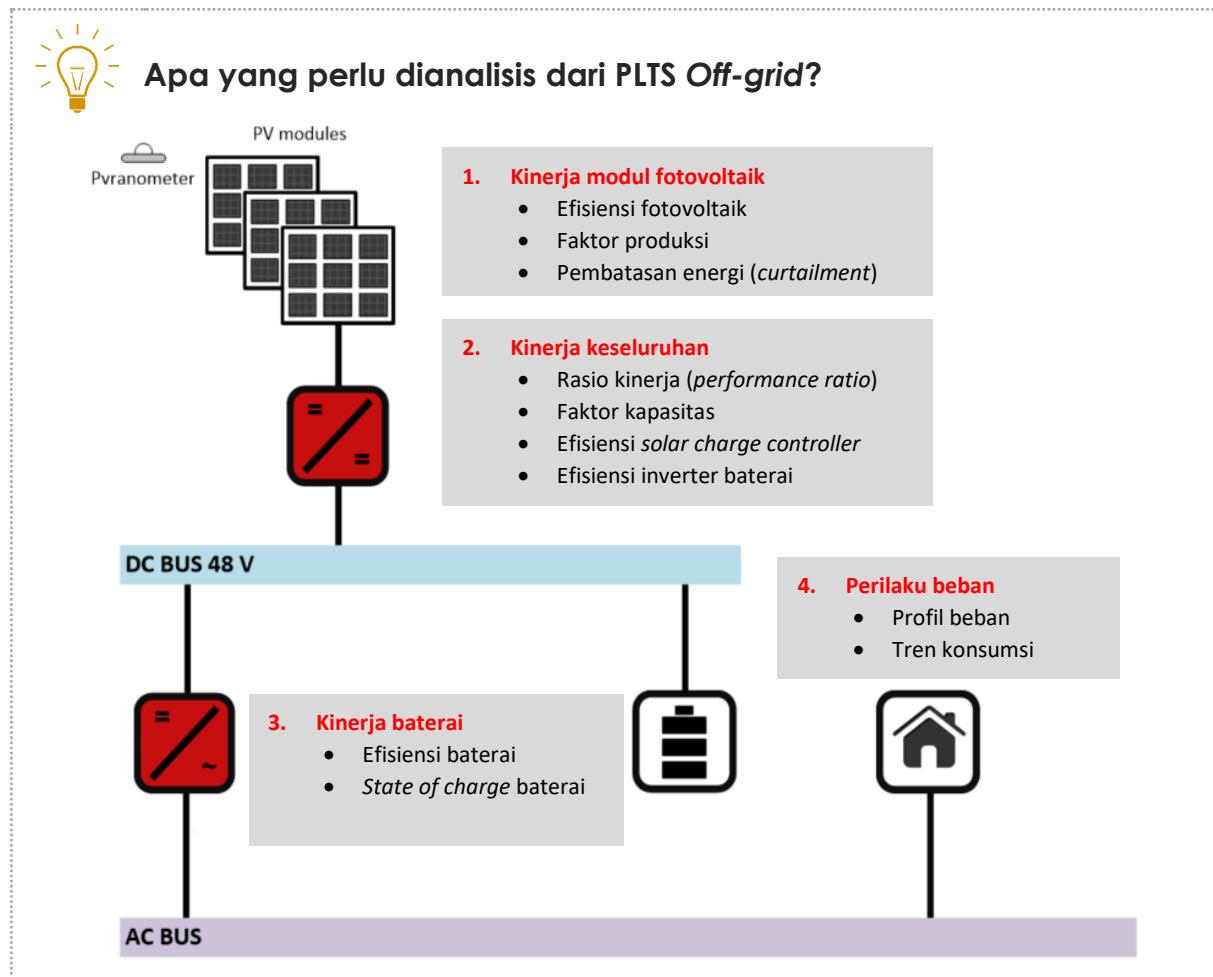
- Pyranometer terpasang di bawah bidang modul fotovoltaik. Bayangan dari modul fotovoltaik dapat menutupi sensor.



Memasang pyranometer sebidang dengan modul fotovoltaik akan memberikan analisis kinerja modul fotovoltaik pada sudut kemiringan dan posisi tertentu. Dianjurkan untuk memasang pyranometer di atas struktur rangkaian modul fotovoltaik untuk mencegah pembayangan oleh modul fotovoltaik dari sudut manapun.

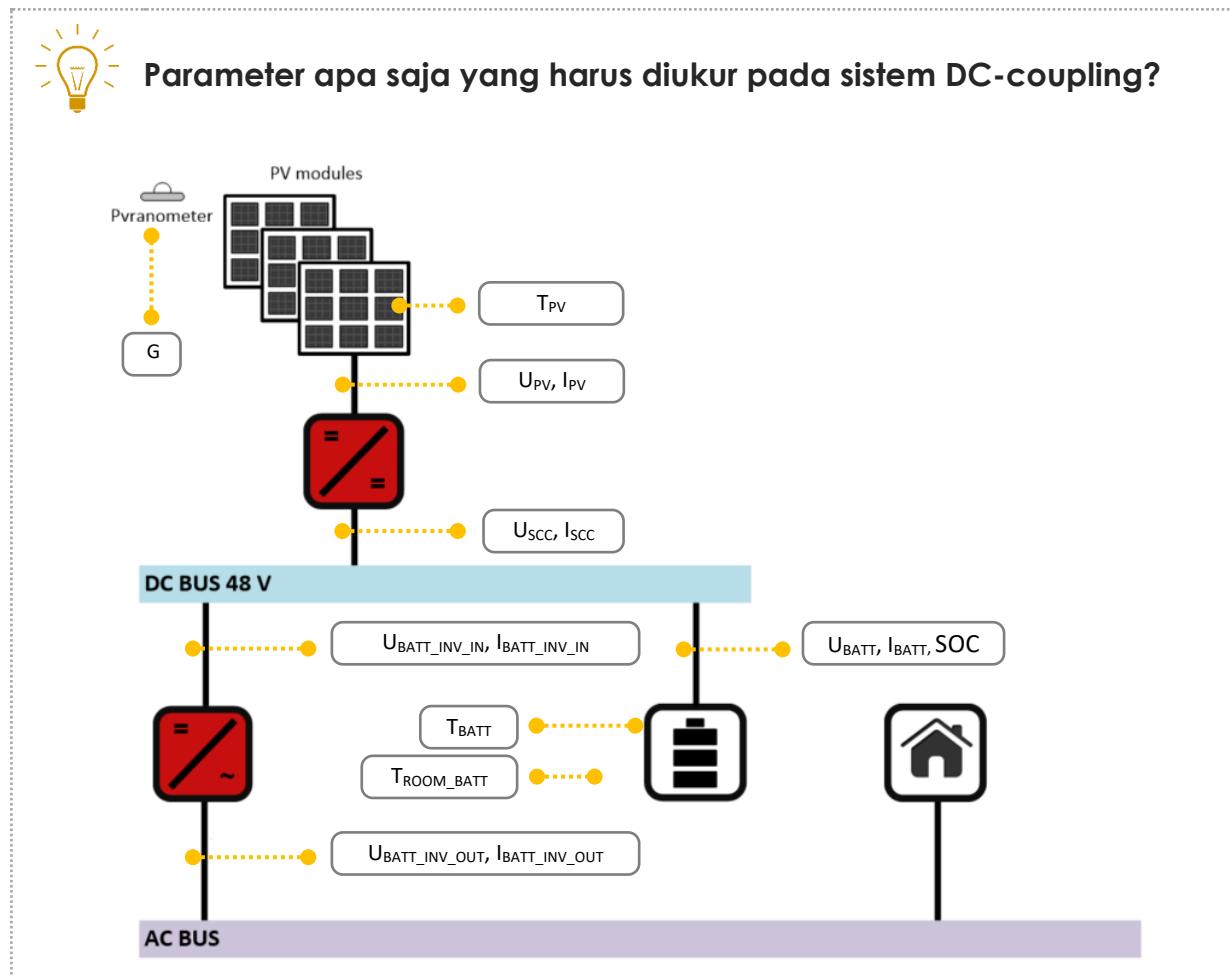
10.3. Parameter pemantauan

Pemantauan tidak hanya bagian dari proses pemeliharaan prediktif, namun juga dapat digunakan sebagai bahan evaluasi dari kinerja PLTS yang sudah dibangun. Pemantauan hanya akan menjadi penting bila data yang diperoleh dianalisis dan digunakan untuk perbaikan kedepannya. Data perlu disimpan, diolah pada tahap awal, dan dianalisis dengan benar untuk mendapatkan informasi yang terpercaya dari sistem, misalnya kinerja sistem dan efisiensi. Agar dapat mengevaluasi sistem dengan benar, indikator kinerja sebuah PLTS *off-grid* harus ditetapkan sebelum pengaturan konfigurasi. Berikut adalah sebuah pilihan alternatif untuk mengevaluasi PLTS *off-grid* dengan konfigurasi DC *coupling*.

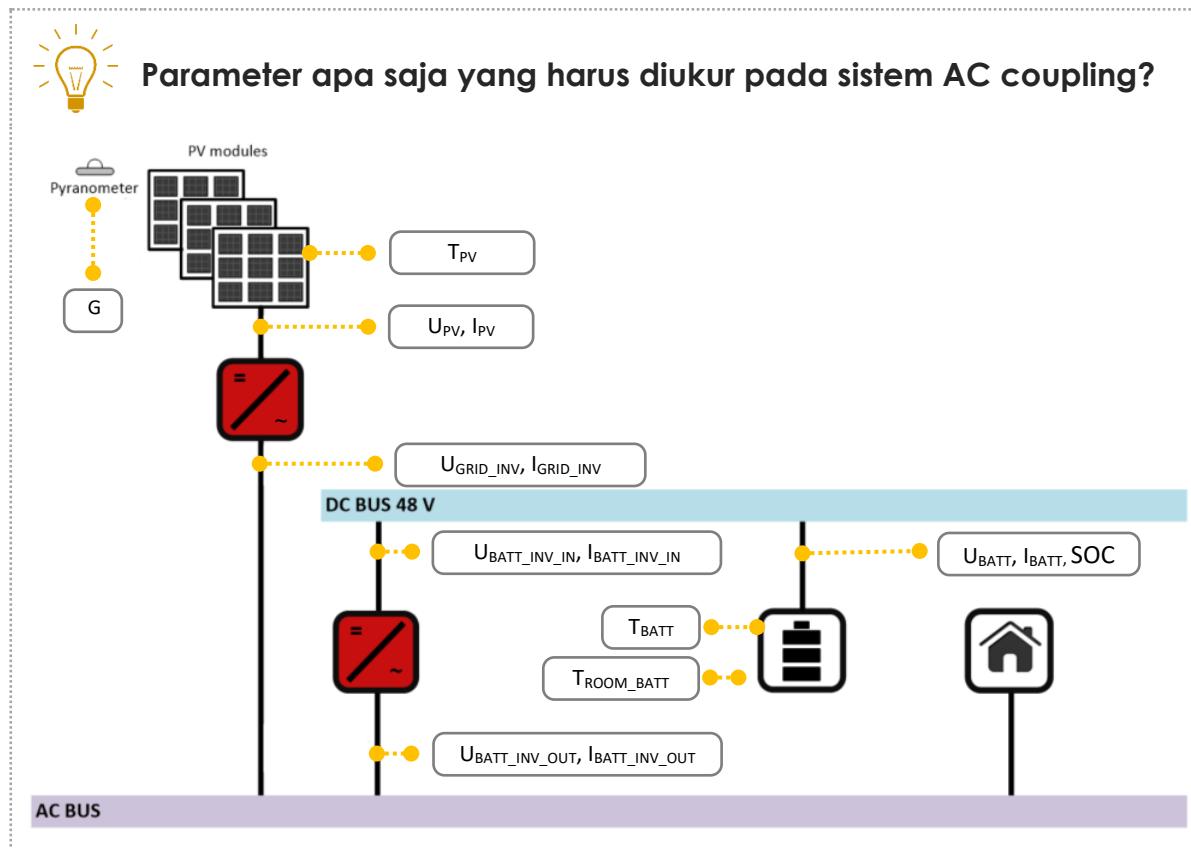


Evaluasi tidak hanya meliputi kinerja sistem secara keseluruhan seperti rasio kinerja, namun juga kinerja setiap komponen individu. Hal ini bertujuan untuk memperbaiki desain atau mengambil langkah pencegahan berkurangnya kinerja sistem, sebagai contoh: efisiensi baterai, perilaku siklus baterai, rugi-rugi energi pada modul fotovoltaik yang diakibatkan kotoran dan temperatur, dan sebagainya. Studi *“Performance Analysis of Photovoltaic Mini-grid for Rural Communities in Indonesia”*² dapat dirujuk sebagai metode evaluasi terperinci dan untuk sistem AC dan DC-coupling. Studi tersebut didasarkan pada IEC 61724 – *Photovoltaic system performance* dan dikombinasikan dengan beberapa literatur lainnya. Dalam kasus ini, terdapat parameter-parameter yang harus diukur dan direkam dalam *data logger* untuk melakukan evaluasi.

² Fadhilah, A., Ramadhan, B., *“Performance Analysis of Photovoltaic Mini-grid for Rural Communities in Indonesia”*, Jakarta, 2017.



No	Parameter	Simbol	Satuan	Komponen
1	Iridiasi	G	W/m ²	Pyranometer
2	Temperatur modul fotovoltaik	T_{PV}	°C	Sensor temperatur
3	Tegangan keluaran rangkaian modul fotovoltaik	U_{PV}	V	Solar charge controller
4	Arus keluaran rangkaian modul fotovoltaik	I_{PV}	A	Solar charge controller
5	Tegangan keluaran SCC	U_{SCC}	V	Solar charge controller (dikombinasikan)
6	Arus keluaran SCC	I_{SCC}	A	Solar charge controller (dikombinasikan)
7	Temperatur baterai	T_{BATT}	°C	Solar charge controller
8	Tegangan baterai	U_{BATT}	V	Inverter baterai (dikombinasikan)
9	Arus baterai	I_{BATT}	A	Inverter baterai (dikombinasikan)
10	Temperatur ruangan baterai	T_{ROOM_BATT}	°C	Sensor temperatur
11	Tegangan masukan inverter baterai	$U_{BATT_INV_IN}$	V	Inverter baterai (dikombinasikan tiap klaster)
12	Arus masukan inverter baterai	$I_{BATT_INV_IN}$	A	Inverter baterai (dikombinasikan tiap klaster)
13	Status pengisian baterai	SOC	%	Inverter baterai (dikombinasikan tiap klaster)
14	Tegangan keluaran inverter baterai	$U_{BATT_INV_OUT}$	V	Inverter baterai (dikombinasikan)
15	Arus keluaran inverter baterai	$I_{BATT_INV_OUT}$	A	Inverter baterai (dikombinasikan)



No	Parameter	Simbol	Satuan	Komponen
1	Iradiasi	G	W/m ²	Pyranometer
2	Temperatur modul fotovoltaik	T _{PV}	°C	Sensor temperatur
3	Tegangan keluaran rangkaian modul fotovoltaik	U _{PV}	V	Inverter jaringan
4	Arus keluaran rangkaian modul fotovoltaik	I _{PV}	A	Inverter jaringan
5	Tegangan keluaran inverter jaringan	U _{SCC}	V	Inverter jaringan
6	Arus keluaran inverter jaringan	I _{SCC}	A	Inverter jaringan
7	Temperatur baterai	T _{BATT}	°C	Inverter baterai
8	Tegangan baterai	U _{BATT}	V	Inverter baterai (dikombinasikan tiap klaster)
9	Arus baterai	I _{BATT}	A	Inverter baterai (dikombinasikan tiap klaster)
10	Temperatur ruangan baterai	T _{ROOM_BAT}	°C	Sensor temperatur
11	Tegangan masukan inverter baterai	U _{BATT_INV_IN}	V	Inverter baterai (dikombinasikan tiap klaster)
12	Arus masukan inverter baterai	I _{BATT_INV_IN}	A	Inverter baterai (dikombinasikan tiap klaster)
13	Status pengisian baterai	SOC	%	Inverter baterai (dikombinasikan tiap klaster)
14	Tegangan keluaran inverter baterai	U _{BATT_INV_OUT}	V	Inverter baterai (dikombinasikan)
15	Tegangan masukan inverter baterai	I _{BATT_INV_OUT}	A	Inverter baterai (dikombinasikan)

Terdapat parameter yang tidak diukur secara langsung oleh peralatan namun penting untuk dimasukkan pada sistem pemantauan, yaitu temperatur modul dan temperatur ruangan baterai. Data tersebut harus diukur menggunakan sensor tambahan dan disambungkan pada perangkat pemantauan dengan protokol yang tersedia atau umumnya menggunakan Modbus RS 485.



Sebuah parameter yang diperlukan harus terdaftar dan masuk dalam penyimpanan data atau kartu memori. Beberapa pabrikan hanya menyediakan jumlah data yang terbatas untuk dapat disimpan di dalam *data logger*. Dalam hal ini, lebih baik menyimpan kombinasi atau gabungan data dari beberapa komponen dengan fungsi yang sama, sebab menyimpan data dari komponen individu tidak memungkinkan akibat keterbatasan sistem.

⇒ Bagaimana cara memastikan data yang terpercaya?

- Pastikan kartu penyimpanan data atau kartu memori sudah diformat dan dimasukkan pada perangkat pemantauan. Ukuran kartu memori harus sekurangnya cukup untuk satu (1) tahun dengan interval pencatatan satu (1) menit. Sebaiknya sediakan kartu memori dengan ukuran minimum 2 GB.
- Data dalam kartu memori harus diverifikasi saat komisioning yang mencakup interval, parameter yang tercatat (*logged*), dan akurasi nilainya. Data pengukuran selama seminggu harus disediakan sebagai bagian dari laporan komisioning.
- Analisis kinerja sederhana harus dilakukan saat komisioning untuk memvalidasi data dengan menggunakan sekurangnya data pengukuran selama satu minggu. Proses ini dapat mengurangi anomali pada pengukuran, sehingga mencegah kesalahan analisis sesudahnya.

Logging Status
Logging In Progress

SD Card Total
3.866 GB

SD Card Used
1.203 GB

Estimated Time To Fill
More Than 10 Years

Custom Logging Status

SD Card Usage

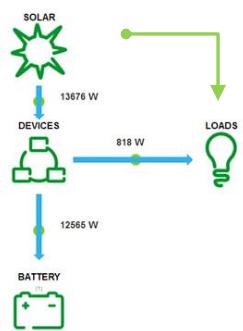
Used: 31.11
Total: 3.866 GB
Used: 1.203 GB
Estimated Time To Fill: More Than 10 Years

Number Of Logged Items: 20
Logging Interval: 1 Minute
File Creation Interval: Daily

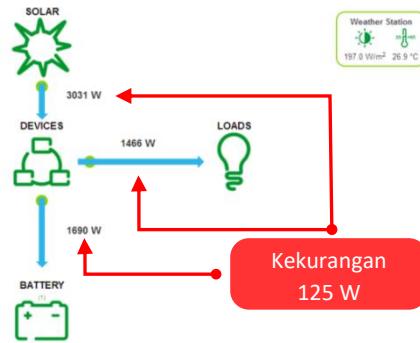
Informasi pencatatan (*logging*) data menunjukkan bahwa kartu memori 4 GB akan terpakai penuh setelah penggunaan lebih dari 10 tahun dengan interval pencatatan 1 menit.



ComBox-B12884821



Antar muka jaringan sistem menunjukkan aliran daya yang benar. Jumlah daya masukan dan keluaran sesuai.



Aliran daya yang tidak realistik dengan nilai daya masukan kurang dari keluaran. Hal ini disebabkan oleh satu inverter yang tidak tersambung pada perangkat pemantauan.



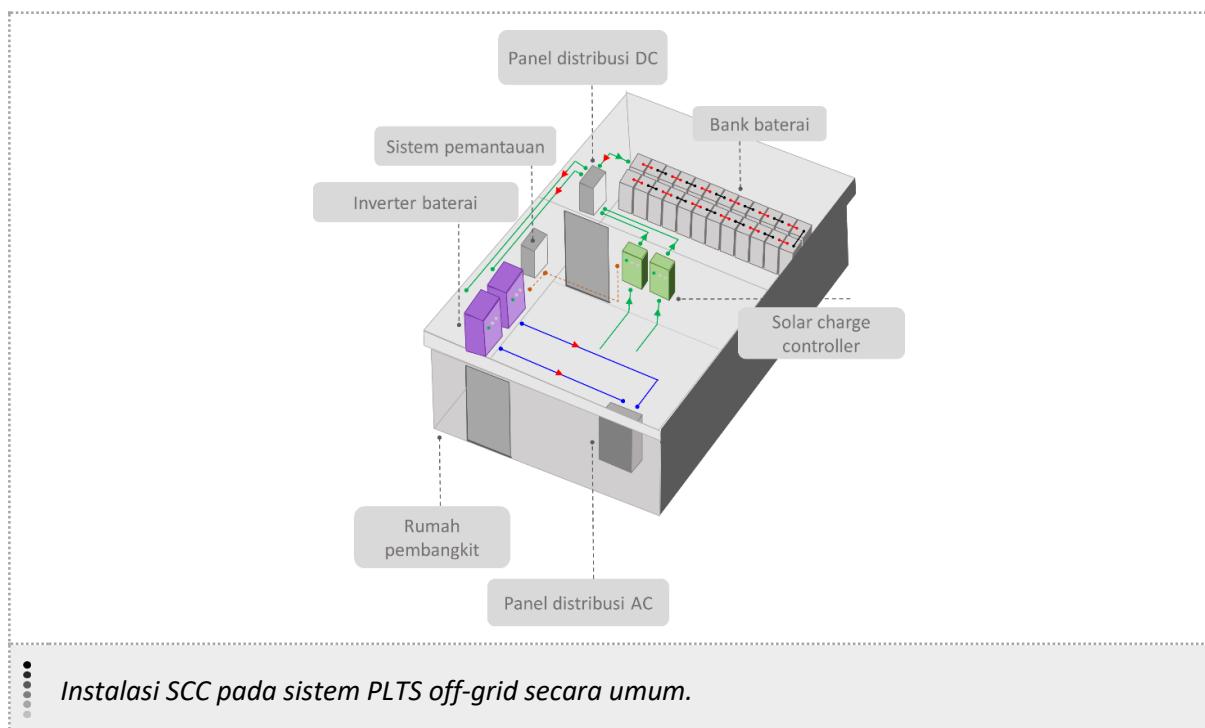
Bab 11:

Rumah Pembangkit

- ✓ Hal-hal yang perlu dipertimbangkan saat merancang rumah pembangkit
- ✓ Contoh konstruksi pembangunan rumah pembangkit dan pagar pelindung
- ✓ Pemasangan kabel di dalam rumah pembangkit

11.1. Dasar-dasar rumah pembangkit

Rumah pembangkit adalah tempat untuk melindungi seluruh perangkat, terutama peralatan listrik yang sensitif dari lingkungan luar, cuaca, serta akses tanpa izin. Bangunan ini umumnya terbagi dalam dua ruangan, yang terdiri dari ruangan baterai dengan bank baterai dan ruangan control yang berisi komponen elektronik daya dan panel distribusi. Bangunan biasanya terbuat dari beton atau poliuretan tergantung ketersediaan material dan spesifikasi. Dimensi serta tata letak bangunan ini harus memberikan fleksibilitas untuk operator atau teknisi dalam mengoperasikan sistem dan melakukan tindakan pemeliharaan maupun perbaikan.



Rumah pembangkit terbuat dari beton dan dicat. Rumah pembangkit terletak di bawah pohon untuk perlindungan dari sinar matahari dan menjaga temperatur tetap rendah.



Rumah pembangkit yang terbuat dari baja galvanis ringan yang dicat sebelumnya, dengan busa poliuretan sebagai material isolasi.



- Rumah pembangkit dibangun pada tempat yang tinggi untuk mencegah air masuk saat banjir.



- Banjir di rumah pembangkit dapat mengakibatkan kerusakan listrik, merusak komponen listrik serta membahayakan operator akibat tersengat listrik.

⇒ Apa saja yang harus dipertimbangkan saat membangun rumah pembangkit?

- Rumah pembangkit harus dirancang dengan ventilasi dan pencahayaan yang cukup, serta aman dari air dan gangguan binatang. Insulasi panas yang baik harus disediakan untuk mengurangi kenaikan temperatur di dalam rumah pembangkit akibat paparan sinar matahari.
- Lahan harus aman dari risiko bencana alam seperti banjir atau tanah longsor. Risiko kerusakan komponen akibat bencana alam harus dicegah.
- Seluruh sistem pembangkit harus terlindung dari gangguan binatang dan orang yang tidak berkepentingan dengan menggunakan pagar pelindung.
- Rumah pembangkit sebaiknya berlokasi dekat pemukiman dengan tujuan mengurangi rugi-rugi listrik dalam jaringan.
- Tanda peringatan terhadap risiko bahaya dalam pekerjaan kelistrikan, seperti tersengat listrik serta ledakan, harus tersedia pada sistem pembangkit untuk meningkatkan kesadaran operator dan teknisi.



- Rumah pembangkit dan rangkaian modul surya dipasang di atas platform kayu untuk melindungi dari banjir.



- Tanah longsor di lokasi yang mengakibatkan terkuburnya rumah pembangkit.



Rumah pembangkit beserta seluruh komponen listrik harus dibangun lebih tinggi dari ketinggian banjir yang telah disurvei. Ketinggian banjir serta informasi historis lainnya harus diperoleh dari masyarakat setempat sebelum pembangunan dilakukan.

⦿ Bagaimana menghindari banjir dan risiko terjadinya tanah longsor?

- Lakukan pemetaan bahaya banjir dan penilaian kondisi tanah saat studi kelayakan untuk memilih tempat yang paling tepat untuk membangun pembangkit listrik.
- Hindari membangun pembangkit dekat dengan daerah lereng yang curam dan resiko longsor.
- Apabila lokasi yang dipilih masih rentan terhadap banjir, lakukan survei terhadap sebab dan sumber banjir, frekuensi terjadinya banjir, serta ketinggian banjir yang mungkin terjadi, untuk digunakan sebagai referensi dalam merancang pondasi dan struktur pendukung.
- Sediakan sistem drainase yang cukup untuk menampung keseimbangan air di lokasi.
- Bangun dinding penahan dan lakukan penanaman di area rumah pembangkit untuk mengurangi bahaya tanah longsor.



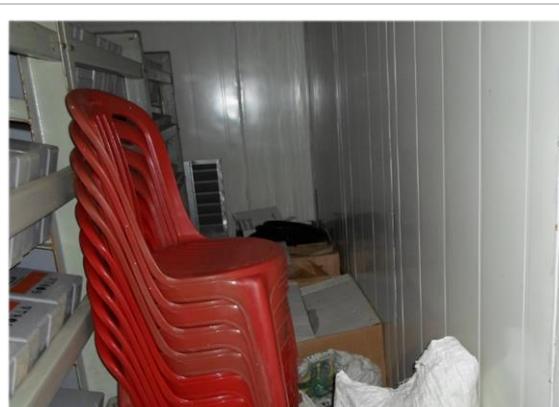
- Jalan yang dibangun dengan baik untuk mengakses rangkaian modul fotovoltaik.



- PLTS terpasang di lahan berlumpur dan berair tanpa jalan yang cukup memadai untuk mengakses rumah pembangkit.



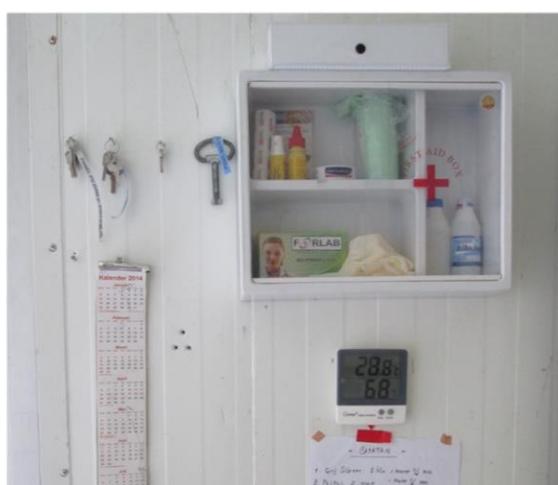
- Rumah pembangkit yang dibangun dengan bersih dan rapi serta dilengkapi dengan tanda peringatan.



- Rumah pembangkit tidak seharusnya digunakan sebagai gudang. Hanya komponen, suku cadang dan perkakas terkait yang boleh disimpan di sana.

⇒ Peralatan apa saja yang harus tersedia di rumah pembangkit?

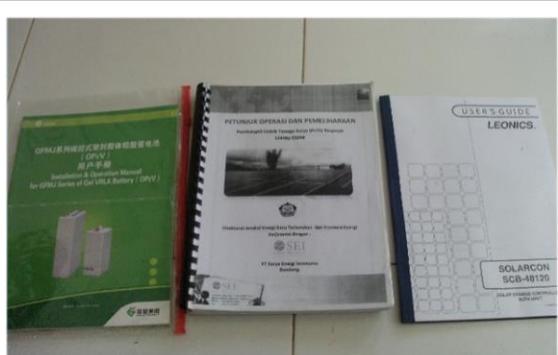
- Perangkat keamanan seperti sepatu pengaman dan sarung tangan insulasi kelas 0 sampai 1000 VAC/1500 VDC.
- Set obeng dan kunci pas terinsulasi atau set kunci sok (*socket wrench*).
- Multimeter klem digital untuk mengukur tegangan dan arus AC/DC.
- Tangga untuk melakukan layanan atau pemeliharaan pada lokasi yang lebih tinggi seperti membersihkan modul surya, dll.
- Termometer digital, sebaiknya yang menggunakan laser inframerah.
- Petunjuk pengoperasian dan pemeliharaan PLTS *off-grid* serta petunjuk penggunaan komponen dalam bahasa yang bisa dimengerti oleh operator.



Kotak Pertolongan Pertama Pada Kecelakaan (P3K) tersedia di rumah pembangkit untuk penanganan bila terjadi kecelakaan. Pemantauan temperatur tersedia di rumah pembangkit.



Alat Pemadam Api Ringan (APAR) tersedia untuk keadaan darurat. Jarum penunjuk tekanan harus berada dalam indikator hijau dan harus diperiksa secara rutin.



Panduan pengoperasian dan pemeliharaan untuk operator. Buku-buku tersebut harus dapat dimengerti oleh operator.



Set kunci pas dan multimeter untuk digunakan oleh operator dalam melakukan pemeliharaan rutin.



11.2. Pagar pelindung

PLTS *off-grid* harus dilengkapi dengan pagar pelindung di sekelilingnya untuk melindungi keseluruhan instalasi dari orang yang tidak berkepentingan dan binatang liar. Hal ini akan memastikan tidak hanya operasional dari sistem, tapi juga sebagai tindakan keamanan untuk menjaga jarak antara komponen berlistrik dengan orang-orang di luar area pembangkit listrik. Oleh karena itu, pemasangan pagar yang kokoh dan benar menjadi penting.



- Pagar pelindung terpasang dengan benar dengan jarak yang baik dari tanah serta dilengkapi tanda peringatan.



- Jarak yang sangat tinggi antara pagar dan tanah akan memungkinkan binatang dan orang memasuki area pembangkit listrik.



- Pondasi pagar terbangun sempurna dengan ketinggian yang baik. Dua-pertiga (2/3) tinggi pondasi harus terkubur.

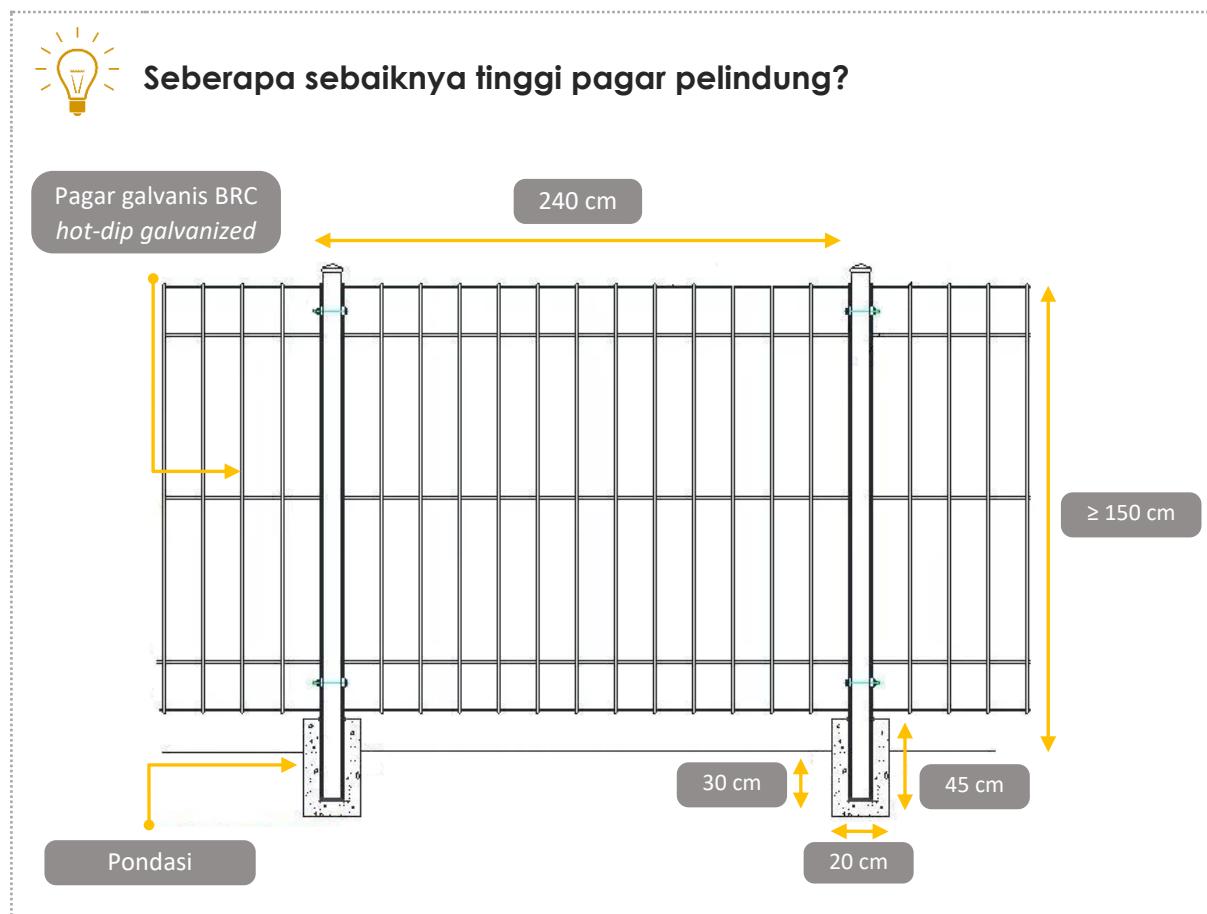


- Pondasi tidak terkubur dan tidak dalam bentuk balok yang lengkap. Cetakan kayu masih menempel pada beton.

⇒ Bagaimana cara memperbaiki instalasi yang demikian?

- Pasang pagar tambahan untuk menutupi celah. Cela antara pagar dan tanah tidak boleh memungkinkan orang dan binatang untuk masuk, yang dapat membahayakan instalasi.
- Alternatif lain, bangun ulang pondasi atau perpendek ketinggian tersebut menjadi hanya 15 cm dari tanah apabila kontur tanah memungkinkan.

- Tambal pondasi dengan campuran beton yang baik (satu takaran semen, tiga takaran pasir, dan tiga takaran kerikil). Pastikan pondasi memiliki ketinggian yang cukup (45 cm) dan pasang beton pada kedalaman 30 cm dan 15 cm bagian terlihat.



- Engsel gerbang berkarat. Kualitas engsel yang buruk dapat menyebabkan gerbang rusak.



- Erosi tanah di sekitar pondasi pagar dapat menyebabkan ketidakstabilan. Perbaiki pondasi, padatkan tanah dan buat sistem drainase.



Pagar BRC harus dilapisi material seng (*galvanis hot-dip*) untuk mencegah korosi terutama bila dipasang di tempat dengan kelembapan udara tinggi dan berkadar garam tinggi.



- Instalasi pagar pelindung yang baik dengan tinggi yang cukup. Pondasi tambahan dipasang untuk tanah yang berpasir.



- Pagar yang miring ditahan dengan tiang penyangga. Perbaiki pondasi dan luruskan pagar.

11.3. Konstruksi rumah pembangkit

Pembangunan rumah pembangkit harus mempertimbangkan kualitas pondasi, ukuran rumah pembangkit yang memadai, ventilasi, dan konstruksi pondasinya harus mengakomodasi pengalihan aliran air atau sistem drainase. Ukuran rumah pembangkit harus didasarkan pada jumlah komponen yang terpasang serta memberikan ruang yang cukup bagi operator untuk mengoperasikan dan melakukan pemeliharaan.

■■■ Pondasi rumah pembangkit



- Pondasi yang sangat baik dengan jarak pinggiran beton yang sempurna dari dinding.



- Pondasi retak diakibatkan campuran beton yang buruk. Tambal beton dengan campuran yang lebih baik.



Area pondasi rumah pembangkit setidaknya harus lebih besar dari bangunan rumah pembangkit dengan jarak 70 cm dari dinding di sisi depan serta 20 cm untuk sisi lainnya. Pondasi tersebut harus dibangun dengan kedalaman minimum 50 cm.



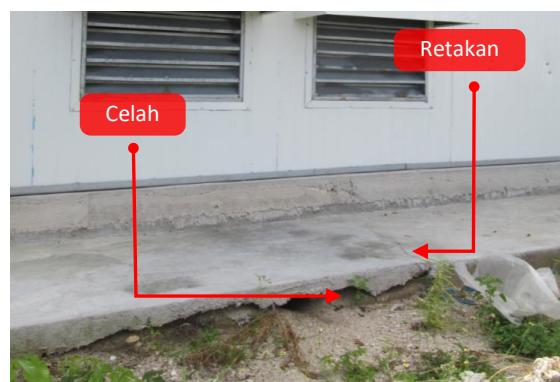
- Rumah pembangkit berkualitas baik dengan pondasi dan pinggiran yang baik.



- Tidak ada pinggiran beton. Ukuran pondasi yang tidak memadai.



- Keretakan pada pondasi yang mungkin disebabkan oleh tanah longsor.



- Pondasi yang terkikis. Pengikisan lebih jauh dapat menyebabkan pondasi mengambang dan mengakibatkan keretakan pondasi.

➲ Bagaimana memperbaiki instalasi yang demikian?

- Tambal celah dengan rasio campuran beton yang baik.
- Dinding penyangga harus dibangun apabila rumah pembangkit berlokasi di lereng.
- Sistem drainase harus dibangun terpisah untuk mencegah air mengalir dekat ke pondasi yang dapat menyebabkan pengikisan.

■■■ Ventilasi rumah pembangkit



- Kanopi tersedia untuk melindungi ventilasi dari sinar matahari secara langsung.



- Jendela rumah pembangkit tidak dilengkapi kanopi. Sinar matahari dari sudut tertentu dapat secara langsung mengenai komponen di dalamnya.



Kanopi harus dipasang untuk memberikan perlindungan bagi jendela dari kondisi cuaca seperti hujan dan sinar matahari secara langsung.



- Ventilasi silang yang dikombinasikan dengan kipas pembuang (exhaust) untuk mengeluarkan panas dari dalam ruangan.



Tidak ada ventilasi

- Ventilasi yang tidak memadai dalam memberikan sirkulasi udara di dalam ruangan baterai dan untuk menjaga temperatur ruangan tetap rendah.

➲ Mengapa rumah pembangkit harus dilengkapi dengan ventilasi yang memadai?

- Temperatur ruang baterai tidak boleh terlalu tinggi untuk memastikan umur pakai baterai yang diharapkan. Temperatur ruangan 30°C dapat mengurangi umur pakai baterai secara signifikan.
- Menjaga konsentrasi hidrogen di dalam ruangan tetap rendah saat proses pengisian baterai *lead-acid*. Hidrogen bersifat mudah meledak, bahkan percikan kecil dapat menyebabkan ledakan.



- Temperatur ruangan harus divalidasi tidak terlalu panas saat komisioning dan diperiksa secara rutin oleh operator. Pendinginan harus dilakukan saat temperatur melebihi batas yang direkomendasikan.



Rumah pembangkit harus memiliki ventilasi yang memadai untuk menjaga temperatur ruangan tidak lebih dari 30°C atau perbedaan antara temperature dalam ruangan dan luar tidak lebih dari 2°C. Ventilasi tidak boleh terhalang oleh komponen apapun.

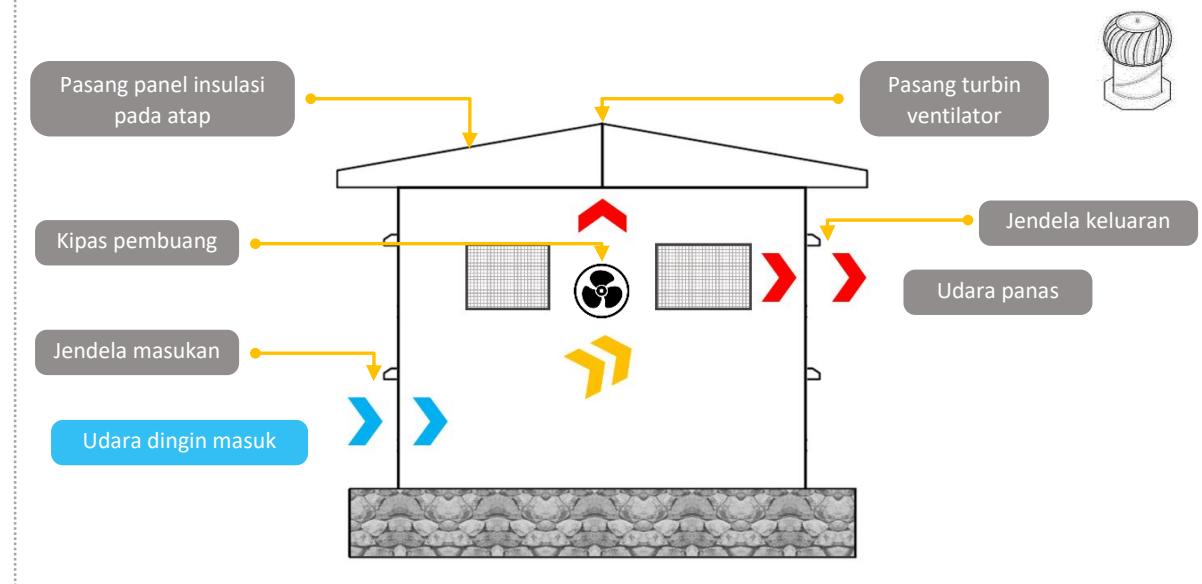


Bagaimana meningkatkan pendinginan rumah pembangkit?

Pendinginan rumah pembangkit dapat dilakukan menggunakan metode aktif maupun pasif. Pendinginan pasif adalah metode yang menggunakan rancangan bangunan untuk mengontrol pembuangan panas di dalam bangunan tanpa konsumsi energi atau disebut konveksi alami. Sedangkan pendinginan aktif akan memaksa udara untuk bergerak atau meningkatkan perpindahan panas menggunakan energi atau perangkat tambahan seperti kipas angin atau alat pengatur udara (AC, *air conditioner*).

- Pilihan pendinginan pasif:**

- Ventilasi silang (cross-ventilation)** dengan meletakkan jendela masuk dan keluar pada sisi berlawanan untuk memungkinkan angin mengalir secara alami. Sistem ini bergantung pada hembusan angin ke dalam bangunan melalui jendela masuk dan dikarenakan konveksi alami, udara panas mengalir menuju jendela keluar. Dalam hal ini, jendela harus memungkinkan udara mengalir dan jendela masuk harus ditempatkan pada kemungkinan arah angin berhembus.
- Turbin ventilator** dapat meningkatkan laju ventilasi ruangan.
- Panel insulasi untuk atap** digunakan untuk mengurangi konveksi dengan cara menjebak udara pada panel dan menggunakan udara yang terjebak untuk menghentikan konduksi.



- **Pilihan pendinginan aktif:**

- **Kipas buang (exhaust fan atau kipas angin)** dapat digunakan saat pendinginan pasif atau konveksi alami tidak memadai untuk mengeluarkan panas atau meniupkan udara dingin masuk. Kipas angin harus dikontrol oleh alat pengatur panas (*thermostat*).
- **Alat pengondisi udara (AC, air conditioner)** dapat secara signifikan menjaga temperatur ruangan tetap dingin. Namun demikian, perangkat ini dapat mengkonsumsi listrik setidaknya 10 kWh per hari. Ini bisa menjadi pilihan yang menguntungkan ketika konsumsi energi AC per hari kurang dari energi yang hilang karena masa pakai baterai berkurang. Sistem pengelolaan energi yang pintar harus dipertimbangkan ketika menggunakan AC.



- Bukaan ventilasi tertutup oleh kasa serangga untuk mencegah binatang memasuki rumah pembangkit.



- Kasa serangga yang rusak memberi jalan masuk bagi binatang. Kabel tidak seharusnya melewati jendela.



Ventilasi harus selalu tertutup kisi-kisi ventilasi dan jaring atau kasa serangga untuk meningkatkan aliran udara dan melindungi dari binatang.



- Bukaan ventilasi yang buruk. Kasa yang lebih kecil seharusnya digunakan.



- Jendela kaca pecah. Lebih baik menggunakan jendela terbuka dengan kisi-kisi dan kasa sebagai ganti jendela kaca.

⌚ Bagaimana memperbaiki instalasi yang demikian?

- Tambal lubang pada kasa atau bila memungkinkan lakukan pengaturan ulang arah kabel distribusi jaringan. Kabel *feeder* sebaiknya dipasang di bawah tanah dengan perlindungan pipa PVC.
- Pasang dan ganti jendela kaca yang pecah dengan kisi-kisi ventilasi dan kasa serangga.

████████ Instalasi titik masukan kabel



- Kabel-kabel dari kotak penggabung terpasang di bawah tanah dan terlindungi di dalam pipa PVC.



- Kabel terpasang di atas tanah tanpa proteksi apapun dari paparan sinar matahari. Semen digunakan untuk menutup masukan kabel.



Jangan pernah gunakan semen untuk menutup masukan kabel. Penggunaan semen dapat menurunkan sifat insulasi kabel dan menyebabkan hilangnya fleksibilitas kabel karena pemasangan semen yang bersifat permanen.



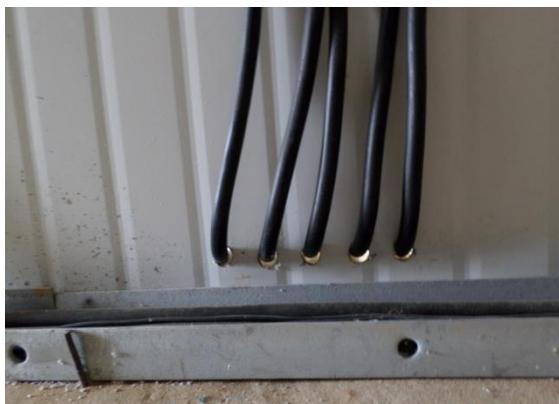
- Kabel yang keluar menuju jaringan melewati pondasi dan terlindung di dalam pipa.



- Ventilasi seharusnya tidak digunakan untuk tempat masuknya maupun keluarnya kabel.



- Genangan dan kotoran di dalam terowongan akibat terowongan kabel yang tidak tertutup. Terowongan yang tidak tertutup bisa menjadi jalan masuk binatang pengerat dan reptil.



- Kabel seharusnya tidak masuk melalui dinding rumah pembangkit. Tidak adanya gland kabel dapat menyebabkan kerusakan isolasi.



Ujung tajam dinding baja dan gesekan dengan kabel dapat menyebabkan terkelupasnya isolasi dan mengakibatkan hubungan arus pendek. Ruangan (*shelter*) harus dibumikan.

11.4. Instalasi di dalam rumah pembangkit



- Pemasangan komponen daya listrik yang terorganisir dan rapi. Kabel terpasang rapi di dalam tray kabel.



- Lantai belum selesai dan kabel tidak rapi. Lantai seharusnya dipasang keramik putih. Semua kabel seharusnya dipasang di dalam konduit.

➲ Mengapa menggunakan ubin lantai keramik?

- Keramik anti air dan noda.
- Mudah untuk memelihara dengan mengelap atau mengepel kotoran, air atau noda.
- Lebih tahan lama dan sulit untuk retak.



- Televisi terpasang di rumah pembangkit. Rumah pembangkit seharusnya tidak digunakan untuk tempat umum atau hiburan.



- Lemari pendingin mengkonsumsi listrik tanpa pembatas energi di dalam rumah pembangkit.

! Peralatan selain komponen PLTS *off-grid* seharusnya tidak dipasang di dalam rumah pembangkit. PLTS *off-grid* ditujukan untuk masyarakat dan bukan untuk penggunaan pribadi. Perangkat hiburan seharusnya dipasang di tempat umum untuk mencegah orang-orang yang tidak berkepentingan masuk ke dalam rumah pembangkit. Adanya perangkat elektronik tambahan dapat membuat sumber panas di dalam rumah pembangkit dan penggunaan energi tambahan.



- Kabel pembumian terpasang dengan rapi dengan metode peletakan langsung



- Pemasangan kabel yang tidak rapi dapat menyebabkan kesulitan saat terjadi masalah atau kesalahan.



- Kabel terlindungi dan tertutup di dalam jalur kabel.



- Pengabelan internal yang berantakan.
- Jalur kabel bawah tanah seharusnya tertutup



Kabel harus dipasang dengan rapi dengan metode peletakan langsung. Faktor koreksi akibat pengelompokan dan pemasangan bawah tanah harus dipertimbangkan saat menghitung ukuran konduktor yang diperlukan.

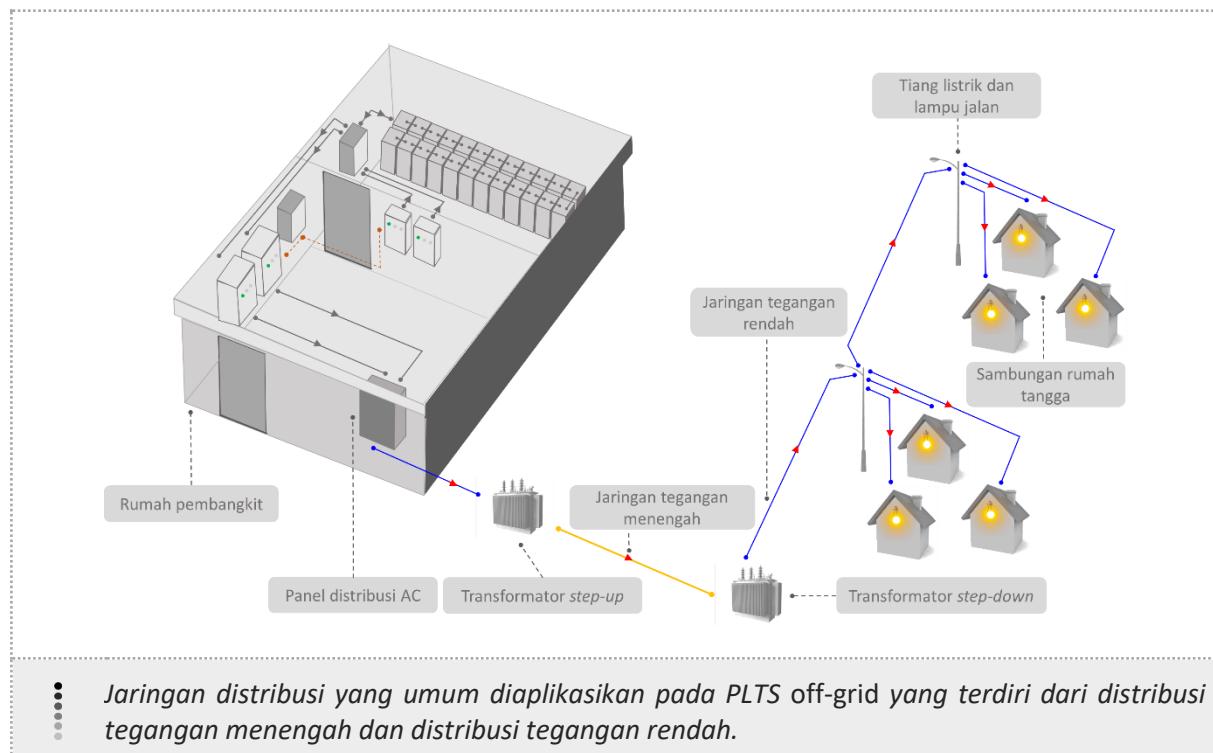
Bab 12:

Jaringan Distribusi

- ✓ *Bagaimana konfigurasi ideal jaringan distribusi?*
- ✓ *Contoh baik dan kurang baik instalasi dan konstruksi jaringan distribusi*
- ✓ *Pemasangan lampu penerangan jalan yang direkomendasikan*
- ✓ *Distribusi tegangan menengah*

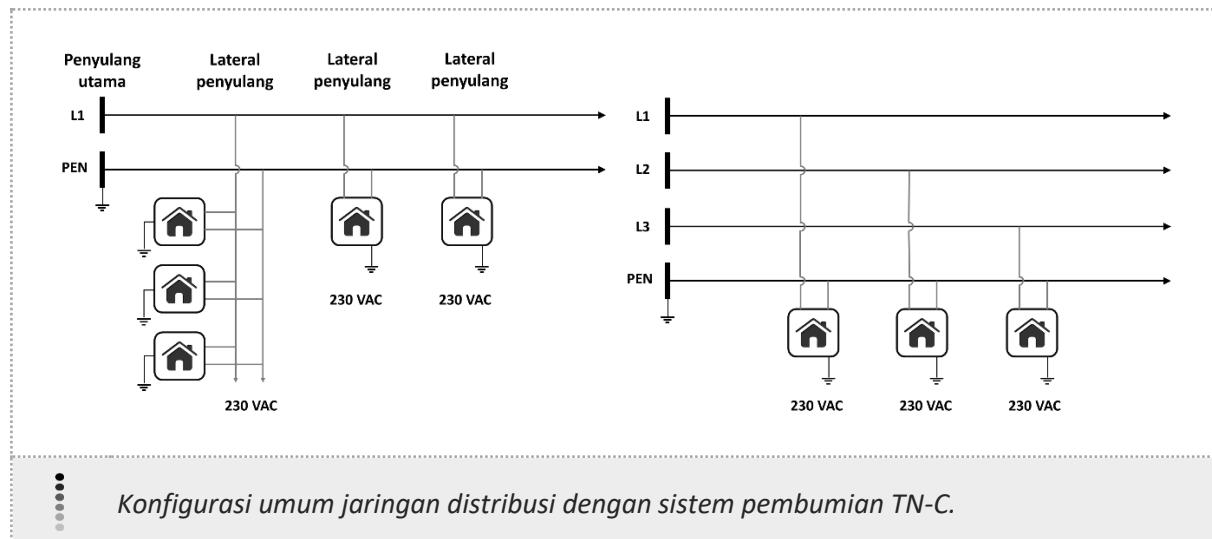
12.1. Dasar-dasar jaringan distribusi

Jaringan distribusi mengalirkan listrik dari rumah pembangkit ke rumah tangga melalui sistem tegangan rendah (TR) sistem satu fasa (230 V) atau tiga fasa (400 V). Rancangan konfigurasi garis pada dasarnya tergantung pada kapasitas PLTS *off-grid* dan jumlah konsumen. Sistem dengan kapasitas setara atau lebih besar dari 15 kWp biasanya menggunakan konfigurasi tiga fasa, sementara sistem yang lebih kecil menggunakan konfigurasi satu fasa. Sistem konfigurasi pada PLTS *off-grid* umumnya menggunakan sistem radial yang mana jaringan listrik didistribusikan secara radial dari inverter baterai sebagai penyulang (*feeder*) utama dan dicabangkan ke beberapa saluran cabang (lateral penyulang) menuju sambungan rumah tangga yang dilayani.



Pada jaringan distribusi satu fasa, daya dibagi ke beberapa saluran cabang pada panel distribusi AC. Jumlah saluran cabang atau lateral penyulang tergantung pada lokasi dan jumlah konsumen atau rumah tangga yang terhubung ke jaringan. Pada sistem tiga fasa, lateral penyulang terhubung ke fasa yang berbeda dan harus didistribusikan secara merata untuk menghindari tegangan yang tidak seimbang.

Komponen utama pada jaringan distribusi adalah tiang jaringan, kabel saluran udara dan kabel penopang. Lampu penerangan jalan dibahas dalam bab ini karena menggunakan tiang jaringan yang sama dan terpasang pada jalur distribusi yang sama meskipun lampu penerangan jalan bukan merupakan komponen utama pada sistem distribusi. Jaringan distribusi mencakup jaringan tegangan menengah (TM) ketika terdapat beban yang tinggi dan jarak yang relatif jauh antara rumah pembangkit dan rumah tangga (konsumen) yang dapat menyebabkan jatuh tegangan yang tinggi. Dalam hal ini, jaringan distribusi harus menggunakan trafo penaik tegangan tiga fasa dari 400 V ke 20 kV dan trafo penurun tegangan dari 20 kV ke 400 V.



Jaringan distribusi menghantarkan listrik dari rumah pembangkit ke rumah tangga dan dipasang di sepanjang jalan hingga mencapai pengguna listrik atau konsumen. Oleh karena itu, kualitas instalasi yang aman dan andal harus terjaga untuk mencegah kecelakaan atau kerusakan sistem. Kualitas instalasi yang kurang baik tidak hanya dapat mengakibatkan seluruh penyulang mati tapi juga dapat menyebabkan sengatan listrik pada warga sekitar jaringan distribusi.

⦿ Apa yang harus diperhatikan saat merancang dan membangun jaringan distribusi?

- Semua instalasi harus mengikuti standar praktis terbaik dan standar konstruksi lokal untuk jaringan distribusi tegangan rendah, distribusi tegangan menengah serta instalasi gardu distribusi¹. Standar menjelaskan secara rinci jarak minimum antara permukaan tanah dengan kabel saluran udara, rentang kabel yang memadai, penopang kabel yang sesuai, dsb.
- Kabel saluran udara harus kuat dan tahan cuaca. Kabel saluran udara pada PLTS *off-grid* dianjurkan menggunakan kabel udara terpilin dengan spesifikasi NFA2X-T kabel terpilin 3x35 mm² + 1x25 mm² + 1x16 mm² (tiga fasa + neutral + lampu jalan) untuk lateral penyulang sambungan rumah tangga serta lampu penerangan jalan. Ukuran kabel dapat berubah bergantung pada jarak dan beban.
- Skema pembumian jaringan distribusi harus mengikuti peraturan setempat yang berlaku. Sistem TN-C merupakan sistem yang umum digunakan di Indonesia untuk jaringan distribusi. TN-C adalah konfigurasi dimana konduktor netral dan pembumian digabungkan (PEN).
- Letak geografis rumah tangga. Pemetaan rumah tangga harus dilakukan sebelum pembangunan untuk mengidentifikasi dan merancang rute jaringan distribusi, lokasi tiang dan panjang total jaringan.
- Penurunan tegangan pada jaringan yang dapat diterima tidak lebih besar dari 10% dari nominal tegangan.

¹ PT. PLN (Persero), Buku 1: Kriteria desain enjinering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. Buku 3: Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Rendah Tenaga Listrik. Buku 4: Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik. Buku 5: Standar Konstruksi Jaringan Tegangan Menengah Tenaga Listrik, 2010



Bagaimana cara menghitung jatuh tegangan pada jaringan distribusi?

1. Perkirakan beban puncak atau dengan menggunakan daya nominal dari total inverter baterai

$$\text{Perkiraan beban puncak} = 30 \text{ kW}$$

2. Periksa spesifikasi dari kabel yang telah dipilih seperti dan reaktansi dari *datasheet*.

$$\text{NFA2X-T } 3 \times 35 \text{ mm}^2 + 25 \text{ mm}^2 \rightarrow \\ R = 0.868 \text{ Ohm/km} \mid X = 0.098 \text{ Ohm/km}$$

3. Perkirakan faktor daya beban. Faktor daya 0.9 dapat digunakan karena sebagian besar beban adalah lampu LED, kecuali jika teridentifikasi lebih banyak beban induksi.

$$\text{Faktor daya} = 0.9 \\ \phi = \arccos (0.9) = 25.84$$

4. Hitung arus beban nominal berdasarkan perkiraan beban puncak.

$$\text{Arus beban} = \frac{\text{Perkiraan beban puncak}}{\sqrt{3} \times \text{Tegangan Nominal}}$$

$$\frac{30,000 \text{ W}}{\sqrt{3} \times 400 \text{ V}} \quad 43 \text{ A}$$

5. Ukur jarak antara rumah pembangkit dengan sambungan rumah tangga. Pertimbangkan jalur untuk jaringan distribusi. Hal ini akan menentukan panjang kabel.

$$\text{Panjang kabel} = 500 \text{ m}$$

6. Hitung penurunan tegangan pada jalur distribusi jaringan tiga fasa

$$\text{Jatuh tegangan} = \frac{\sqrt{3} \times \text{arus beban} \times (R \cdot \cos \phi + X \cdot \sin \phi) \times \text{Panjang}}{1000}$$

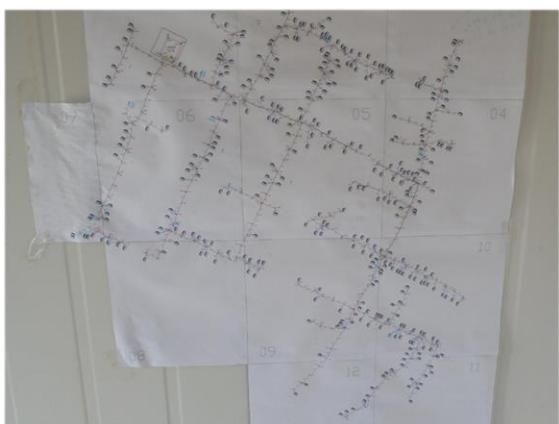
$$\frac{\sqrt{3} \times 43 \text{ A} \times ((0.868 \times 0.9) + (0.098 \times 0.43)) \times 500 \text{ m}}{1000}$$

$$30.6 \text{ V}$$

7. Hitung persentase jatuh tegangan

$$\% \text{ Jatuh tegangan} = \frac{\text{Jatuh tegangan}}{\text{Tegangan nominal}}$$

$$\frac{30.6 \text{ V}}{400 \text{ V}} \quad 7.7\%$$



Tata letak jaringan tegangan rendah di desa menentukan jenis instalasi kabel pada puncak tiang.



Instalasi umum distribusi tegangan rendah pada PLTS *Off-grid*.

⌚ Langkah-langkah yang direkomendasikan untuk kajian perancangan jaringan distribusi

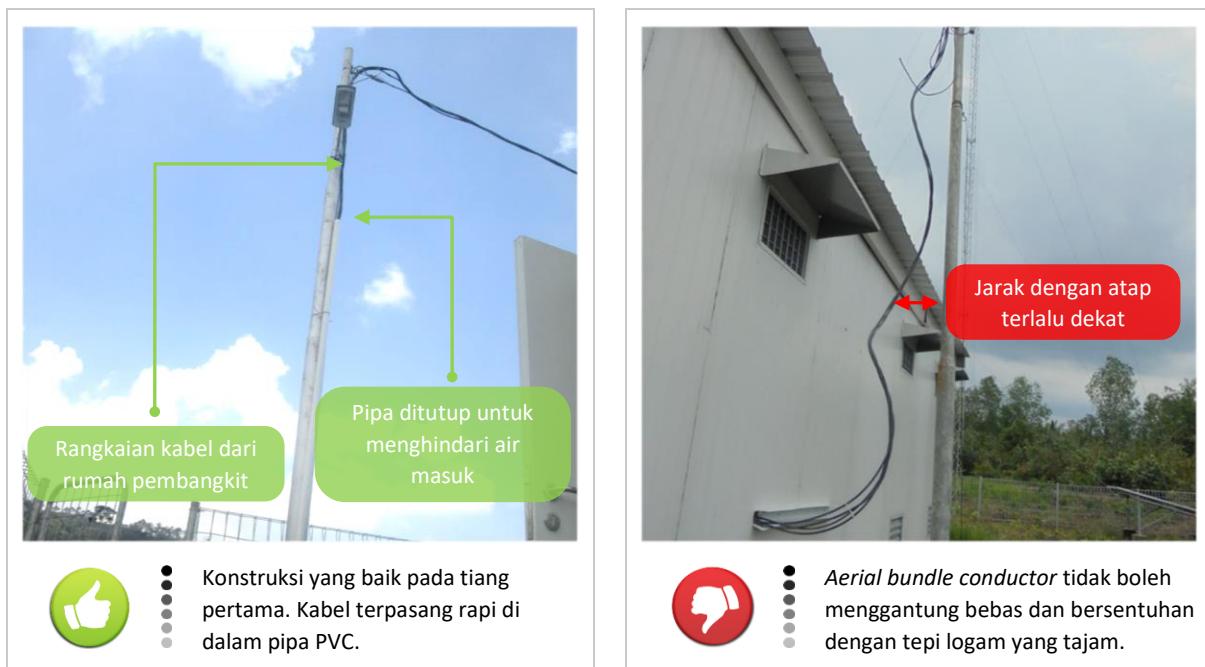
- Lakukan pemetaan rumah tangga di desa dan ukur jarak antara rumah pembangkit dengan rumah tangga, terutama sambungan terjauh.
- Pelajari kondisi lingkungan, topografi lahan dan jenis tanah di desa untuk memilih tiang jaringan, desain pondasi serta penopang tiang yang dibutuhkan.
- Desain rute jaringan distribusi terpendek yang memungkinkan dan tentukan letak tiang jaringan. Alat pelacak lokasi dengan teknologi GPS (*Global Positioning System*) dapat digunakan untuk menunjukkan lokasi rumah tangga serta lokasi yang tepat untuk tiang. Data harus terdiri dari koordinat GPS, ketinggian, dan foto lokasi jika memungkinkan. Cari medan yang mudah, jarak yang memadai antara kabel dengan pohon dan jarak yang sesuai antara kabel dengan permukaan tanah.
- Sosialisasikan dengan pihak yang berwenang atau pemilik kebun dan pohon jika pohon berpotensi untuk mengganggu jaringan distribusi sehingga harus dipangkas secara berkala.
- Gambar tata letak jaringan dengan memproyeksikan konstruksi puncak tiang. Konstruksi puncak tiang dirancang berdasarkan sudut dari satu tiang ke tiang berikutnya pada jalur distribusi. Perkirakan konsumsi daya puncak oleh rumah tangga pada setiap *feeder*.

12.2. Distribusi tegangan rendah

Jalur distribusi tegangan rendah pada PLTS *off-grid* pada umumnya ditempatkan di atas dan dipasang pada ketinggian yang memadai di atas permukaan tanah. Hal ini bertujuan untuk menjaga jarak aman antara jalur distribusi dengan penduduk. Pemasangan tiang jaringan dan konstruksi kabel puncak tiang yang baik sangat penting dan harus dirancang sesuai dengan fungsi tiang dan beban kerja.

■■■ Jalur Distribusi

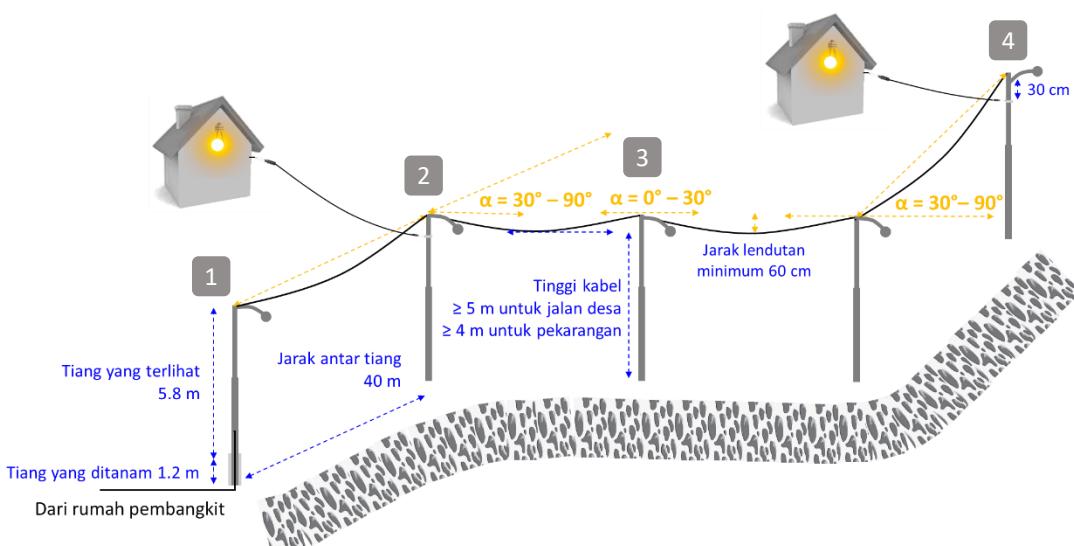




Kabel saluran udara harus jauh dari kontak fisik atau berdekatan dengan tepi logam yang tajam untuk mencegah kerusakan pada isolasi. Kerusakan isolasi meningkatkan risiko tersengat listrik dan hubungan arus pendek.



Rekomendasi konstruksi jaringan distribusi tegangan rendah



- Tiang pertama** terletak tepat di sebelah rumah pembangkit. Puncak tiang dibangun dengan konfigurasi *fixed dead-end* yang menopang kabel terpilin dari rumah pembangkit ke tiang selanjutnya.
- Perakitan sudut besar ($\alpha > 30^\circ$)** dibangun dengan konstruksi *fix dead-end* atau *adjustable dead-end*. Konstruksi *dead-end* juga digunakan pada tiang penegang untuk menyesuaikan ketegangan pada kabel saluran udara. Sebuah tiang penegang diperlukan pada setiap 10 tiang.

3. **Perakitan sudut kecil (0° - 30°)** dibangun menggunakan konstruksi suspensi atau tiang penyangga. Dalam konstruksi ini, klem suspensi digunakan untuk menahan kabel neutral.
4. **Tiang akhir** dengan konstruksi *adjustable dead-end* dengan menggunakan span sekrup (*turnbuckle*). Bagian ujung kabel pada tiang akhir harus tertutup rapi dan konduktor dilapisi dengan isolasi yang baik.

⌚ Berapa jarak aman pada jaringan distribusi tegangan rendah?

- Jaringan distribusi tidak boleh terlalu dekat dengan benda apapun yang berpotensi mengganggu instalasi. Menjaga jarak minimum 50 cm antara kabel saluran udara dengan bangunan atau pepohonan. Verifikasi terhadap persyaratan ini harus dilakukan selama pengujian dan pemeriksaan sistem.
- Jarak minimum antara bagian bawah kabel saluran udara dengan permukaan tanah adalah 4 meter untuk pekarangan rumah dan 5 meter untuk jalan desa.
- Jarak minimum antara jaringan distribusi tegangan rendah dan tegangan menengah adalah 120 cm.



- Kabel dipasang pada jarak aman dari permukaan tanah dimana jarak sekitar 5 meter.



- Ketinggian kabel yang tidak memadai dipinggir jalan. Berpotensi menimbulkan bahaya bagi warga.



- Kabel saluran udara terpasang secara permanen padat pohon.



- Ketegangan (tension) pada kabel dapat meningkat ketika pohon semakin besar.



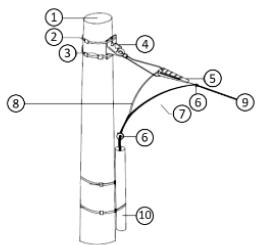
Kabel saluran udara harus tidak mudah dijangkau oleh manusia. Jarak lendutan tidak lebih rendah dari 60 cm untuk menghindari tegangan yang lebih tinggi pada kabel.

⇒ Bagaimana memperbaiki instalasi yang demikian?

- Tarik kabel pada konstruksi puncak tiang melalui *strain clamp* (klem tarik) dan sesuaikan jarak minimum kabel dari permukaan tanah.
- Pepohonan atau ranting harus dipotong apabila ranting mendekati jalur distribusi. Operator harus melakukan pemeliharaan rutin untuk memeriksa potensi gangguan pada kabel dari benda yang ada disekitarnya.

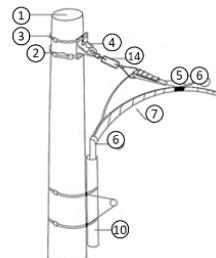


Jenis konstruksi jaringan distribusi tegangan rendah²



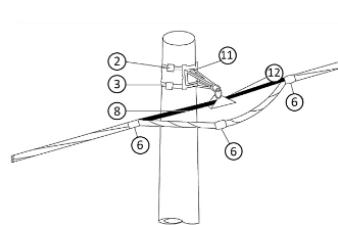
Fixed dead-end

- Tiang pertama
- Tiang terakhir



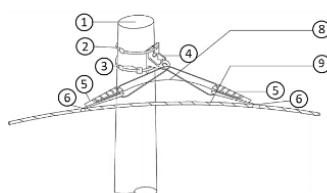
Adjustable dead-end

- Tiang pertama
- Tiang terakhir



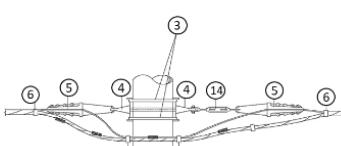
Tiang penyanga (*suspension construction*)

- Instalasi sudut kecil (0°-30°)
- Persimpangan



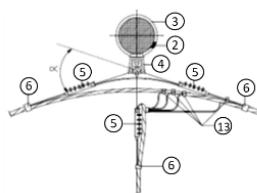
Fixed dead-end

- Instalasi sudut besar (30°-90°)



Adjustable dead-end

- Tiang penegang (*tension pole*)



Tiang pencabangan dengan *fixed dead-end*

- Instalasi sudut kecil (0°-30°)
- Instalasi sudut besar (30°-90°)

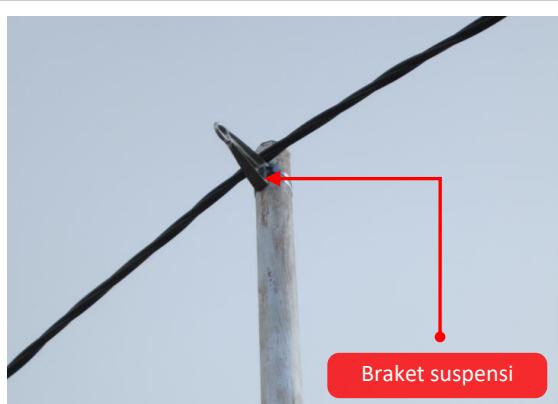
- | | | | |
|---|--|----|---|
| 1 | Tiang | 8 | Kabel netral |
| 2 | Pelat baja | 9 | Fasa terpilin + Netral |
| 3 | <i>Stopping buckle</i> (gesper pengikat) | 10 | Pipa PVC |
| 4 | <i>Tension bracket</i> (braket ketegangan, sampai dengan 1000 daN ³) | 11 | <i>Suspension bracket</i> (Braket suspensi) (sampai dengan 700 daN) |
| 5 | <i>Strain clamp</i> (klem tarik) | 12 | Klem suspensi |
| 6 | Tali plastik | 13 | Konektor |
| 7 | Kabel fasa terpilin | 14 | Span sekrup (<i>turnbuckle</i>) |

² PT. PLN (Persero), "Buku 3 – Standard Konstruksi Jaringan Tegangan Rendah Tenaga Listrik," 2010.

³ 1 Dekanewton (daN) = 10 newtons (N)



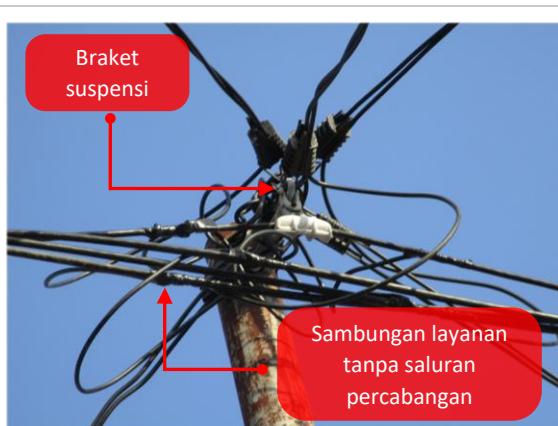
- Klem tarik digunakan untuk menahan kabel saluran udara. Kabel dengan panjang tertentu harus disisakan untuk menyesuaikan ketegangan pada kabel.



- Kabel saluran udara menggantung bebas pada braket suspensi. Klem suspensi (*suspension clamp*) harus digunakan untuk menahan konduktor netral pada bundel kabel.



- Sambungan layanan dan kabel distribusi dipasang pada braket yang berbeda. Jarak yang memadai antara sambungan dan penopang kabel.



- Banyak klem terkait pada satu braket suspensi. Klem *service dead-end* harus dikaitkan pada braket yang berbeda di bawah kabel utama.



- Pemasangan kabel percabangan yang rapi pada perakitan sudut kecil. Penggunaan aksesoris dan konektor yang layak.



- Pemasangan yang berantakan pada konstruksi tiang. Banyak sambungan yang tidak dilengkapi dengan klem *service dead-end*.

⇒ Bagaimana memperbaiki instalasi yang demikian?

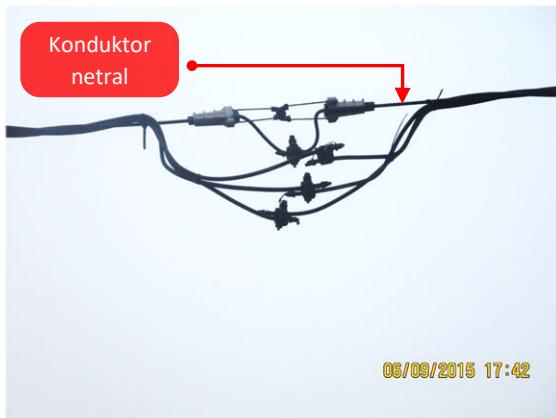
- Kabel saluran udara tidak boleh digantung tanpa penopang. Tambahkan klem suspensi dan kaitkan kabel netral.
- Untuk menghindari beban berlebih pada braket, tambahkan braket ketegangan dibawah braket yang sudah terpasang dengan jarak minimum 30 cm.
- Pasang klem *service dead-end* di setiap percabangan sambungan listrik rumah tangga dan kaitkan dengan rapi pada braket yang terpisah.



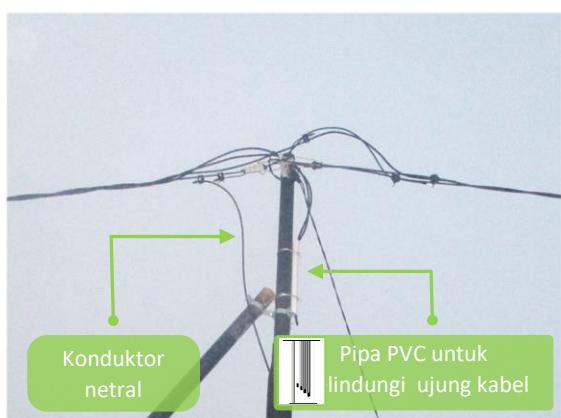
Selalu gunakan konstruksi dan komponen yang sesuai dengan posisi dan fungsinya. Kerusakan pada braket dapat terjadi jika beban mekanis terlalu besar atau terlalu banyak klem yang dikaitkan.



- Konstruksi yang baik dari tiang distribusi sudut besar dengan braket tegangan dan klem tarik.



- Kabel saluran udara digunakan sebagai penopang kontramast antar tiang. Gunakan kawat baja dengan ukuran 50 mm² sebagai gantinya.



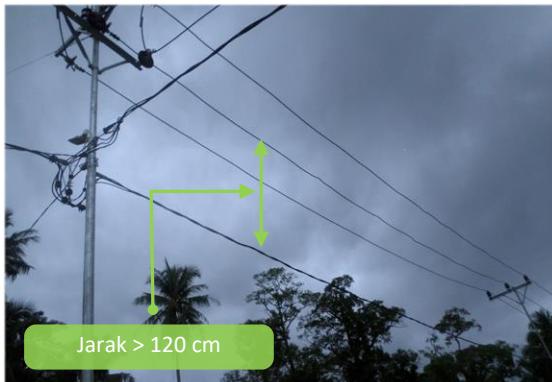
- Ujung konduktor dipasang di dalam pipa PVC. Konduktor netral dibumikan untuk menjaga sistem TN-C.



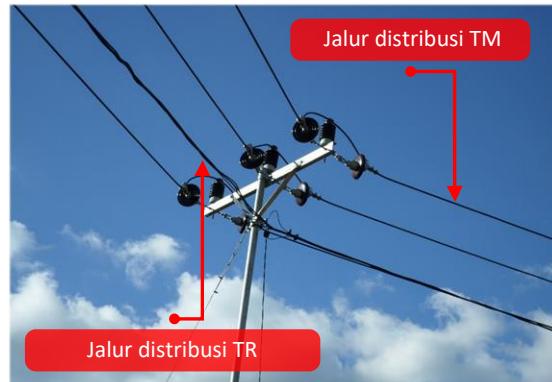
- Konduktor terbuka tanpa insulasi apapun. Konduktor dapat bersentuhan dengan tiang logam dan menyebabkan gangguan.



Jangan membiarkan konduktor yang dialiri listrik tanpa insulasi yang baik. Ujung konduktor harus dipotong dengan panjang yang berbeda dan diberikan insulasi pada ujung kabel untuk menghindari hubungan arus pendek antar konduktor.



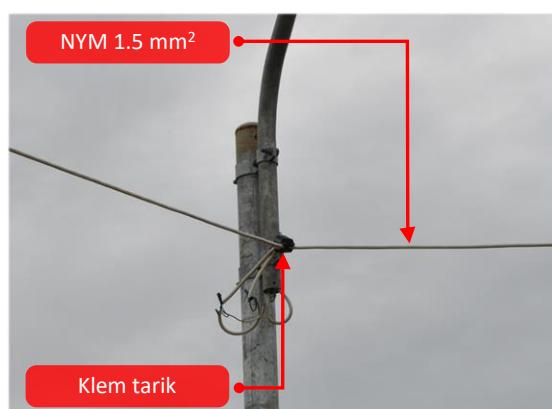
- Jarak aman antara jalur tegangan menengah dan tegangan rendah.



- Jalur tegangan menengah dan tegangan rendah di pasang berdekatan satu sama lain.



- Insulasi kabel yang meleleh karena api pada lahan yang dilewati. Kerusakan insulasi dapat menyebabkan terjadinya hubungan arus pendek.



- Kabel NYM digunakan sebagai kabel distribusi saluran udara. Kabel dengan luas penampang 1.5 mm^2 terlalu kecil untuk menahan beban mekanis.



Jangan menggunakan konduktor kecil untuk kabel saluran udara. Penggunaan kabel kecil menyebabkan ketegangan berlebih pada kabel dan dalam waktu yang panjang dapat menyebabkan kerusakan pada titik sambungan akibat beban mekanik.

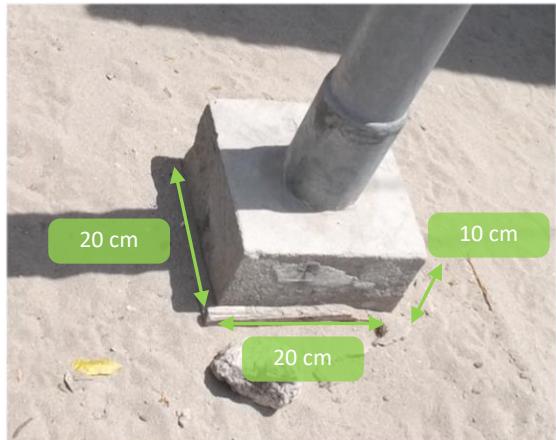
⦿ Bagaimana memperbaiki instalasi ini?

- Pindahkan jaringan distribusi tegangan rendah di bawah konstruksi jaringan tegangan menengah. Pastikan jarak antara distribusi tegangan rendah dan tegangan menengah tidak kurang dari 120 cm.

- Pada tahap perencanaan, pastikan rute jaringan distribusi tidak melewati lokasi dimana insulasi kabel akan terpapar resiko terkena api seperti pembakaran hutan, dsb.
- Hanya menggunakan komponen yang tepat sesuai dengan lokasi dan sudut dari jaringan distribusi. Pemasangan yang buruk kurang baik dapat menyebabkan gangguan pada sistem dan resiko keamanan pada manusia.
- Kabel NYM harus diganti dengan kabel yang sesuai yaitu kabel tipe NFA2X-T 3x35mm²+N untuk kabel saluran udara atau NFAAX 2x10 mm² untuk kabel sambungan rumah tangga.

■■■ Tiang jaringan

Tiang jaringan harus berdiri tegak dan kuat untuk menjaga instalasi jaringan distribusi dan mencegah penduduk yang tidak sengaja menyentuh konduktor yang dapat meningkatkan resiko terkena sengatan listrik. Tiang harus dirancang pada ketinggian sesuai standar lokal. Tiang harus dibangun dengan pondasi beton dan jika diperlukan, *guy wire* (topang tarik) untuk menahan beban yang disebabkan berat konduktor, *tensile stress* (regangan) akibat perubahan temperatur dan angin.



Pondasi tiang jaringan yang baik. Menggunakan beton berukuran 20x20x60 cm (PxLxT) dimana 50 cm terkubur dan 10 cm terlihat.



Tiang jaringan tidak ditopang pondasi beton. Tergantung pada kedalaman dan struktur tanah, tiang mungkin tidak dapat menahan beban.



Tiang jaringan harus ditopang oleh pondasi beton untuk memperkuat posisinya. Jenis dan ukuran pondasi harus disesuaikan dengan lokasi tiang dan kondisi tanah.



- Terdapat celah antara pondasi beton dengan permukaan tanah. Cela pada pondasi dapat menyebabkan ketidakstabilan pada tiang.



- Pondasi tiang jaringan yang kurang baik dan tidak dikubur dalam tanah.
- Beban yang besar dapat menyebabkan ambruknya tiang.



- Penggunaan tiang besi yang digalvanisasi dan dipasang dengan jarak yang cukup antar tiang.



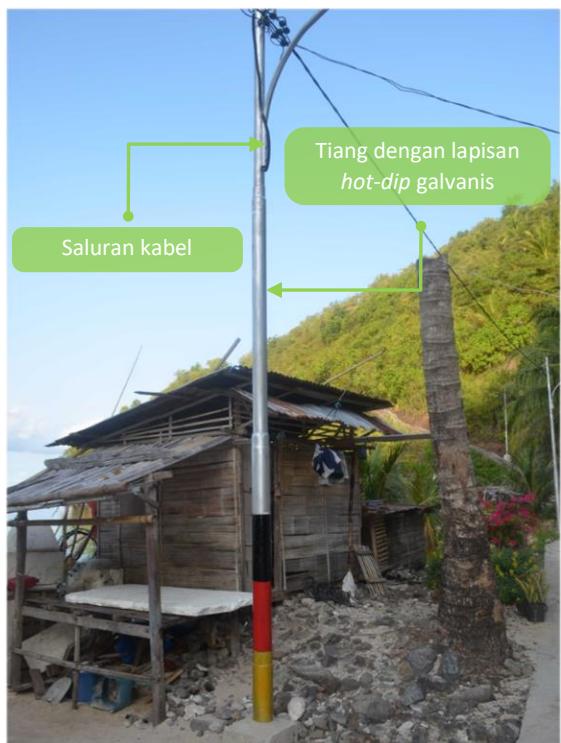
- Kabel distribusi tegangan rendah digantung pada tiang kayu karena jarak antar tiang yang jauh



Jarak antar tiang jaringan tidak boleh lebih dari 50 meter untuk menghindari beban akibat lendutan kabel. Hal ini harus dipertimbangkan pada saat perencanaan jalur jaringan distribusi di fasa awal proyek.

● Bagaimana cara memperbaiki instalasi diatas?

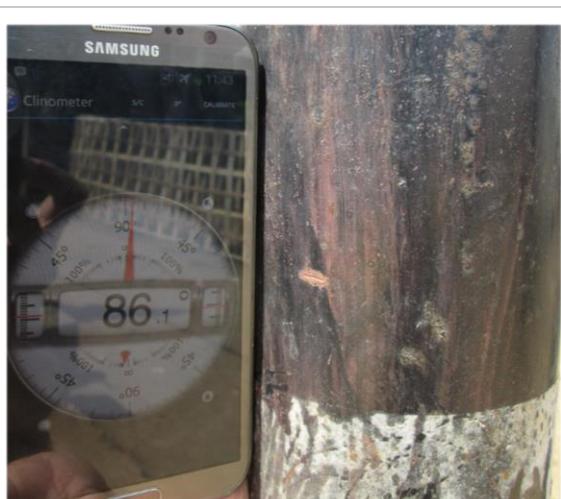
- Lakukan perbaikan pada konstruksi beton pondasi dan tanam pondasi dan tiang didalam tanah setidaknya 1/6 bagian dari pondasi dan tiang.
- Dahan berbentuk "V" tanpa klem tambahan tidak dianjurkan untuk dipakai sebagai tiang penopang kabel saluran udara, sebagai gantinya pasang tiang jaringan dengan konstruksi yang dikhususkan untuk instalasi sudut kecil.



- Tiang besi yang digalvanisasi dengan metode *hot-dip* dan bagian bawah tiang yang berdiameter lebih besar.



- Tiang yang berkarat dikarenakan kualitas lapisan galvanis yang buruk.
- Korosi dapat menyebabkan kerangka kekuatan tiang.



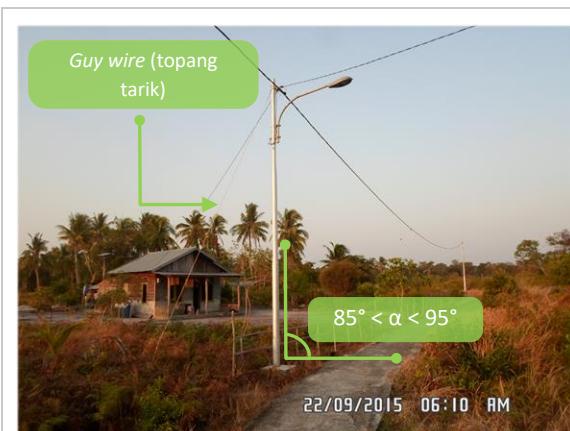
- Tiang jaringan dipasang dengan sudut kemiringan yang sesuai. Sudut kemiringan pada tiang tidak boleh lebih besar dari 5°.



- Tiang jaringan distribusi yang miring dikarenakan beban berlebihan pada instalasi sudut besar dan struktur pondasi yang kurang baik.

⌚ Bagaimana menghindari agar tiang tidak miring?

- Pastikan beban kerja pada tiang dihitung dengan benar sesuai dengan luas penampang kabel, posisi tiang dan kondisi tanah dalam batas antara 200 daN, 350 daN, dan 500 daN.
- Gunakan penopang tiang tambahan seperti *guy wire* (topang tarik), *strut pole* (topang tekan) atau *span guy wire* (kontramast) untuk memperkuat dan menstabilkan tiang.
- Pelajari jenis tanah dan bangun pondasi tiang yang paling sesuai.
- Pastikan bahwa 1/6 dari panjang total tiang terkubur dalam tanah. Dalam hal ini, jika panjang tiang 7 meter, 1.2 meter bagian tiang harus terkubur dalam tanah.
- Lakukan perawatan rutin untuk mengecek kondisi tiang dan lakukan perbaikan apabila sudut kemiringan lebih besar dari 5°.



- Tiang dipasang dengan kuat dan distabilkan dengan topang tarik.



- Penggunaan kabel distribusi TR yang tidak sesuai sebagai topang tarik untuk menahan tiang.



Hanya gunakan kawat baja yang sesuai dengan minimum penampang 50 mm^2 sebagai *guy wire*. Pastikan sudut *guy wire* tidak lebih kecil dari 60°.

⌚ Bagaimana melakukan perawatan pada tiang jaringan distribusi?

- Pastikan MCB pada *feeder* dalam keadaan mati. Ukur tegangan pada *feeder* dan pastikan tidak ada tegangan pada jaringan. Lakukan pembumian pada *feeder* jika memungkinkan. Tutup panel untuk memastikan tidak ada seorangpun yang dapat mengoperasikan MCB.
- Periksa kestabilan tiang dan gunakan peralatan keamanan yang benar sebelum menaiki tiang. Gunakan tangga yang sesuai dan dipasang dengan kokoh di tanah.
- Periksa konstruksi puncak tiang, sambungan kabel dan tegangan kabel.



- Tiang dan konduktor netral dibumikan dengan kabel pembumian yang sesuai untuk menjaga konfigurasi TN-C.



- Kabel pembumian yang terlalu kecil.
- Ukuran konduktor pembumian sekurang-kurangnya setengah dari luas penampang konduktor fasa.



Pembumian tiang dan konduktor netral harus dilakukan pada tiang pertama, tiang akhir dan setiap 200 meter (5 tiang) dari tiang pertama. Ketika tiang yang sama mengalirkan distribusi tegangan menengah dan tegangan rendah, pembumian harus dilakukan setiap 3 tiang. Nilai resistansi pembumian tidak boleh lebih besar dari 10Ω .

12.3. Lampu penerangan jalan

Lampu penerangan jalan dipasang pada setiap 2 (dua) tiang jaringan dengan tambahan lengan lampu (*mounting arm*) untuk pemasangan lampu penerangan jalan. Lampu penerangan jalan pada umumnya dikendalikan oleh pengatur waktu (*timer*) atau sensor cahaya yang dikombinasikan dengan kontaktor yang secara otomatis menyalakan dan mematikan lampu berdasarkan sinar matahari. Untuk memiliki kendali terpusat dari semua unit, lampu penerangan dipasang pada sebuah lateral penyulang yang terpisah dari sambungan rumah tangga.

➲ **Apa yang harus dipertimbangkan untuk mendapatkan pencahayaan yang baik dari lampu penerangan jalan?**

- Lampu LED hemat energi digunakan pada lampu penerangan jalan untuk lumen per watt atau efikasi (lumen/watt) yang lebih baik. Oleh karena itu, lampu penerangan jalan membutuhkan energi yang lebih sedikit untuk menerangi suatu area.
- Lampu penerangan jalan jangan dipasang terlalu tinggi dan harus bebas dari benda-benda yang dapat menghalangi cahaya.
- Sinar harus difokuskan pada jalan dengan sudut sinar maksimum 120° . Pada umumnya jalan desa mempunyai lebar maksimum 3 meter, karena itu tidak diperlukan sinar yang lebih tinggi.
- Sesuai dengan SNI 7391:2008 – “Spesifikasi penerangan jalan di daerah perkotaan”, rata-rata iluminansi minimum pada jalan desa adalah 5 lux atau 5 lumen per meter persegi.



● Dua lampu jalan dipasang pada tiang yang sama tanpa lengan dan tidak fokus ke jalan. Penerangan tidak efektif dan dapat menyebabkan silau.



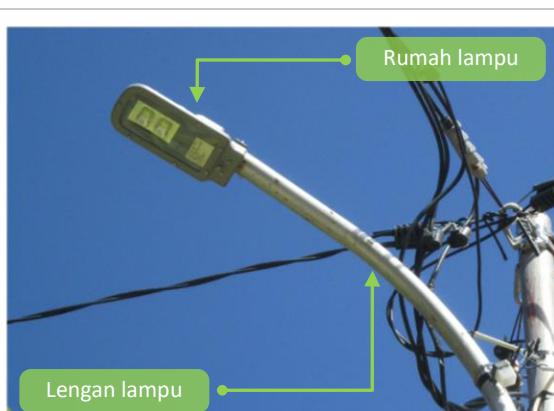
● Lampu penerangan jalan yang tidak optimal karena dipasang diantara pepohonan sehingga sinar yang dihasilkan terhalang oleh dedaunan.



● Pemasangan lampu jalan menghadap ke arah yang benar dengan ketinggian, panjang mounting arm dan sudut kemiringan yang sesuai.



● Lampu penerangan jalan menghadap ke arah yang salah. Lampu penerangan jalan harus menyediakan pencahayaan pada jalan.



● Penggunaan lampu LED tahan air rating IP 65 untuk penerangan jalan sangat dianjurkan untuk menjaga umur pakai lampu.



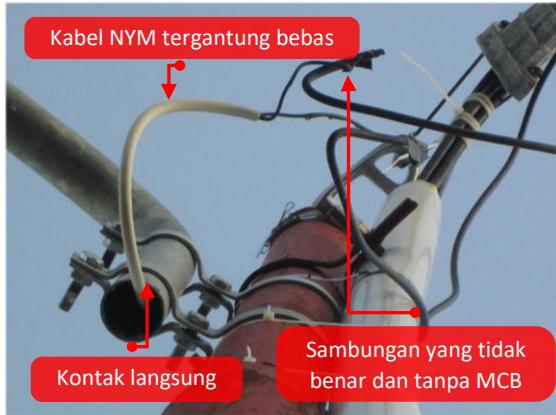
● Penggunaan rumah lampu yang kurang tepat. Lampu penerangan jalan ini tidak memiliki rating IP yang memadai.



Tingginya kerusakan pada lampu penerangan jalan sebagian disebabkan karena penggunaan produk yang tidak sesuai. Pastikan lampu penerangan jalan tahan air dan sudah menjalani pengujian sesuai dengan IEC 60598 untuk peringkat *luminaires ingress protection* (IP). Lampu jalan setidaknya harus memiliki *rating IP 65*.



- Lampu jalan dilengkapi dengan MCB untuk memutus lampu jalan dari penyulang, ketika terjadi hubungan arus pendek pada lampu



- Lampu jalan dipasang tanpa MCB dan tidak adanya PVC tule dapat menyebabkan kerusakan pada isolasi. Kabel NYM tidak seharusnya digunakan di tempat terbuka.



MCB harus dipasang hanya untuk memutuskan satu lampu penerangan jalan apabila terjadi hubungan arus pendek karena kerusakan lampu. Proteksi tegangan surja kombinasi tipe 1 dan 2 juga harus dipasang pada tiang lampu penerangan jalan yang memiliki instalasi pembumian.

⇒ Bagaimana memperbaiki instalasi pada contoh yang kurang baik?



- Pepohonan atau ranting yang berpotensi menutupi lampu harus disingkirkan. Periksa secara teratur untuk memastikan lampu penerangan jalan masih beroperasi dengan baik dan tidak terhalang benda apapun.
- Pindahkan lengan lampu ke arah yang benar.
- Hanya menggunakan kabel yang dirancang untuk penggunaan di tempat terbuka. Ganti kabel NYM dengan kabel jenis NYY.
- Kabel tidak boleh bebas menggantung. Pasang kabel di dalam saluran kabel atau pipa dan pasang pada tiang menggunakan pelat logam.
- Tambahkan kotak sambungan listrik tahan cuaca yang berisikan MCB dan proteksi tegangan surja pada ketinggian yang dapat dijangkau untuk melindungi lampu penerangan jalan jika terjadi sambaran petir dan seluruh penyulang jika terjadi gangguan.



Rumah lampu jalan yang tergantung bebas disebabkan oleh kurang baiknya pemasangan rumah lampu pada lengan lampu.



Bambu digunakan sebagai tiang untuk penerangan di dalam area pembangkit listrik. Rumah lampu terpapar sinar matahari dan hujan.

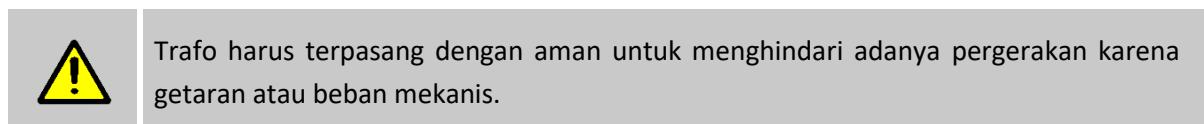
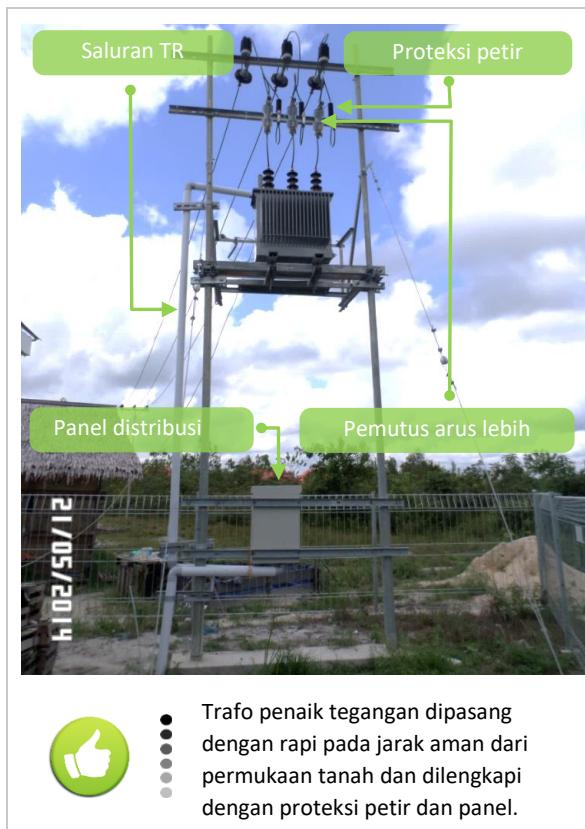
12.4. Distribusi tegangan menengah

Untuk mengurangi penurunan tegangan pada jalur distribusi karena jarak yang jauh antara rumah pembangkit dengan rumah tangga, tegangan diubah menjadi tegangan menengah pada 20 kV menggunakan trafo penaik tegangan dan diturunkan menggunakan trafo penurun tegangan ke 400 V ketika mendekati sambungan rumah tangga. Tergantung pada panjang dan beban di setiap fasa, distribusi tegangan menengah harus dipertimbangkan dari awal ketika jarak lebih jauh dari 1 km. Hal ini disebabkan karena ketika jarak melebihi 1 km, penurunan tegangan dapat melebihi 10% atau melampaui batas yang disyaratkan oleh standar. Distribusi tegangan menengah terdiri dari trafo penaik dan penurun tegangan, panel distribusi, perangkat proteksi seperti proteksi petir, proteksi arus lebih dalam bentuk *fuse cut-out* (kombinasi fuse dengan sakelar), dan kabel saluran udara.

➲ Apa yang harus dipertimbangkan pada pemasangan distribusi tegangan menengah?

- Traformator daya dipasang di tingkat yang lebih tinggi sesuai dengan peraturan setempat atau minimum 4 meter untuk menghindari akses oleh orang yang tidak berkepentingan.
- Pasang pagar pengaman yang memadai dengan ketinggian minimum 2 meter dan pengaman anti panjat untuk mencegah manusia atau binatang mencapai area tegangan tinggi. Pasang tanda bahaya listrik.
- Pastikan komponen komponen berikut ini disambung ke pembumian: konduktor netral sisi sekunder, badan trafo, penangkal petir dan bagian penghantar yang terbuka. Masing-masing harus disambung ke pembumian menggunakan elektroda tersendiri dan dihubungkan menggunakan konduktor tembaga minimum 50 mm².

- Kabel saluran udara tegangan menengah harus mempunyai tinggi minimum 6 meter dari permukaan tanah dan 2.5 meter dari benda-benda seperti atap rumah, pepohonan, antena, dsb.





- Panel distribusi dipasang untuk mendistribusikan daya ke lateral penyulang dan melindungi sisi tegangan rendah dari trafo.



- Kabel distribusi LV tidak dilindungi oleh perangkat proteksi. Kabel dari *bushing TR* tersambung langsung ke kabel distribusi TR.



Panel distribusi atau perangkat hubung bagi tegangan rendah (PHB-TR) harus tersedia pada sisi tegangan rendah transformator dan terletak di bagian bawah gardu. Perangkat hubung bagi harus berisikan saklar utama, *busbar*, perangkat proteksi arus lebih dari penyulang.

Bab 13:

Sambungan Rumah Tangga

- ✓ Contoh yang baik dan yang buruk dari instalasi sambungan rumah tangga
- ✓ Bagaimana cara memasang sambungan listrik yang aman di dalam rumah
- ✓ Kesadaran dalam menggunakan energi secara efisien



13.1. Dasar-dasar sambungan rumah tangga

Sambungan rumah tangga termasuk layanan sambungan dari jalur distribusi jaringan tegangan rendah menuju instalasi listrik di dalam rumah. Dimulai dari *service drop* yang mengantarkan sambungan dari tiang jaringan menuju *service connection* lalu dilanjutkan dengan instalasi di dalam rumah atau pengkabelan rumah. Listrik pada rumah tangga dipasok dengan daya satu fasa. Dengan demikian, tiap rumah dilengkapi dengan alat pembatas energi yang dapat disesuaikan, sebuah MCB sebagai perangkat pelindung, dan perlengkapan peralatan yang terdiri dari tiga bohlam LED dengan saklar dinding, dan satu soket untuk beban tambahan. Gambaran dari layanan sambungan yang umum, ditunjukkan pada diagram di bawah ini.



Keselamatan pengguna dan penggunaan energi yang lebih baik adalah hal utama yang harus dipertimbangkan secara hati-hati dari sambungan rumah tangga. Instalasi rumah tangga harus memiliki kualitas yang sangat baik dan dibuat seaman mungkin untuk mengurangi resiko keselamatan dari pengguna akhir, terutama bagi yang belum familiar dan memiliki pengetahuan yang terbatas mengenai kelistrikan. Hal ini sangat penting untuk menjamin bahwa seluruh instalasi tidak berbahaya bagi pengguna selama mereka menjalankan aktivitas serta memastikan tidak ada kemungkinan rusaknya sistem yang diakibatkan oleh hubungan arus pendek. Oleh karena itu, penting bagi instalasi rumah tangga agar sesuai dengan persyaratan dari regulasi nasional serta dipasang oleh instalator profesional. Selain masalah keamanan, pengguna perlu memahami dasar penggunaan energi. Hal ini termasuk bagaimana cara menghemat energi, menggunakan peralatan yang efisien energi, serta menggunakan listrik untuk aktifitas yang produktif.

➲ **Apa saja resiko yang harus dipertimbangkan saat instalasi pada rumah tangga?**

- Tersengat listrik diakibatkan oleh kontak secara langsung dan tidak langsung dengan kabel konduktor yang aktif. Kontak tidak langsung terjadi saat adanya kegagalan isolasi dan kabel konduktor yang aktif menyentuh bagian logam atau cairan.
- Kebakaran yang diakibatkan elemen yang mengalami panas berlebih atau percikan busur listrik. Elemen mengalami panas berlebih saat kapasitas peralatan tidak dihitung dengan benar sesuai dengan bebananya. Percikan busur listrik terjadi saat ada sambungan yang buruk antara konduktor.
- Tegangan listrik yang rendah dikarenakan tegangan jatuh pada jaringan yang dapat mengakibatkan kerusakan pada beberapa peralatan rumah tangga yang sensitif, contohnya kulkas, lampu, dan peralatan yang menggunakan motor listrik seperti bor, pompa, dsb.

13.2. Sambungan tenaga listrik

Sambungan tenaga listrik atau *service connection* adalah kumpulan komponen, termasuk pengantar yang terdapat di atas rumah, yang berfungsi untuk menyambungkan instalasi kelistrikan rumah tangga dengan jaringan distribusi tegangan rendah. *Service connection* utamanya terdiri dari *service drop* dan sambungan pelayanan.

■■■ Service drop

Service drop adalah kabel yang menghubungkan kabel distribusi tegangan rendah menuju meteran energi dengan menggunakan *tap connector*. *Service drop* berfungsi untuk mengantarkan layanan listrik pada rumah. Kabel terhubung pada *service dead-end clamp* di kedua ujungnya untuk menyesuaikan ketegangan kabel.

⌚ Bagaimana cara memasang *service drop* yang baik?

- Seluruh instalasi harus sesuai dengan standar penyedia listrik lokal dalam menyambungkan layanan listrik¹.
- Hindari menggunakan kabel konduktor yang terlalu panjang yang dapat mengakibatkan penurunan tegangan yang tidak perlu. Penurunan tegangan harus tidak lebih dari 1%.
- Walaupun beban rumah tangga sangat kecil dan hanya membutuhkan kabel tipis, kabel pilin dengan 10 mm² sebaiknya digunakan untuk meningkatkan kekuatan kabel.
- Gunakan *service dead-end clamp* pada kedua ujung untuk menahan dan menyesuaikan tegangan kabel.

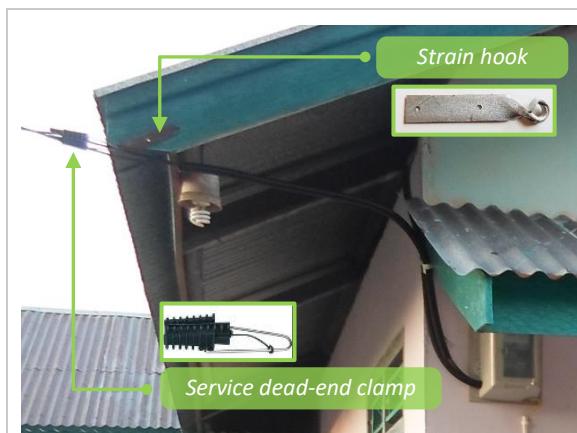


- Kabel *service drop* tidak terlalu kencang dan terpasang dengan baik pada dinding menggunakan klem kabel.



- Panjang kabel yang tidak perlu pada rumah tangga tanpa adanya penyangga kabel yang baik. Semakin panjang kabel, semakin tinggi tegangan jatuh.

¹ PT. PLN (Persero), Buku 2: Standar Konstruksi Sambungan Tenaga Listrik, 2010.



Strain hook terpasang untuk mengaitkan service dead end clamp. Tipe dari strain hook tergantung dari material permukaan.



Penggunaan service dead end clamp yang tidak tepat. Klem harus dikaitkan pada strain hook.



Kabel tie biasa digunakan untuk mengikat kabel service drop. MCB tidak seharusnya terpasang di atap.



Kabel distribusi tidak seharusnya menyentuh ujung atap yang tajam. Kenaikan suhu dan gesekan dapat merusak isolasi kabel.



Selalu gunakan service dead-end clamp apabila jarak antara tiang dan rumah lebih dari 3 meter. Dalam kasus ini, pemasangan tap connector di tengah cable span boleh dilakukan. Namun demikian, kabel tetap harus berada menempel dengan dinding untuk mencegah kegagalan service drop connection yang disebabkan pergerakan angin.

⇒ Bagaimana cara memperbaiki instalasi yang demikian?

- Untuk meminimalisasi kerugian, kurangi panjang kabel dan sesuaikan service drop. Jarak service drop dari atas ke tanah tidak boleh kurang dari 4 meter.
- Instalasi MCB utama ke jaringan harus dapat mudah dijangkau oleh pengguna.
- Usahakan untuk menghindari penggunaan kabel ties untuk mengencangkan instalasi. Pasang service dead-end clamp dan kaitkan klem pada strain hook yang tersedia.
- Tambahkan lapisan yang keras antara kabel dan sisi atap yang tajam. Alternatif lainnya adalah memasang ulang service drop ke lokasi yang aman dari sisi atap yang tajam.

■■■ Sambungan pelayanan

Sambungan pelayanan memberikan fungsi untuk menghubungkan peralatan rumah tangga pada jaringan. Sambungan pelayanan yang dimaksud berupa kotak energi meter yang terdiri dari alat pembatas energi, MCB, dan sambungan pembumian. Alat pembatas energi digunakan untuk membatasi penggunaan energi harian untuk tiap rumah tangga yang terhubung. Kuota energi harian ditetapkan oleh operator berdasarkan ketersediaan energi dari sistem PLTS dan jumlah rumah tangga dengan kuota yang umumnya mencapai 600 Wh untuk tiap rumah tangga.



- Kotak energi meter terpasang pada ketinggian yang baik dari tanah dan terlindungi dari sinar matahari. Energi meter dapat dipantau dengan mudah.



- Energi meter tidak akan dapat dibaca bila terpasang pada *gable* (lebih dari 3 m dari tanah).



Kotak energi meter harus dapat diakses secara visual dan secara fisik oleh pemilik serta terpasang pada lokasi yang aman dengan jarak minimum 150 cm dari tanah.

○ Di mana dan bagaimana cara memasang kotak energi meter?

- Alat pembatas energi dan MCB harus terpasang di dalam kotak dengan rating penggunaan di luar ruangan atau minimum IP 45.
- Kotak energi meter harus terpasang pada ketinggian antara 150 cm hingga 200 cm. pemasangan yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan kesulitan pembacaan layar sedangkan pemasangan pada ketinggian yang rendah dapat berbahaya bagi anak-anak.
- Kotak energi meter harus dipasang di bawah atap untuk melindungi kotak dari sinar matahari secara langsung serta hujan.



- Tidak adanya alat pembatas akan membuat penggunaan energi dari sambungan tersebut tidak terkendali.



- Sambungan yang buruk dengan konduktor yang

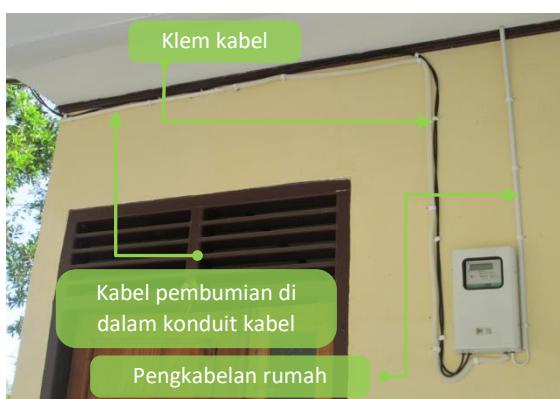
- Sambungan bypass yang tidak aman. Service drop terhubung langsung dengan pengkabelan rumah.



Instalasi tanpa alat pembatas energi dan MCB atau juga dikenal sebagai sambungan *bypass* dapat dianggap sebagai sambungan yang ilegal. Sambungan *bypass* yang buruk dapat menghasilkan busur elektrik dan mengakibatkan kebakaran terutama bila dipasang pada rumah yang terbuat dari kayu.

⇒ Mengapa alat pembatas energi dan MCB penting untuk instalasi rumah tangga?

- Alat pembatas energi digunakan untuk mencegah penggunaan energi yang berlebih oleh konsumen yang dapat menghabiskan seluruh energi yang tersedia dari sistem PLTS.
- Sambungan tanpa alat pembatas energi akan mengakibatkan alokasi energi yang tidak adil di antara pengguna.
- MCB melindungi instalasi dari kelebihan arus dan hubungan arus pendek yang dapat mengakibatkan kebakaran.



- Kotak energi meter terpasang dengan kuat pada dinding dengan instalasi kabel yang rapi dalam konduit kabel.



- Instalasi yang berbahaya. Sambungan kabel harus memenuhi standar dan terpasang dengan kuat pada dinding.



- Energi meter dengan IP 54 digunakan dan *tersegel/ tertutup*. MCB dapat diakses oleh pemilik.



- Pemasang anperalatan di dalam kotak dengan rating IP yang rendah yang kurang tinggi.



- Untuk alasan keamanan dan keselamatan, kotak harus dikunci dan hanya operator yang boleh mengaksesnya. Namun, MCB tidak boleh dipasang dalam kotak.



- Alat pembatas energi dan MCB tidak dipasang dalam selubung yang tahan terhadap cuaca. Kabel terpasang pada langit-langit tanpa konduit.

⌚ Bagaimana cara memperbaiki instalasi yang demikian?

- Atur ulang kabel, pasang kabel dalam konduit kabel dan letakan pada dinding.
- Gunakan kotak percabangan sambungan untuk melindungi sambungan kabel dari sentuhan langsung.
- Jangan pernah sambungkan genset diesel rumah tangga dengan PLTS komunal secara paralel. Gunakan saklar pengalih antara PLTS komunal dengan genset apabila ingin menggunakan instalasi rumah tangga yang sama.



Paparan cuaca langsung pada energi meter dengan rating IP yang rendah dapat mengakibatkan kerusakan energi meter terutama untuk daerah pantai. Energi meter dan MCB harus terpasang di dalam kotak yang aman serta tahan terhadap cuaca untuk instalasi luar ruangan atau sedikitnya memiliki rating IP 45 atau lebih.



Bagaimana cara menghitung jumlah sambungan baru yang mungkin dibuat?

Pada desa yang memiliki keterbatasan jumlah alat pembatas energi dan MCB, terkadang sambungan rumah tangga yang baru menggunakan sambungan *bypass* yang dapat membahayakan instalasi rumah tangga serta PLTS *off-grid*. Untuk alasan ini, dianjurkan untuk menyediakan sedikitnya 10% dari jumlah alat pembatas energi dan MCB yang tersedia sebagai cadangan atau untuk penyambungan baru pada PLTS *off-grid* sesuai kemampuan sistem.

Jumlah maksimum sambungan ditentukan oleh energi yang tersedia dari rangkaian modul fotovoltaik dan daya keluaran maksimum dari inverter baterai. Perhitungan sederhana mengenai bagaimana cara menghitung jumlah sambungan baru yang dapat dibuat sebagaimana dijelaskan dalam bagan di bawah ini.

Berbasis Energi

1. Periksa kapasitas dari PLTS komunal

$$\text{Kapasitas PLTS} = 30,000 \text{ Wp}$$

2. Periksa jumlah sambungan rumah tangga dan fasilitas umum. Diasumsikan bahwa alokasi energi untuk fasilitas umum sama dengan kuota untuk rumah tangga.

$$\text{Jumlah sambungan saat ini} = 110 \text{ rumah tangga} + 5 \text{ fasilitas umum}$$

3. Periksa kuota energi untuk satu rumah tangga per hari

$$\text{Kuota energi per hari} = 450 \text{ Wh}$$

4. Periksa nilai rata-rata global irradiasi horizontal di lokasi menggunakan data satelit. Nilai irradiasi dapat diperoleh dari Global Solar Atlas atau database yang serupa. Alternatif lain, nilai irradiasi rata-rata di Indonesia dapat diasumsikan sebesar 4.5 kWh/m²/hari

$$\text{Nilai Irradiasi} = 4,500 \text{ Wh/m}^2/\text{hari}$$

5. Hitung jumlah maksimum sambungan rumah tangga berdasarkan ketersediaan energi dengan mengasumsikan total efisiensi 60% termasuk *losses distribusi*

$$\text{Jumlah maksimum} = \frac{\text{Kapasitas PLTS} \times \text{Nilai irradiasi} \times \text{efisiensi}}{1000 \text{ W/m}^2 \times \text{Kuota energi per hari}}$$

$$\frac{30,000 \text{ Wp} \times 4,500 \text{ Wh/m}^2/\text{hari} \times 0.6}{1000 \text{ W/m}^2 \times 450 \text{ Wh}} = 180 \text{ sambungan}$$

6. Hitung kemungkinan jumlah sambungan rumah tangga yang tersisa

$$\text{Jumlah sisa sambungan} = \text{Jumlah sambungan maksimum} - \text{Jumlah sambungan saat ini}$$

$$180 - 115 = 65 \text{ sambungan}$$

Berbasis Daya

1. Periksa total kapasitas inverter baterai

$$\text{Kapasitas inverter baterai} = 30,000 \text{ W}$$

2. Periksa jumlah sambungan rumah tangga dan fasilitas umum. Diasumsikan bahwa alokasi energi untuk fasilitas umum sama dengan kuota untuk rumah tangga.

$$\text{Jumlah sambungan saat ini} = 110 \text{ rumah tangga} + 5 \text{ fasilitas umum}$$

3. Hitung kemungkinan daya maksimum berdasarkan MCB yang terpasang di rumah tangga

$$\text{Rating MCB} = 1 \text{ A}$$

4. Hitung jumlah maksimum sambungan rumah tangga berdasarkan daya

$$\text{Jumlah sambungan maksimum} = \frac{\text{Kapasitas inverter baterai}}{\text{Rating MCB} \times \text{tegangan jaringan}}$$

$$\frac{30,000}{1 \text{ A} \times 230 \text{ V}} = 130 \text{ sambungan}$$

$$130 \text{ sambungan}$$

5. Hitung kemungkinan jumlah sambungan rumah tangga yang tersisa

$$\text{Jumlah sambungan tersisa} = \text{Jumlah sambungan maksimum} - \text{jumlah sambungan saat ini}$$

$$130 - 115$$

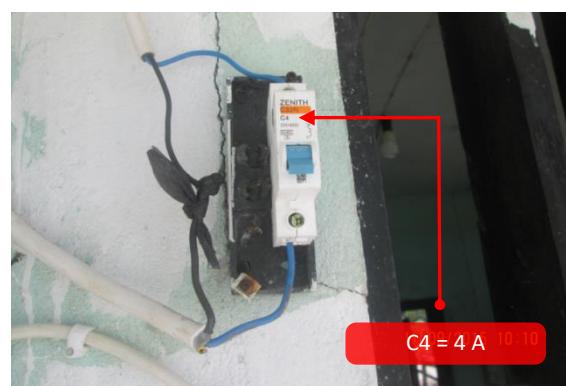
$$15 \text{ sambungan}$$

PLTS komunal dapat memasok 15 sambungan baru untuk rumah tangga

Dari hasil perhitungan tersebut, sistem PLTS dapat memberikan energi pada 65 sambungan lainnya namun tidak dapat memenuhi beban puncak. Maka dari itu, berdasarkan perhitungan alokasi daya, hanya terdapat 15 rumah tangga tambahan yang dapat terhubung pada sistem. Dalam hal ini, cadangan alat pembatas energi dan MCB harus disediakan bagi operator lokal sebagai antisipasi adanya sambungan baru. Saat menghubungkan sambungan baru pada *feeder*, sangat penting untuk memeriksa arus yang ada pada *feeder* (silakan merujuk pada Bab 9 Panel Distribusi AC untuk melakukan pemeriksaan). Sambungan rumah tangga yang baru harus tersambung pada lateral penyulang (*sub-feeder*) dengan beban rendah.



Sebuah MCB 1 A digunakan untuk melindungi instalasi rumah tangga yang secara kasar setara dengan konsumsi daya 230 W.



Penggunaan rating MCB yang lebih tinggi (4 A). Rating tinggi dapat mengakibatkan kelebihan arus pada MCB rumah pembangkit.



Kabel untuk pembumian digunakan untuk kabel sambungan. Kabel juga tidak dilengkapi dengan sepatu kabel.



Sambungan rumah tangga yang tidak aman dan tidak rapi dengan kabel dan *tap connection* yang tergantung. Kabel seharusnya tidak tertutup cat.



Selalu gunakan warna isolasi kabel yang tepat. Warna kuning-hijau hanya boleh digunakan untuk pembumian. Kesalahanpahaman terhadap warna kabel dapat mengakibatkan hubungan arus pendek.

13.3. Pengkabelan dan instalasi rumah tangga

Pengkabelan untuk rumah dimulai dari MCB pada kotak energi meter, yang lalu mengalirkan daya dari jaringan ke seluruh peralatan dalam rumah. Pengkabelan mencakup instalasi soket lampu, soket keluaran, saklar dinding, kabel serta pembumian. Sangat penting bahwa instalasi memiliki kualitas yang sangat baik serta aman dari bahaya sengatan listrik dan kebakaran.

⦿ Bagaimana cara meningkatkan keamanan pada instalasi rumah tangga?

- Instalasi harus sesuai dengan IEC 60364 – instalasi elektrik untuk gedung serta PUIL (Pedoman Umum Instalasi Listrik) untuk standar Indonesia.
- Instalasi yang aman harus dapat dipastikan secara profesional saat komisioning. Pemeriksaan secara sampling harus dilakukan untuk memvalidasi hasil komisioning.
- Seluruh peralatan elektrik yang membutuhkan pembumian atau umumnya dengan kotak logam harus disambungkan dengan pembumian. Peralatan yang disambungkan dengan pembumian akan mengurangi aliran arus menuju tubuh orang yang menyentuh peralatan listrik yang mengalami kegagalan isolasi.
- Gunakan *residual current device (RCD)* untuk melindungi pengguna dari tersengat listrik saat menyentuh konduktor yang teraliri listrik. Konduktor yang teraliri listrik tidak boleh dibiarkan tidak terlindungi.
- Gunakan peralatan yang terisolasi ganda untuk mencegah kebocoran atau kegagalan arus pada rumah sambungan.
- Operator lokal harus memeriksa kabel dan instalasi pembumian dari tiap rumah tangga secara rutin. Sangat disarankan untuk melakukan pemeriksaan dua kali dalam setahun.



- Pembumian yang untuk pembumian peralatan dan mengurangi resiko terhadap sengatan listrik.



- Kabel pembumian tidak terhubung dengan tanah.



Instalasi pembumian yang utama serta pembumian peralatan harus selalu dirawat untuk mengurangi resiko tersengat listrik dan kegagalan peralatan.



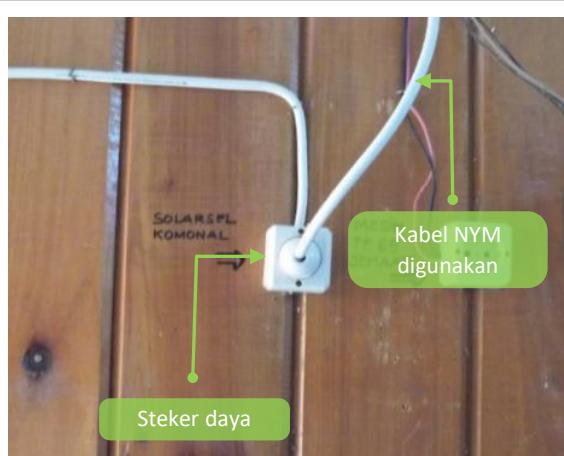
- Lampu terpasang pada balok terlindung di bawah atap.



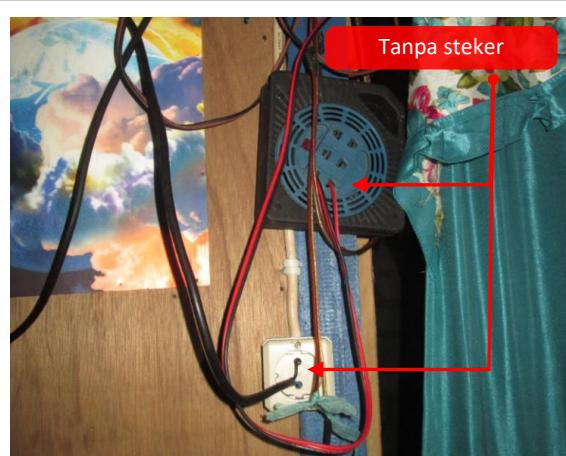
- Soket bohlam tidak terpasang dengan tepat di bawah atap. Hujan lebat dapat mengakibatkan gangguan.



Seluruh peralatan yang tidak tahan terhadap cuaca atau memiliki *rating IP* yang rendah harus selalu terlindung dari hujan dan kelembapan.



- Steker daya AC digunakan dengan tipe kabel yang tepat. Terminal dan kabel pembumian harus dihubungkan saat peralatan membutuhkan pembumian.



- Instalasi yang sangat berbahaya. Kabel harus selalu dilengkapi dengan steker. Kabel dengan isolasi tunggal tidak boleh digunakan.



Jangan pernah menghubungkan kabel langsung pada soket. Sambungan yang buruk dapat mengakibatkan busur elektrik dan meningkatkan temperature soket. Selalu gunakan steker daya yang tepat untuk menghubungkan peralatan. Kabel ekstensi yang dapat diandalkan harus dipilih secara hati-hati, setidaknya ditunjukkan dengan sertifikasi SNI atau badan sertifikasi yang diakui.



- Lampu terpasang pada dudukan balok dan saklar terpasang pada ketinggian yang mudah dicapai.



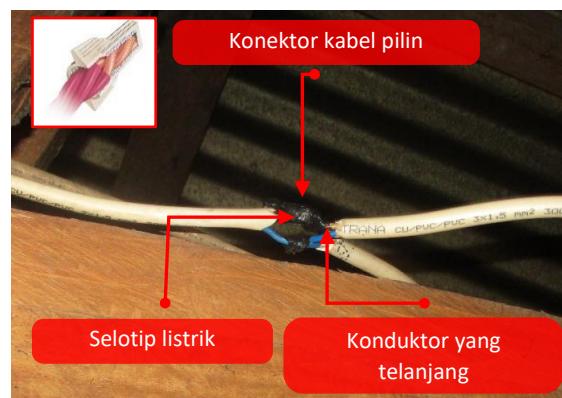
- Lampu-lampu menggantung dan tidak terpasang dengan benar. Kabel-kabel sebaiknya tidak terlalu kendur.

⇒ Bagaimanakah instalasi pengkabelan dalam rumah yang baik?

- Selalu gunakan kabel dengan isolasi ganda seperti NYM atau NYY. Gunakan kabel tiga inti untuk fasa, netral dan konduktor pengaman dengan potongan melintang minimum $1,5 \text{ mm}^2$. Kemampuan penghantar arus untuk NYM $1,5 \text{ mm}^2$ adalah 18 A saat terpasang pada 30°C .
- Kabel harus dipasang di dalam konduit kabel untuk melindungi isolasi kabel dari kerusakan. Pipa PVC atau konduit fleksibel dapat digunakan. Pemasangan kabel dengan isolasi tunggal di dalam konduit.
- Bohlam lampu harus dipasang pada soket berulir dan tidak dibiarkan menggantung.
- Soket keluaran harus dilengkapi dengan pelindung terminal pembumian. Terminal tersebut harus terhubung secara internal dengan kabel pembumian untuk memberikan pembumian pada peralatan.
- Untuk alasan keamanan, saklar dinding dan soket keluaran harus dipasang dengan ketinggian minimal 150 cm dari tanah dan mudah untuk digapai.



- Instalasi pengkabelan dalam rumah yang rapi. Terdapat kotak percabangan sambungan sebagai rumah kabel intersambungan.



- Percabangan sambungan tidak terpasang di dalam kotak. Konektor kabel pilin seharus digunakan untuk menyambungkan konduktor.



Sambungan dua atau lebih konduktor harus dilakukan dengan memilin konduktor dan mengencangkannya dengan konektor kabel pilin. Hindari penggunaan selotip elektrik karena konduktor dapat merusak selotip yang tipis dengan mudah dan mengakibatkan konduktor kehilangan pelindungnya. Konduktor aktif yang tidak terlindungi dapat mengakibatkan sengatan listrik dan merusak rangkaian. Kotak percabangan harus selalu tersedia.



- Instalasi kabel dan percabangan yang rapi. Kabel NYM dan konduit digunakan untuk peralatan rumah tangga.



- Pengkabelan dalam rumah yang sangat tidak teratur. Kabel-kabel menggantung di dinding.



- Kabel ekstensi sebaiknya tidak diletakkan terlalu rendah di atas lantai.



- Soket keluaran terpasang sangat rendah. Soket harus dijauhkan dari jangkauan anak-anak.

⌚ Bagaimana cara memperbaiki instalasi yang demikian?

- Instal ulang kabel dan pasang di dalam konduit untuk mengurangi ketegangan pada kabel.
- Gunakan kabel ekstensi dengan terminal pembumian untuk memastikan sambungan pembumian selalu ada.

- Hindari memasang soket keluaran atau meletakkan kabel ekstensi terlalu redah yang mudah dijangkau anak-anak. Seluruh tipe sambungan elektrik harus dipasang pada ketinggian minimum 150 cm dari tanah.



• Tegangan sambungan terjauh berada pada angka yang wajar.



• Terjadi penurunan tegangan sebanyak 14.4% pada sambungan terjauh.



Tegangan pada sambungan rumah terjauh dari rumah pembangkit tidak boleh kurang dari 10% atau lebih dari 5% tegangan nominal. Dalam hal ini tegangan tidak boleh lebih rendah dari 207 V untuk 230 V atau 198 V untuk 220 V. Selain itu, tegangan maksimal tidak boleh lebih dari 241,5 V untuk 230 V dan 231 V untuk 220 V.

⌚ Mengapa penurunan tegangan yang besar atau jaringan dengan tegangan yang kurang, tidak diperbolehkan?

- Tegangan yang rendah dapat mengakibatkan peralatan mengkonsumsi arus lebih tinggi yang dapat memanaskan serta membahayakan isolasi kabel dan merusak peralatan dalam rumah.
- Penurunan arus juga dapat membuat MCB mengalami *trip* tanpa sengaja dikarenakan naiknya arus.
- Motor atau kipas tidak akan bekerja secara efisien karena torsi yang dihasilkan pada beban tidak tercapai. Hal ini dapat meningkatkan suhu kumparan serta mengurangi umur pakai motor.
- Untuk TV *CRT (Catode Ray Tube)*, tegangan yang rendah dapat mengubah warna tampilan TV.

13.4. Penggunaan energi

Radiasi matahari memang melimpah dan gratis, namun energi yang dapat ditangkap dan disimpan berjumlah terbatas. Maka dari itu, sangat penting bagi pengguna listrik untuk dapat menghemat energi dengan menggunakan energi listrik secara bijaksana hanya pada saat dibutuhkan, dan gunakan komponen elektronik yang hemat energi. Menghemat energi tidak hanya akan mengamankan ketersediaan energi pada pembangkit, namun juga memperpanjang umur pakai baterai.

Penggunaan energi listrik tidak boleh hanya terbatas untuk penerangan dan hiburan. Energi listrik harus juga digunakan aktifitas yang produktif seperti penerangan toko kecil, lemari pendingin untuk menyimpan minuman dingin, toko kue, bengkel kecil, dan sebagainya.



- Penggunaan lemari pendingin pada toko kecil menunjukkan penggunaan energi secara produktif.



- Cara manual untuk mengaduk adonan dan pembuatan makanan digantikan oleh penggunaan mixer dan blender elektrik.

Karena konsumsi daya dan energi dapat melebihi batas umum pada perumahan, regulasi atau instalasi khusus harus dibuat oleh operator lokal dan tim manajemen desa. Keamanan energi pada rumah pembangkit serta keamanan instalasi harus dipertimbangkan saat pemberian izin untuk pemilihan peralatan.

➲ Apa yang perlu dipertimbangkan saat seorang wirausaha mengajukan kegiatan produktif?

- Memahami perilaku beban dari peralatan. Konsumsi peralatan tidak boleh melebihi 1000 W saat terhubung dengan sambungan rumah tangga satu fasa. Hal ini berarti beberapa motor kecil seperti mesin jahit, mixer, atau blender masih boleh digunakan untuk satu fasa. Pastikan bahwa MCB yang terpasang sudah sesuai dengan kemampuan daya yang dibutuhkan jika akan menggunakan peralatan listrik tambahan.
- Beban yang lebih tinggi atau motor yang lebih besar dari 1000 W harus mempertimbangkan sambungan tiga fasa. Dalam hal ini, sambungan khusus harus didesain. Pastikan regulasi mengenai penggunaan energi listrik untuk kegiatan produktif sudah dibuat di desa, seperti tarif serta alokasi waktu operasi peralatan dengan beban yang lebih tinggi.

- Hitung kemungkinan penggunaan energi dan waktu dari peralatan. Energi untuk penerangan rumah tangga harus diutamakan sebelum memenuhi energi untuk aktifitas produktif menggunakan kelebihan energi. Sangat dianjurkan agar mengoperasikan peralatan dengan beban yang tinggi untuk melakukan aktifitas produktif di siang hari.
- Untuk motor-motor dengan arus awalan yang tinggi, pertimbangkan penggunaan *soft starter* pada fasilitas untuk menghindari gangguan pada jaringan.

■■■ Konservasi energi

Konservasi energi artinya perilaku mengurangi jumlah layanan energi seperti menyalakan lampu hanya saat terdapat orang, mematikan TV setelah digunakan, tidak menggunakan kipas saat udara dingin, atau gunakan sistem pengeras suara yang sederhana saat menyelenggarakan suatu acara. Penggunaan energi yang tidak perlu dapat mengakibatkan terbuangnya kuota energi pada alat pembatas energi.



- Sebuah lampu digunakan untuk menerangi proses belajar mengajar.



- Penggunaan lampu yang berlebih di tempat ibadah yang kosong. Lampu seharusnya hanya dinyalakan saat fasilitas umum sedang digunakan.



- Lampu dinyalakan secara tidak perlu di siang hari. Sekitar 60 Wh energi (5 W x 12 jam) terbuang di siang hari untuk sebuah lampu.



- Lampu jalan terpasang di gedung umum tanpa penyangga yang memadai serta dinyalakan pada siang hari.



Penggunaan energi yang sia-sia dan tidak perlu di siang hari akan mengurangi kuota energi untuk penggunaan malam hari. Lupa mematikan lampu LED 5 W di siang hari akan mengurangi kuota hingga 60 Wh dalam 12 jam atau sama dengan seperlima bagian dari kuota harian 300Wh.



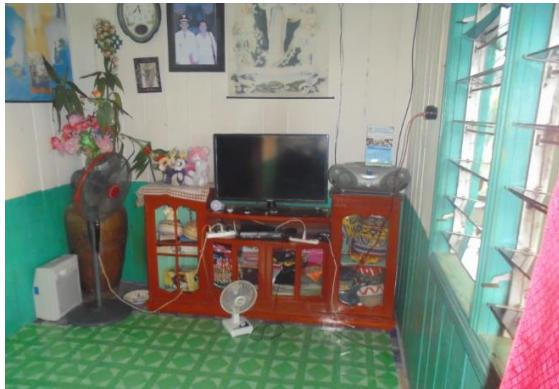
- Lampu-lampu terpasang dengan jarak yang memadai untuk menghasilkan distribusi pencahayaan yang lebih baik.



- Pemasangan lampu tidak boleh terlalu dekat satu dengan yang lain. Untuk meningkatkan penerangan, dianjurkan ganti lampu dengan nilai lumen yang lebih tinggi.



Pastikan lampu memiliki sudut penerangan yang lebar minimum 300°. Beberapa bohlam LED konvensional hanya dapat mendistribusikan cahaya dengan sudut 120°. Lampu dengan sudut pencahayaan yang sempit tidak boleh dipasang secara horizontal.



- Seluruh peralatan dimatikan saat pemilik tidak menggunakannya.



- Sistem pengeras suara yang berlebihan untuk sumber energi yang terbatas. Satu speaker pasif dapat mengkonsumsi daya sekitar 400 W.

⌚ Usaha tambahan untuk mengurangi penggunaan energi listrik

- Penerangan untuk fasilitas umum dapat dilengkapi dengan sensor gerak, pengatur waktu, atau sensor cahaya untuk mematikan penerangan secara otomatis saat tidak ada orang dalam ruangan atau saat matahari terbenam.
- Mewarnai dinding dengan warna yang memantulkan cahaya seperti putih dapat membantu meningkatkan pencahayaan.
- Selalu pasang lampu pada posisi vertikal dengan kepala lampu menghadap ke bawah untuk meningkatkan pencahayaan

████ Efisiensi energi

Penghematan energi melalui penggunaan peralatan yang hemat energi dapat berkontribusi secara signifikan dalam mengurangi konsumsi energi pada rumah tangga. Efisiensi energi adalah sebuah cara penggunaan teknologi yang menggunakan energi lebih sedikit untuk mendapatkan keluaran atau layanan yang sama, contohnya mengganti lampu pijar dan TV tabung (CRT) dengan teknologi LED. Harga komponen yang hemat energi mungkin sedikit lebih mahal dibandingkan dengan komponen konvensional. Namun, harga yang lebih mahal diganti dengan konsumsi energi yang lebih sedikit serta umur pakai lebih panjang sehingga peralatan tersebut lebih murah dalam jangka waktu pemakaian yang panjang.

⌚ Apa saja yang perlu dipertimbangkan saat membeli peralatan yang baru?

- Lakukan analisis sederhana pada keuntungan biaya dari opsi yang berbeda. Pilih peralatan yang paling efisien untuk harga terbaik.
- Selalu lihat konsumsi daya dari peralatan sebelum membeli peralatan elektronik. Hal ini untuk mencegah penggunaan peralatan yang tidak optimal dikarenakan kelebihan beban pada MCB atau kekurangan kuota.
- Hitung perkiraan penggunaan energi harian untuk dicocokkan dengan kuota energi harian.



- Lampu LED dengan efisiensi tinggi digunakan. LED tersebut hanya membutuhkan 5 W untuk menghasilkan sekitar 400 lumen.



- Lampu *fluorescent* tidak dianjurkan untuk digunakan karena menggunakan energi yang tinggi dan umur pakai yang lebih pendek.



Bagaimana menghitung konsumsi daya dan energi di dalam rumah?

Sebuah contoh bagaimana menghitung daya puncak dan konsumsi energi harian pada rumah tangga adalah sebagai berikut. Sebuah keluarga di sebuah desa memiliki tiga lampu LED 5 W, sebuah lampu LED 10 W, sebuah TV LCD 40 W, sebuah kipas angin 15 W, dan charger telepon 15 W. Keluarga ini berencana membeli penanak nasi 300 W. Peralatan tersebut dilindungi oleh MCB 1 A dan alat pembatas energi di set pada 450Wh. Perhitungan dilakukan dengan asumsi bahwa peralatan digunakan bersamaan.

1. Daftar semua peralatan rumah tangga

2. Periksa konsumsi daya setiap alat dalam satuan watt. Konsumsi daya tertera pada label yang melekat di setiap alat.
3. Periksa dan perkiraan lamanya alat beroperasi per hari. Contoh : bola lampu LED menyala selama 12 jam pada malam hari pada pukul 18:00 to 06:00
4. Hitung penggunaan energi setiap alat dalam satuan watt-jam per hari.

$$\text{Energi per hari} = \text{Daya} \times \text{jam/hari}$$

$$5 \text{ W} \times 12 \text{ jam} \quad \text{Energi per hari} = 60 \text{ Wh}$$

5. Hitung total daya dari seluruh peralatan

$$\text{Daya 1} + \text{Daya 2} + \dots + \text{Daya peralatan N}^{\text{th}}$$

$$5 + 5 + 5 + 10 + 40 + 15 + 5 \quad \text{Daya total} = 85 \text{ W}$$

6. Hitung total energi per hari dari semua peralatan

$$\text{Energi 1} + \text{Energi 2} + \dots + \text{Energi peralatan N}^{\text{th}}$$

$$60 + 60 + 60 + 40 + 120 + 60 + 10 \quad \text{Energi per hari} = 410 \text{ Wh}$$

7. Periksa kembali rating MCB. Total daya dari seluruh perangkat harus lebih kecil dari daya maksimum MCB.

$$\text{Daya maksimum MCB} > \text{Total daya}$$

$$\text{Daya maksimum MCB} = 1 \text{ A} \times 230 \text{ V} \quad 230 \text{ W} > 85 \text{ W}$$

Peralatan yang ada saat ini

No	Peralatan	Daya [Watt]	Jam/hari	Energi per hari [Watt-jam]
1	Bola lampu LED	5	12 jam	60 Wh
2	Bola lampu LED	5	12 jam	60 Wh
3	Bola lampu LED	5	12 jam	60 Wh
4	Bola lampu LED	10	4 jam	40 Wh
5	LCD TV	40	3 jam	120 Wh
6	Kipas angin	15	4 jam	60 Wh
7	charger hp	5	2 jam	10 Wh
	Total	90 W		410 Wh



Peralatan baru

8	Penanak nasi	300	0.5 jam	150 Wh
	Total	390 W		560 Wh



8. Periksa kembali pembatas energi. Total konsumsi energi per hari harus lebih kecil dari kuota energi.

9. Tambahkan peralatan yang akan dibeli ke dalam perhitungan untuk memeriksa apakah peralatan dapat digunakan dengan konfigurasi yang sudah ada saat ini.



- TV LED dengan konsumsi daya yang rendah lebih menjadi pilihan walaupun harganya yang mahal.



- TV CRT digunakan. TV CRT murah tapi kurang efisien dibanding TV LCD atau LED.



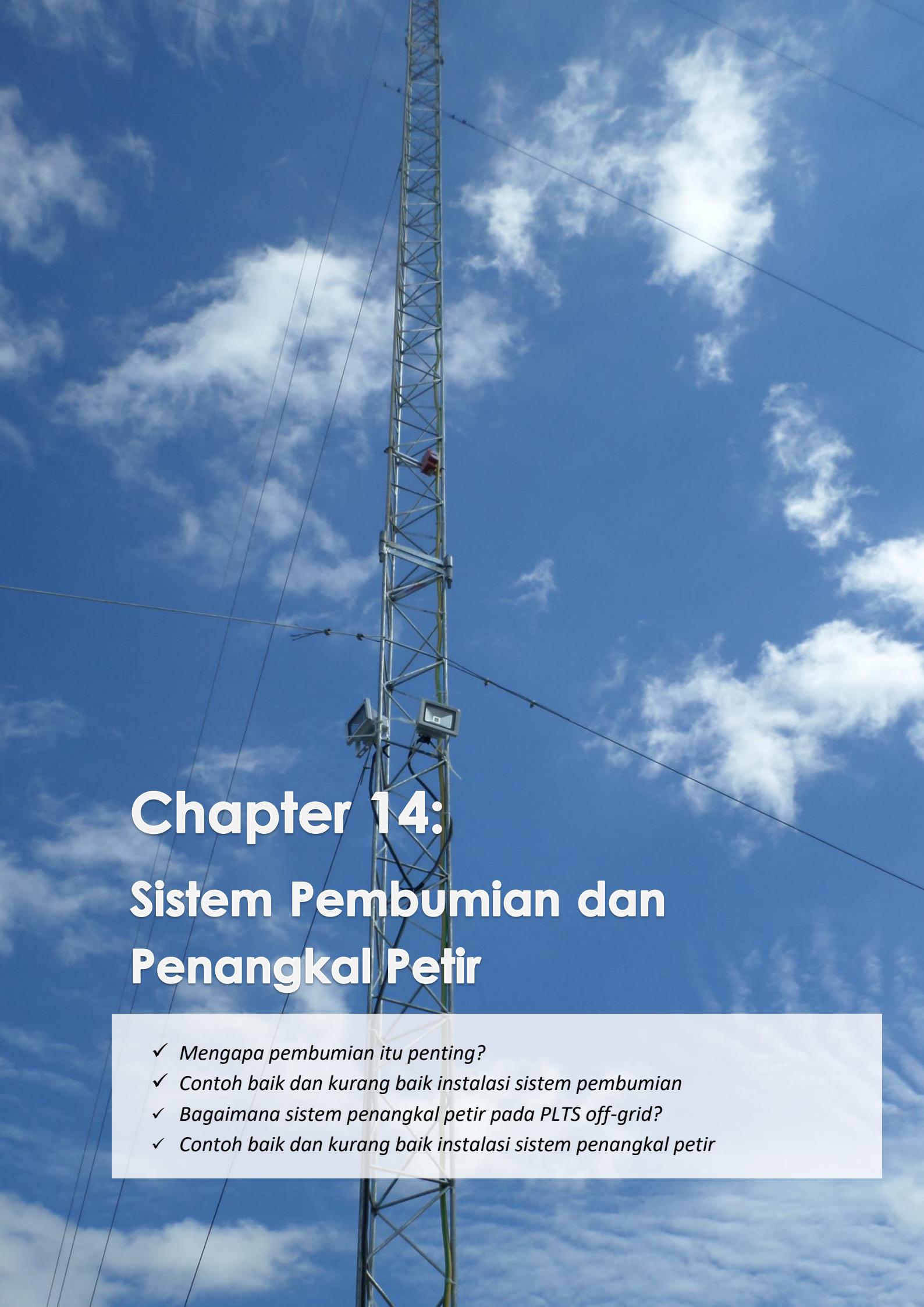
Tipe lampu yang bagaimana yang harus dipilih?

Selain hanya mempertimbangkan harga dan konsumsi daya atau nilai watt dari sebuah lampu, kita harus melihat nilai lumen yang tepat saat memasang titik lampu yang baru atau mengganti bohlam lampu yang rusak. Efikasi atau lumen per watt serta umur pakai harus dipertimbangkan saat memilih lampu yang tepat. Semakin tinggi efikasi artinya lampu semakin efisien dan saat biaya per umur pakai lebih rendah, artinya lampu ini lebih murah dalam jangka waktu lama. Berikut adalah perbandingan teknologi lampu yang terpasang di lokasi PLTS.



Teknologi	Bola lampu LED	Lampu CFL	Tabung Fluorescent
Daya	9 W	10 W	10 W
Lumen	800 lm	590 lm	390 lm
Biaya	Rp 34,000	Rp 22,000	Rp 36,000
Perkiraan umur alat	15000 jam (3.4 thn)	6000 jam (1.4 thn)	5000 jam (1.1 thn)
Efikasi	89	59	39
Biaya / umur alat	10,000 IDR / thn	16,000 IDR / thn	32,700 IDR / thn

Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa walaupun harga awal lampu LED tinggi, lampu ini memberikan lumen yang lebih tinggi untuk konsumsi daya yang lebih rendah pada harga per umur pakai yang lebih rendah. *Compact fluorescent lamp (CFL)* harus dipertimbangkan saat lampu LED tidak tersedia di desa namun lampu perlu diganti.



Chapter 14:

Sistem Pembumian dan Penangkal Petir

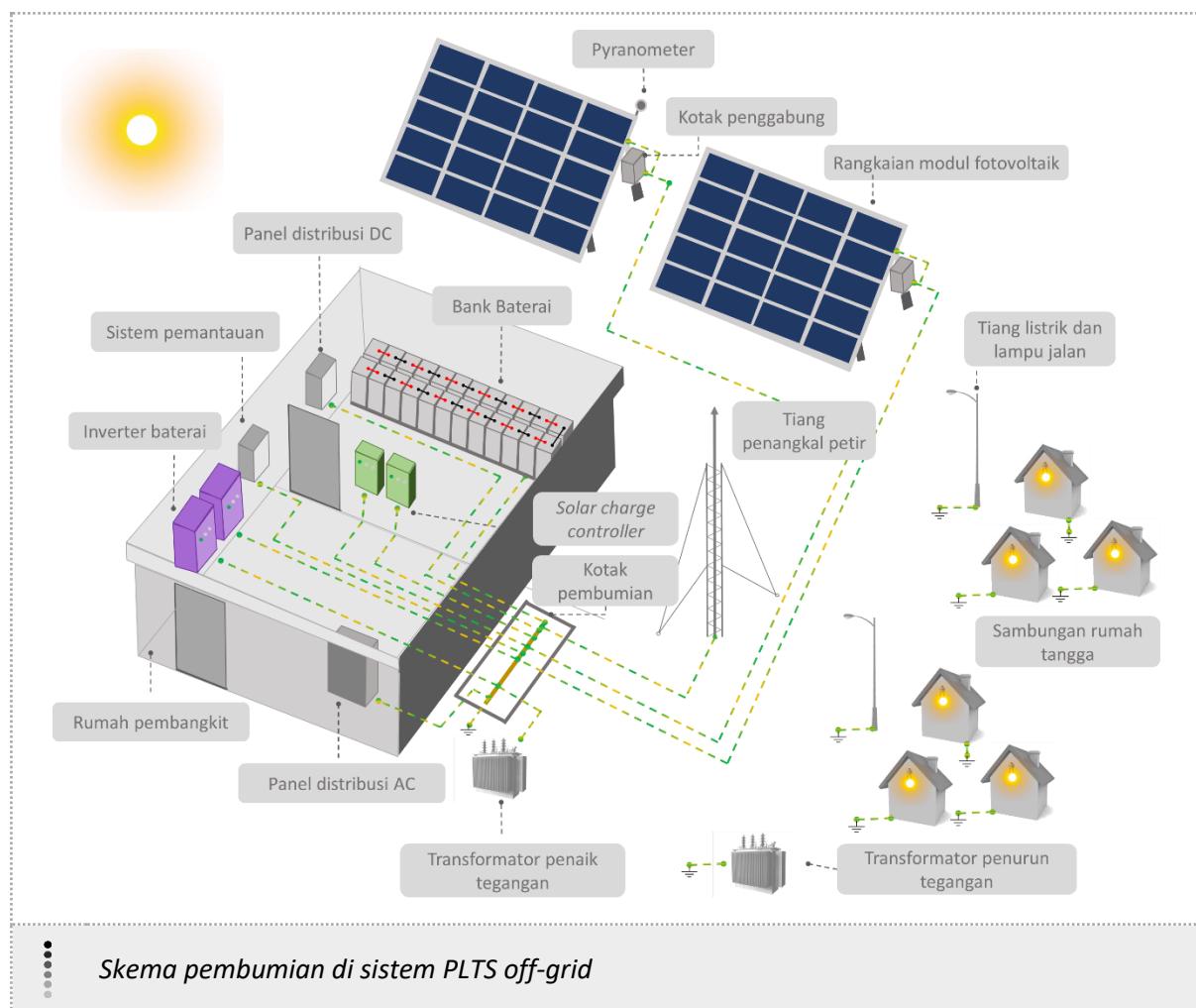
- ✓ Mengapa pembumian itu penting?
- ✓ Contoh baik dan kurang baik instalasi sistem pembumian
- ✓ Bagaimana sistem penangkal petir pada PLTS off-grid?
- ✓ Contoh baik dan kurang baik instalasi sistem penangkal petir

14.1. Dasar-dasar sistem pembumian dan penangkal petir

Pembumian adalah suatu teknik untuk menyambungkan material yang bersifat konduktif secara elektrik ke bumi. Pembumian bertujuan untuk memastikan instalasi yang aman dari gangguan arus yang dapat membahayakan keselamatan pengguna. Pembumian menyambungkan konduktor yang sedang aktif dan juga konduktor lain yang tidak sedang dialiri arus seperti rangka modul fotovoltaik, struktur penopang, selungkup berbahan logam, dan peralatan konduktif lainnya. Ketiadaan pembumian tidak saja akan menyebabkan bahaya sengatan listrik tapi juga berpotensi memicu kerusakan instalasi terutama saat terjadi sambaran petir.

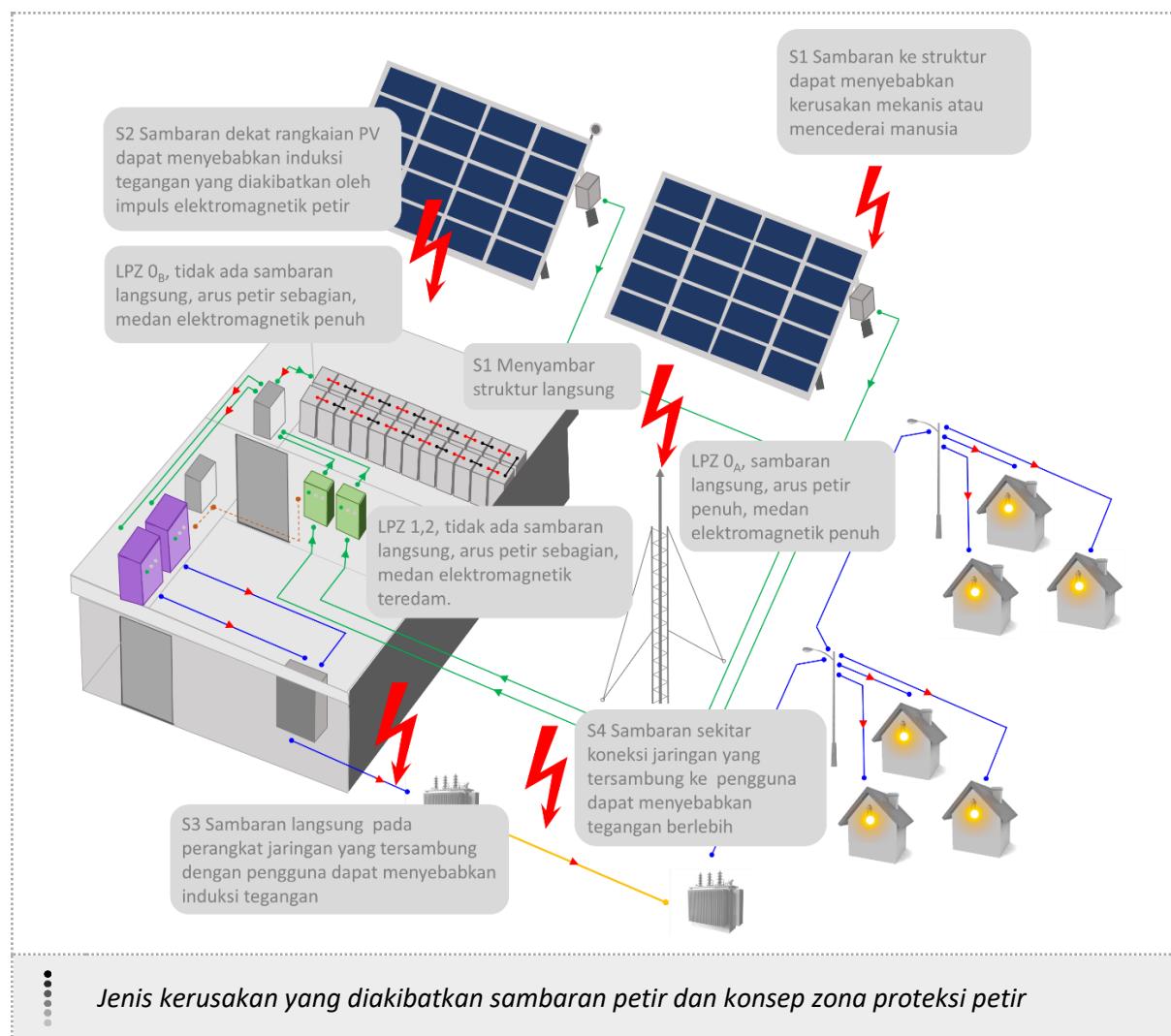
⦿ Mengapa pembumian sangat diperlukan?

- Melindungi instalasi dan peralatan kelistrikan dari gangguan arus dan sambaran petir
- Menghindari perbedaan potensial pada komponen konduktif dengan cara menyatukan di ikatan ekipotensial
- Memastikan keamanan untuk manusia dan binatang dari sengatan listrik baik langsung (kontak langsung dengan konduktor aktif) maupun tidak langsung (i.e. menyentuh komponen konduktif yang teraliri listrik karena gangguan isolasi)
- Menyediakan jalur aman untuk menyalurkan gelombang petir ke tanah



Sambaran petir adalah salah satu ancaman bagi PTLS *off-grid* karena lokasi sistem yang berada di ruang terbuka dan jauh dari struktur tinggi yang bersifat konduktif. Kerusakan sistem yang tidak terduga dan juga kerusakan isolasi mungkin dapat terjadi jika tindakan pencegahan seperti pemasangan sistem penangkal petir dan pembumian tidak dilakukan. Kerusakan yang timbul dapat diakibatkan oleh sambaran petir secara langsung (petir menyambar langsung ke struktur) dan sambaran petir tidak langsung (petir menyambar ke area sekitar struktur) yang dapat mengakibatkan tegangan berlebih pada jaringan sistem.

Petir adalah pelepasan muatan listrik dengan aliran arus listrik yang tinggi diakibatkan oleh adanya perbedaan potensial listrik antara awan dengan awan lainnya atau dengan bumi (tanah). Pelepasan muatan listrik ini terjadi saat kapasitas isolasi udara terganggu dikarenakan bertambahnya muatan listrik. Petir dari awan ke tanah adalah tipe petir yang paling sering terjadi dan sering menimbulkan kerusakan. Kerusakan yang dapat terjadi akibat sambaran petir dijelaskan dalam IEC 62305-1 dan dibagi menjadi S1, S2, S3, dan S4 berdasarkan lokasi sambaran petir, seperti digambrakan pada gambar berikut ini. Kerusakan yang terjadi adalah bingkai dan kaca pelindung modul fotovoltaik yang rusak, gangguan pada perangkat elektronika daya atau perangkat sensitif lainnya akibat tegangan berlebih, isolasi kabel yang rusak, dan sengatan listrik karena sentuhan dan tegangan yang berubah tiba-tiba dengan cepat dikarenakan adanya impuls elektromagnetik dari petir.

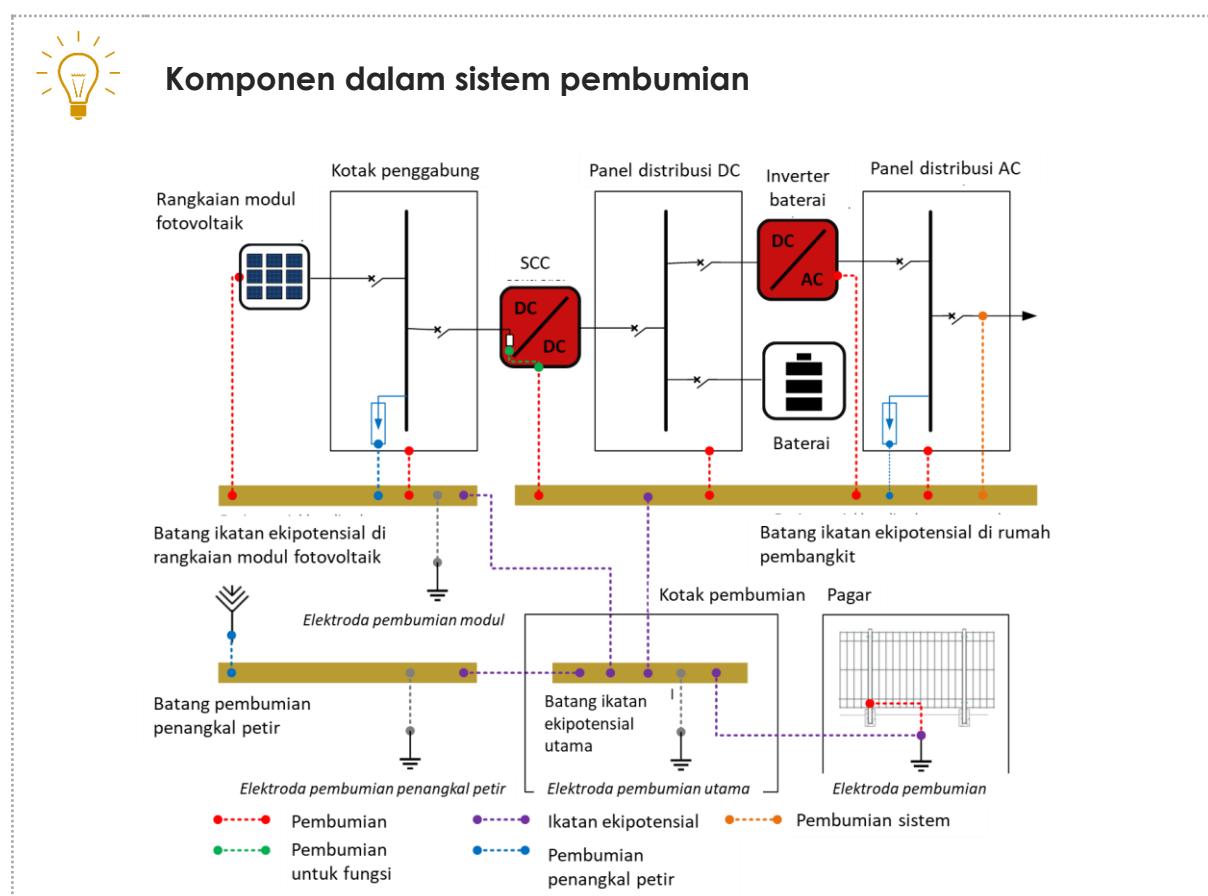


Untuk menentukan perlindungan yang sesuai terhadap sambaran petir, konsep mengenai zona perlindungan sambaran petir seringkali didefinisikan. Zona perlindungan dibagi menjadi zona luar (dari struktur perangkat sistem PLTS) diantaranya LPZ 0_A yaitu zona yang rawan terkena sambaran petir langsung dengan arus petir penuh, LPZ 0_B yaitu zona yang beresiko terkena sambaran petir dengan arus petir sebagian, dan zona dalam LPZ 1 dan LPZ 2.

Untuk menghindari kerusakan, sistem penangkal petir atau *lightning protection system* (LPS) harus dipasang untuk melindungi PLTS *off-grid* dari sambaran petir baik sambaran langsung maupun tidak langsung. LPS diklasifikasikan menjadi LPS internal dan eksternal. LPS luar (eksternal) adalah sistem terminasi udara, konduktor penangkal petir (*down conductor*), dan sistem terminasi pembumian yang utamanya menyediakan zona perlindungan dari sambaran petir langsung pada struktur PLTS *off-grid*. Sementara itu, LPS dalam bertujuan untuk mencegah percikan listrik dan kerusakan lainnya yang diakibatkan oleh adanya lonjakan tegangan. LPS dalam terdiri dari ikatan ekipotensial, jarak pemisah, dan perangkat proteksi tegangan surja.

14.2. Instalasi pembumian

Koneksi pembumian harus dipasang dengan baik untuk meningkatkan keamanan dari instalasi kelistrikan yaitu dengan mengurangi resiko sengatan listrik dari gangguan arus dan mengurangi dampak buruk tegangan surja pada peralatan elektronik. Pembumian yang baik meliputi konduktivitas tinggi dari konduktor, kemampuan konduktor pembumian untuk menerima gangguan arus yang besar, resistansi dan impedansi kecil, tahan terhadap korosi, dan tahan lama.



- **Pembumian peralatan** menyambungkan bagian konduktor terbuka yang tidak sedang dialiri listrik ke tanah
- **Sistem pembumian** memberikan sambungan ke bumi pada bagian yang tengah dialiri listrik
- **Sistem pembumian yang fungsional** dipasang untuk memastikan PLTS *off-grid* dapat berfungsi dengan sesuai, seperti menghindari *Potential Induced Degradation*¹ (PID) pada modul fotovoltaik. Caranya adalah dengan menyambungkan kutub negatif PV ke bumi. Pembumian biasa dilakukan pada komponen elektronika daya
- **Pembumian petir** menyediakan jalur untuk arus petir ke tanah saat terjadi sambaran petir
- **Batang ikatan ekipotensial** memastikan semua bagian konduktif memiliki level tegangan yang sama dan berada pada potensial nol
- **Konduktor elektroda pembumian** menyambungkan batang pengikat ke elektroda pembumian dengan menggunakan klem
- **Elektroda pembumian** adalah konduktor yang menyambungkan pembumian sistem PV ke tanah



Desain, ukuran, dan instalasi konduktor pembumian dan ikatan harus memenuhi standar lokal PUUL 2011 atau standar internasional seperti IEC 60364-5-54 and IEC 60364-7-712.

➲ Bagaimana cara mencegah PID?

- Tanahkan kutub negatif rangkaian PV untuk menghindari adanya level tegangan negatif relatif ke lingkungan sekitar.
- Lepaskan energi pada modul yang telah terisi dengan cara membalikkan tegangan pada rangkaian PV di malam hari. Cara ini dapat dilakukan dengan peranti khusus yang dilengkapi pelepas energi PV otomatis seperti *PV offset box*.



Pembumian kutub negatif dari rangkaian modul fotovoltaik diperbolehkan sepanjang ada isolasi galvanis antara sisi AC dan DC, atau ketika inverter jaringan dengan isolasi galvanis digunakan. Pembumian kutub negatif di sistem yang menggunakan inverter tanpa transformer dapat berujung pada hubungan arus pendek antara rangkaian modul fotovoltaik dengan jaringan saat terjadi gangguan.

¹ PID atau Potential Induced Degradation adalah fenomena yang biasanya memengaruhi modul fotovoltaik berbasis silikon kristaline. PID diakibatkan oleh kebocoran arus dan potensial tegangan di dalam modul antara sel surya dan bagian lain dari modul seperti bingkai yang dibumikan, kaca, dll. Fenomena ini mengakibatkan penurunan performa yang cukup signifikan setiap tahunnya dan penurunan ini semakin cepat dengan pengaruh kelembapan dan suhu.

⌚ Apa yang harus dipertimbangkan saat akan memasang sistem pembumian?

- Perangkat proteksi sistem pembumian dan perangkat proteksi arus berlebih harus dipasang saat kutub negatif rangkaian modul fotovoltaik tersambung ke tanah. Hal ini untuk menghindari aliran gangguan arus di dalam konduktor pembumian.
- Sistem pembumian yang berfungsi harus dipasang diantara saklar pemisah rangkaian modul fotovoltaik dan inverter jaringan atau SCC. Beberapa pabrikan menyediakan sambungan pembumian melalui *ground fault detection interruption* (GFDI) dengan sekering untuk menginterupsi sambungan saat terjadi gangguan.

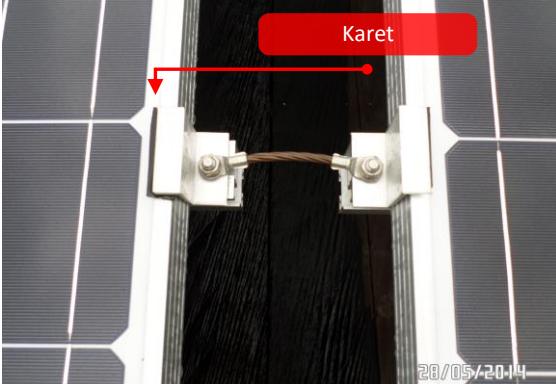
■■■ Pembumian peralatan

Pembumian peralatan dibutuhkan untuk memastikan bagian terbuka konduktif yang tidak aktif atau biasanya tidak dialiri arus di sistem PLTS *off-grid* berada pada level tegangan yang sama dan potensial nol relatif terhadap bumi. Komponen yang tidak aktif mencakup bingkai modul fotovoltaik, struktur penopang, konduit kabel berbahan logam, selungkup pada kotak penggabung dan panel distribusi, kerangka perangkat elektronika daya, dan pagar BRC. Instalasi pembumian yang baik melindungi pengguna atau operator dari tegangan sentuh, terutama saat gangguan atau saat konduktor yang teraliri arus bersentuhan dengan kerangka berbahan logam.



Kabel pembumian 10 mm²

 Masing-masing modul PV dibumikan dengan menyambungkan kabel pembumian secara langsung pada bingkai modul.



Karet

 Pengikatan antar modul PV dilakukan pada klem. Sebaiknya, klem dilengkapi karet penutup untuk menghindari kontak langsung.



Bingkai modul fotovoltaik harus dibumikan untuk mencegah adanya perbedaan potensial antara bingkai dan pembumian terutama untuk sistem yang menggunakan inverter tanpa transformer. Inverter memiliki komponen *switching* dengan frekuensi tinggi mengakibatkan fluktuasi pada kabel. Kabel modul fotovoltaik yang secara kapasitif terhubung (*capacitive coupling*) dengan bingkai modul mengakibatkan tegangan induksi pada bingkai.



- Struktur penopang diikat pada bingkai modul fotovoltaik dan disambung ke pembumian dengan baik.



28.05.2



- Konduktor pembumian terlepas dari skun kabel menjadikannya tidak terlindungi.



- Pembumian struktur penopang yang baik dengan ukuran tepat dan diarahkan dengan baik.



- Koneksi dan pemasangan pembumian yang buruk. Ukuran konduktor tidak cukup besar dan tidak menggunakan skun kabel.



Konduktor pembumian peralatan tidak lebih kecil dari 6 mm^2 untuk tembaga, 16 mm^2 untuk alumunium or 50 mm^2 untuk baja.

⇒ Bagaimana cara untuk memperbaiki instalasi?

- Pembumian bingkai modul fotovoltaik harus dilakukan dengan menyambungkan kabel pembumian secara langsung ke bingkai. Pastikan ada kontak langsung antar modul karena lapisan khusus atau *layer* mungkin mengisolasi sambungan.
- Lakukan inspeksi visual dan verifikasi kinerja secara rutin dengan menguji ketahanan pembumian lanjut pada semua sambungan pembumian, untuk memastikan kualitas penyambungan pembumian.



- Struktur penopang dari rangkaian modul fotovoltaik harus terikat satu sama lain dengan cara menyambungkannya ke jaringan ikatan modul fotovoltaik. Koneksi ikatan ekipotensial dipasang dibawah tanah dengan konektor silang anti korosi.



- Solusi sementara menggunakan paku untuk mengencangkan konduktor pembumian di struktur penopang.



- Skun kabel tidak dipasang di baut struktur penopang. Pergerakan kecil dapat menyebabkan sambungan terlepas.



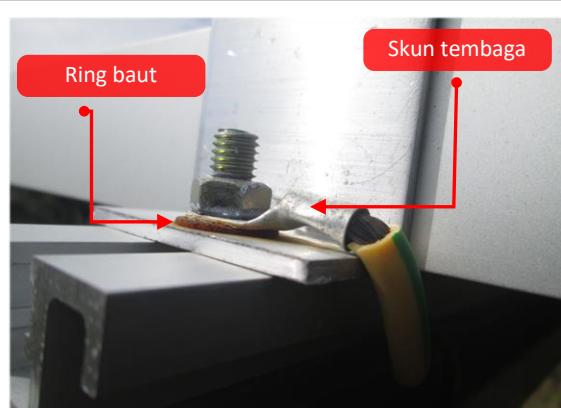
- Kerangka dari inverter baterai disambung ke pembumian melalui terminal pada kerangka perangkat.



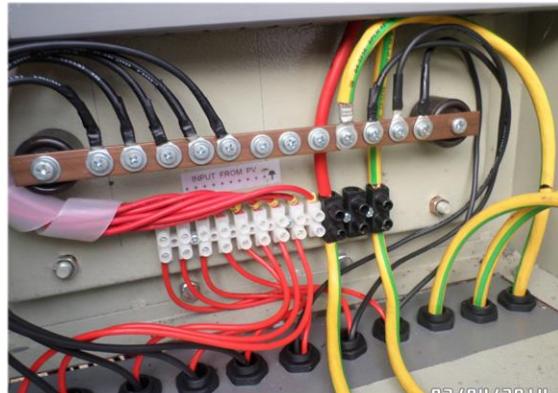
- Tidak ada SCC yang tersambung ke pembumian. Tiap SCC harus disambung ke pembumian



Hindari pemasangan pembumian peralatan dengan konfigurasi rantai daisy. Kontinuitas pembumian dapat terputus dengan mudah saat sambungan pertama hilang dan meningkatkan bahaya sengatan listrik.



- Korosi pada ring baut meningkatkan resistansi sambungan. Hindari kontak langsung antara logam berbeda dengan potensial anoda berbeda.



- Warna kabel insulasi yang keliru dapat membingungkan dan kesalahan pemasangan kabel.



- Pagar disambung ke pembumian untuk melindungi manusia atau binatang dari sengatan listrik dari kontak tidak langsung.



- Jalur kabel logam yang tidak dibumikan dapat menyebabkan sengatan listrik saat terjadi gangguan kelistrikan



- Pintu selungkup disambungkan secara fisik ke batang ikatan ekipotensial.



- Ketiadaan konduktor pengikat dapat menghilangkan proteksi dari kontak tidak langsung dengan aliran arus maupun sambaran petir.

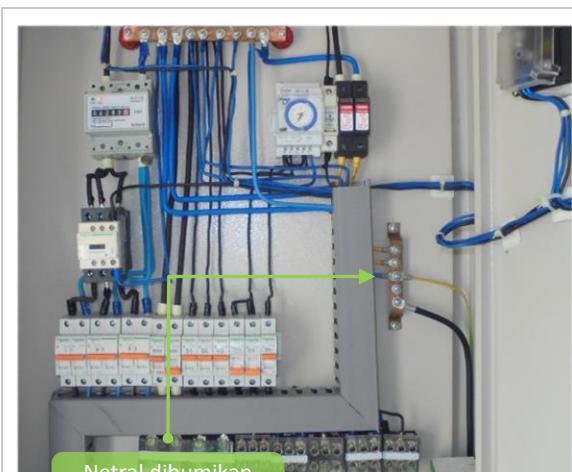
⌚ Bagaimana cara untuk memperbaiki instalasi?

- Untuk mencegah korosi galvanis, hindari kontak langsung antara tembaga dan bingkai aluminium atau antara tembaga dan baja dengan *hot dip galvanized*. Ring baut bilogam atau sambungan bilogam dapat digunakan untuk mencegah kontak langsung.
- Gunakan isolasi kabel yang berbeda antara kabel daya dan konduktor pembumian. Kabel berwarna kuning/hijau harusnya hanya digunakan untuk pembumian.

☰ Sistem pembumian

Sistem pembumian atau dikenal juga penyusunan pembumian adalah penyambungan konduktor pembumian pada bagian instalasi untuk tujuan keamanan. Salah satu konfigurasi pembumian yang paling umum dan digunakan pada jaringan distribusi adalah sistem TN yang merupakan singkatan dari *Terre Neutre*. Pada konfigurasi ini, *line netral* dikombinasikan dengan konduktor pembumian yang terproteksi. Ada tiga tipe sistem TN yang bisa diimplementasikan yaitu: (1) TN-C atau kombinasi *protective earth and neutral* (PEN), (2) TN-S atau *separated neutral and grounding*, (3) TN-C-S yang merupakan gabungan (hybrid) dari TN-C dan TN-S.

Jaringan TN-C biasanya digunakan untuk jaringan distribusi rendah karena ini adalah penyusunan pembumian yang paling hemat biaya. Sistem pembumian ini tidak memerlukan konduktor tambahan untuk koneksi *protective earth* (PE), walaupun ini merupakan sistem pembumian yang paling tidak aman dengan resiko terputusnya sambungan PEN yang tinggi.



- Kabel netral dikombinasikan dengan batang pembumian untuk membentuk konduktor PEN.



- Kabel netral disambung pembumian untuk menjaga konduktor PEN pada tiang jaringan distribusi.

⌚ Apa yang harus dipertimbangkan saat menentukan ukuran konduktor?

- Ukuran konduktor pembumian terproteksi harus sama seperti konduktor fasa, untuk konduktor fasa sampai ukuran 16 mm^2 , seperti disebutkan dalam IEC 60364-5-54 “Instalasi kelistrikan bangunan– Bagian 5-54: Pemilihan dan pemancangan peralatan listrik – penyusunan pembumian, konduktor terproteksi, dan konduktor pengikat terpoteksi”.

- Untuk konduktor fasa yang lebih besar atau sama dengan 35 mm^2 ukuran konduktor pembumian harus setengah kali lebih kecil dari konduktor fasa.



Pastikan bahwa sepanjang jaringan distribusi konduktor netral dibumikan. Pembumian setidaknya harus dilakukan pada tiang pertama, tiang terakhir, dan setiap 5 tiang dari tiang pertama dengan maksimum resistansi pembumian sebesar 10Ω .

Ikatan ekipotensial

Ikatan ekipotensial adalah koneksi secara elektrik seluruh kabel pembumian kecuali kabel pembumian untuk fungsional komponen bersama-sama pada batang ikatan ekipotensial untuk mencapai level potensial yang sama. Proses ini memastikan bahwa tidak akan ada aliran arus pada bagian konduktif yang mungkin dapat mengakibatkan sengatan listrik saat terjadi gangguan kelistrikan atau tersambar petir.

Ⓐ Apa yang harus dipertimbangkan saat melakukan pemasangan batang ikatan ekipotensial?

- Ikatan ekipotensial harus ditempatkan dekat dengan jalur masuk konduktor pembumian yang tersambung ke batang ikatan ekipotensial utama.
- Pembumian harus dilabeli dengan peralatan pembumian sesuai diagram pembumian yang dibangun
- Pastikan bahwa koneksi antara konduktor pembumian, batang ikatan ekipotensial, dan elektroda pembumian memiliki jalur rangkaian dengan resistansi rendah. Lakukan uji pembumian lanjut untuk memverifikasi bahwa sambungan pembumian memiliki resistansi yang rendah.



- Konduktor pembumian dan pengikat dari batang yang lain tersambung dengan baik pada batang ikatan ekipotensial utama.



- Jumlah konduktor berlebihan diikatkan pada klem elektroda pembumian.



- Kombinasi instalasi pembumian dari beberapa sistem ikatan ekipotensial di dalam ikatan ekipotensial utama.



- Pemasangan pembumian yang terpisah mengakibatkan perbedaan potensial antar peralatan yang tersambung ke pembumian.

⦿ Bagaimana cara untuk memperbaiki instalasi?

- Utamakan menggunakan batang pengikat sebagai ikatan ekipotensial utama dibandingkan menyambungkan ke elektroda pembumian, untuk mendapatkan resistansi yang lebih baik.
- Jangan pernah memasang sistem pembumian yang terpisah. Gabungkan elektroda pembumian dengan menggunakan konduktor tembaga berukuran setidaknya 6 mm^2 .



Pastikan bahwa semua batang pembumian diikatkan bersama, termasuk elektroda pembumian rangkaian modul fotovoltaik, rumah pembangkit, dan penangkal petir. Sebaiknya gunakan konduktor ikatan ekipotensial dengan ukuran setidaknya 6 mm^2 untuk tembaga atau 16 mm^2 untuk aluminium.



- Batang ikatan ekipotensial dipasang secara tepat dengan penyambungan konduktor pembumian yang aman.



- Konduktor pembumian terlepas dari skun kabel. Pastikan seluruh bagian konduktor dikencangkan pada skun.



Pasang batang ikatan ekipotensial di dekat jalur masuk kabel untuk mencegah sebagian arus sambaran petir masuk ke dalam rumah pembangkit.

■■■ Elektroda pembumian

Elektroda pembumian adalah konduktor yang menyediakan koneksi ke tanah dan menentukan tahanan pembumian sistem PLTS ke bumi. Rantai elektroda pembumian terdiri dari:

- Konduktor elektroda pembumian yang menyambungkan antara ikatan ekipotensial utama ke elektroda lain.
- Klem elektroda pembumian untuk mengikat konduktor pembumian dan elektroda.
- Elektroda pembumian. Penting untuk memperoleh tahanan pembumian yang rendah dengan cara menggunakan material elektroda yang tepat, panjang yang tepat, pemasangan yang tepat, dan resistivitas tanah yang rendah.

Resistivitas tanah adalah salah satu faktor kunci dalam merancang sistem pembumian, seperti panjang elektroda atau jenis material elektroda, untuk mencapai resistansi pembumian yang rendah. Resistivitas tanah adalah kemampuan tanah untuk mengalirkan listrik, yang bergantung pada jenis tanah, kelembapan, dan temperatur.



- Pemasangan batang pembumian yang tepat. Elektroda pembumian terpasang dengan baik dan berada pada lokasi yang tepat.



- Instalasi kurang baik dari batang pembumian di dalam bebatuan.
- Batang yang tidak ditanam tidak menyediakan kontak ke bumi.



- Elektroda pembumian disambung paralel untuk mengurangi tahanan pembumian. Namun, jarak antar elektroda baiknya tidak terlalu dekat.



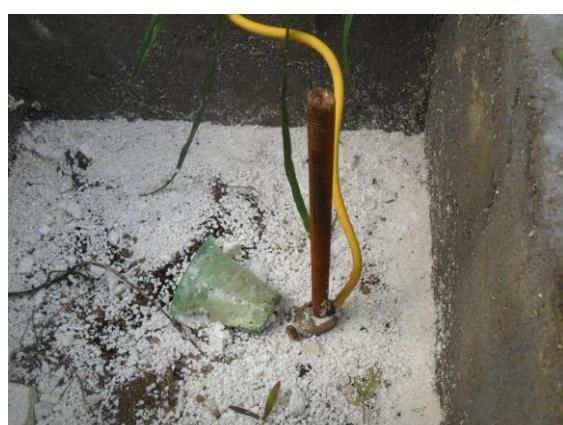
- Elektroda pembumian tidak disambung ke kabel apa pun dan ditempatkan diluar kotak pembumian.

⌚ Apa yang harus dipertimbangkan saat memasang elektroda pembumian?

- Semakin kecil resistivitas tanah, semakin tinggi sifat korosifnya. Elektroda pembumian harus dibuat dari material anti karat, konduktivitas tinggi, dan resistansi kecil seperti tembaga.
- Pastikan panjang elektroda cukup untuk memiliki kontak dengan tanah disekitarnya sehingga memperkecil tahanan sistem pembumian. Minimal panjang elektroda dua meter dengan luas penampang 25 mm^2 dapat digunakan untuk konduktor dari tembaga. Resistivitas tanah berkurang drastis hingga kedalaman empat meter, selanjutnya tidak ada perubahan resistivitas secara signifikan.
- Resistansi pembumian harus dijaga rendah sampai 5Ω untuk pembumian utama, rangkaian modul fotovoltaik, dan batang penangkal petir. Resistansi pembumian harus secara rutin diukur, setidaknya sekali dalam setahun, dan perbaikan dibutuhkan saat resistansi berada diatas batas minimal.



- Elektroda pembumian dipasang di tanah yang lembap. Kelembapan tinggi dapat meningkatkan konduktivitas tanah secara signifikan.



- Material beton sangat buruk untuk mengatasi arus tinggi. Saat terjadi gangguan, air akan berubah menjadi uap dan menyebabkan retakan.



- Klem digunakan untuk menyediakan koneksi pembumian yang lebih baik atau jalur dengan hambatan rendah.



- Instalasi konduktor elektroda pembumian yang buruk. konduktor sangat tipis dan tidak menggunakan klem.



Sambungan konduktor elektroda pembumian ke elektroda pembumian harus terkontak dengan baik untuk menjaga koneksi kelistrikan antara kedua komponen. Sambungan harus terlihat dan mudah dipelihara.



30/03/2014



- Penggunaan klem baut U dengan kualitas baik dan tanpa karat untuk ditanam. Diutamakan untuk menjaga koneksi tetap berada diatas tanah.



- Penggunaan klem elektroda pembumian yang tidak standar. Karat tidak hanya menyebabkan resistansi bertambah tetapi juga memutuskan sambungan.

⇒ Bagaimana cara untuk memperbaiki instalasi?

- Tambahkan jarak antara elektroda pembumian, setidaknya sampai sama dengan kedalaman batang pembumian, untuk merasakan pengaruh resistansi tanah yang lebih tinggi. Pemasangan batang yang dekat satu dengan lainnya menyebabkan penyilangan area resistansi elektroda lain sehingga resistansi tidak akan berkurang secara signifikan.
- Pastikan bahwa resistansi dari sambungan tidak lebih besar dari $1 \text{ m}\Omega$.
- Lapisan proteksi karat atau plester anti korosi dapat digunakan untuk mengisolasi klem pembumian dan melindungi sambungan ikatan dari karat, terutama saat sambungan berada di bawah tanah.
- Gunakan klem elektroda yang sesuai seperti tipe G5 atau klem baut U.



- Resistansi pembumian yang rendah pada elektroda pembumian utama



- Resistansi batang pembumian yang relatif tinggi



Resistansi pembumian untuk elektroda pembumian utama, rangkaian modul fotovoltaik, dan penangkal petir harusnya tidak lebih besar dari 5Ω . Resistansi pembumian harus sering diukur setidaknya sekali dalam satu tahun dan perbaikan dibutuhkan saat resistansi meningkat sampai melewati batas minimal.



- Instalasi elektroda pembumian dan ikatan ekipotensial yang baik dengan jarak yang cukup dari dasar tanah.



- Batang ikatan ekipotensial seharusnya tidak dipasang diatas tanah. Batang ikatan ekipotensial yang terendam dapat mempercepat proses korosi



Pastikan bahwa lubang pembumian mengandung tanah berpori untuk menyerap air dan menjaga kondisi saat basah. Lebih diutamakan untuk menjaga semua koneksi (klem) diatas dasar tanah.



⦿ Apa yang harus dipertimbangkan dari kotak pembumian?

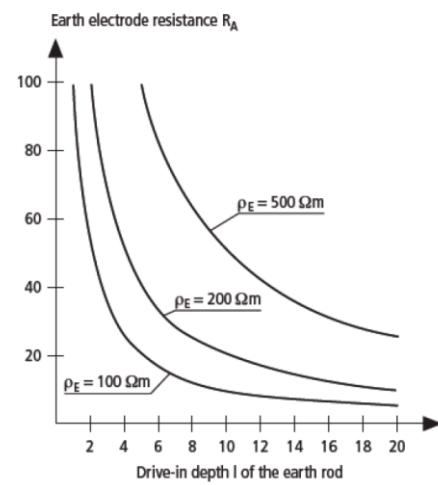
- Kotak pengendali pembumian dibuat oleh tukang dan dicor serta diperhalus. Ketinggian dan penutup dari kotak harus didesain agar mudah dilakukan perawatan.
- Garam dan batu bara dapat ditambahkan kedalam tanah untuk menjaga agar tanah tetap basah dan meningkatkan konduktivitas tanah. Sebagai aturan praktis, 8 kg garam per 1 M^3 tanah sudah cukup untuk meningkatkan konduktivitas tanah secara signifikan.
- Minimal 20% kelembapan harus dipertahankan untuk mendapatkan resistivitas yang kecil. Konsentrasi yang lebih kecil dapat dengan cepat meningkatkan resistansi. Tanah harus rutin disiram untuk menjaga agar resistivitas tetap rendah, terutama di musim kemarau.
- Kotak pembumian di area berbukit atau lanskap miring mungkin memiliki tanah yang lebih kering karena permukaan air yang cepat kering. Selalu pilih lokasi kotak pembumian yang tidak mudah untuk kering.



Bagaimana cara memperbaiki resistansi pembumian?

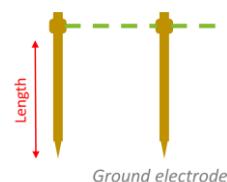
- Ukur resistansi pembumian dengan menggunakan *earth ground tester* sebagai referensi
- Sebelum melakukan instalasi, lakukan tes resistivitas tanah untuk mendapatkan lokasi terbaik untuk instalasi dan untuk mengidentifikasi kedalaman penanaman batang pembumian untuk memperoleh resistansi pembuian yang kecil.
- Hitung panjang elektroda yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai resistansi 5Ω . Untuk mengurangi resistansi, tambahkan panjang batang atau pasang beberapa batang secara paralel. Dari grafik berikut ini, setidaknya 20 m kedalaman penanaman elektroda dibutuhkan untuk tanah beton agar mendapatkan nilai resistansi sebesar 5Ω . Solusi lainnya yaitu dengan memasang beberapa batang secara parallel.

Tipe tanah	Resistivitas dalam Ωm
Beton	100 – 500
Rawa	20 – 40
Lahan pertanian	90 – 100
Tanah berpasir lembap	200 – 400 (1000 – 1100)
Tanah berbatu	100 – 3000
kerikil	200 – 1500
Air sungai (laut)	10 – 100 (0.3)

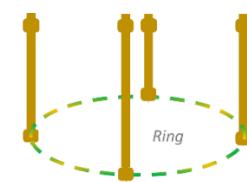


Tahanan (R_A) elektroda vs panjangnya²

- Alternatif dari memasangkan elektroda pembumian secara paralel adalah dengan menggunakan sistem pembumian ring yang tertanam dalam tanah. Kabel tembaga telanjang atau kabel tembaga tanpa isolasi dengan ukuran setidaknya 25 mm^2 dapat dibenamkan disekitar rumah pembangkit atau rangkaian modul fotovoltaik.



• Batang pembumian paralel



• Sistem pembumian tertanam dengan konfigurasi ring

- Bangun kotak pembumian untuk menjaga sambungan pembumian dan kondisi tanah.

² Lightning Protection Guide, 3rd updated version, 2015, Dehn, Neumarkt, Germany



- Kotak pengendali pembumian berbahan beton untuk melindungi dan menjaga instalasi pembumian.



- Batang pengikat yang berkarat dan tertutupi pasir. Elektroda pembumian tidak terpasang.

14.3. Sistem Penangkal Petir

Sistem penangkal petir menyediakan sebuah zona perlindungan untuk memastikan keamanan bagi sistem PLTS maupun manusia dan binatang dari sambaran petir, baik sambaran langsung ataupun tidak langsung, dengan menggunakan peralatan seperti sistem terminasi udara, kabel penghantar petir, pembumian dengan nilai hambatan yang kecil, ikatan ekipotensial, jarak pemisah dengan komponen konduktif lainnya, dan proteksi surja. Standar IEC 62305-2 – *“Protection against lightning - Part 2: Risk management”* and IEC 62305-3 – *“Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard”* saat melakukan identifikasi resiko, kemungkinan kerusakan, dan pengamanan yang dibutuhkan dari sambaran petir pada sistem PLTS.

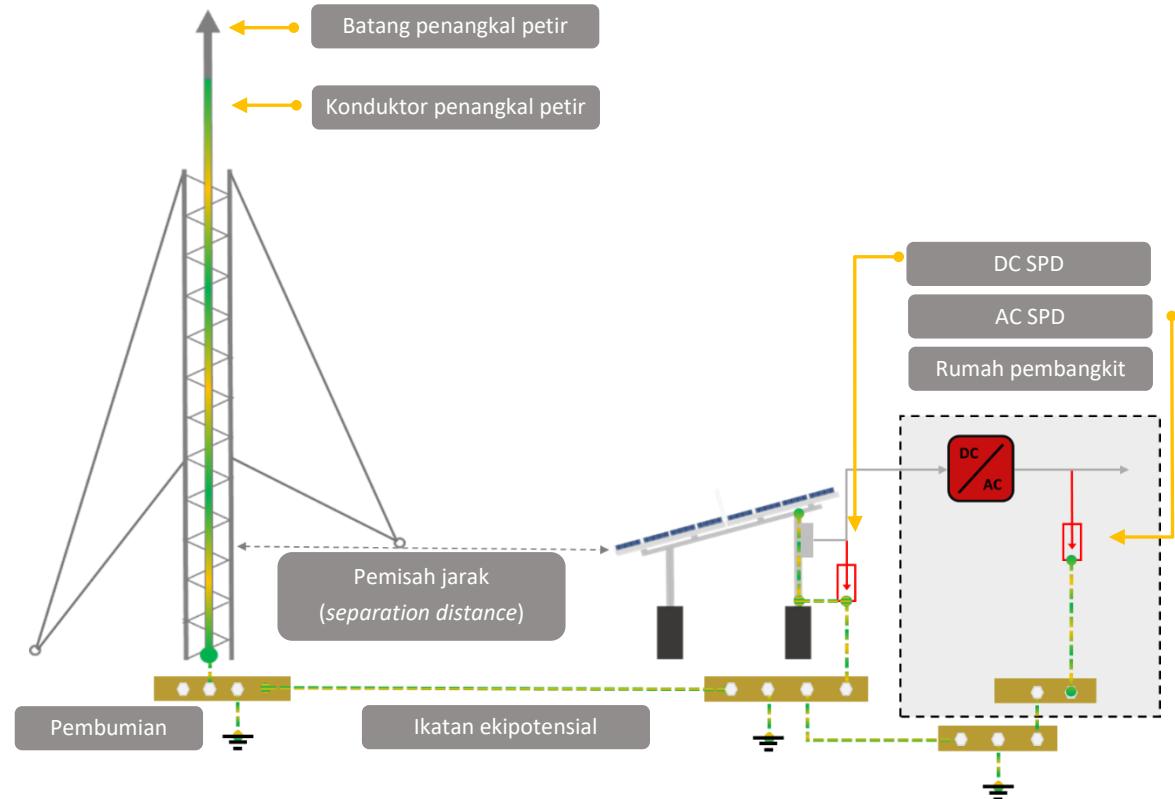
➲ Bagaimana cara mencegah kerusakan akibat sambaran petir?

- Pasang sistem terminasi udara yang memadai. Rangkaian modul fotovoltaik dan rumah pembangkit harus berada dalam zona sistem terminasi udara.
- Ukuran konduktor penangkal petir dan elektroda pembumian harus sesuai dengan kebutuhan dan dipasang dengan baik.
- Jarak pemisah antara sistem terminasi udara dan bahan konduktif lain seperti bingkai modul fotovoltaik harus diajaga sedemikian untuk menghindari bunga api.
- Semua elektroda pembumian seperti elektroda pembumian penangkal petir, elektroda pembumian rangkaian modul fotovoltaik, dan elektroda pembumian utama harus tersambung melalui ikatan ekipotensial.
- Semua perangkat kelistrikan dan elektronik harus terlindung dari tagangan berlebih baik DC maupun AC dengan menggunakan Surge Protection Device (SPD).
- Untuk melindungi dari tegangan berlebih, hindari kabel yang terputar dalam pemasangan sistem. Kabel positif dan negatif harus terpasang berdekatan. Lindungi kabel panjang di dalam konduit logam yang dibumikan ke ikatan potensial untuk melindungi kabel dari lonjakan induktif.





Bagaimana sistem penangkal petir yang biasa dipasang pada PLTS off-grid?



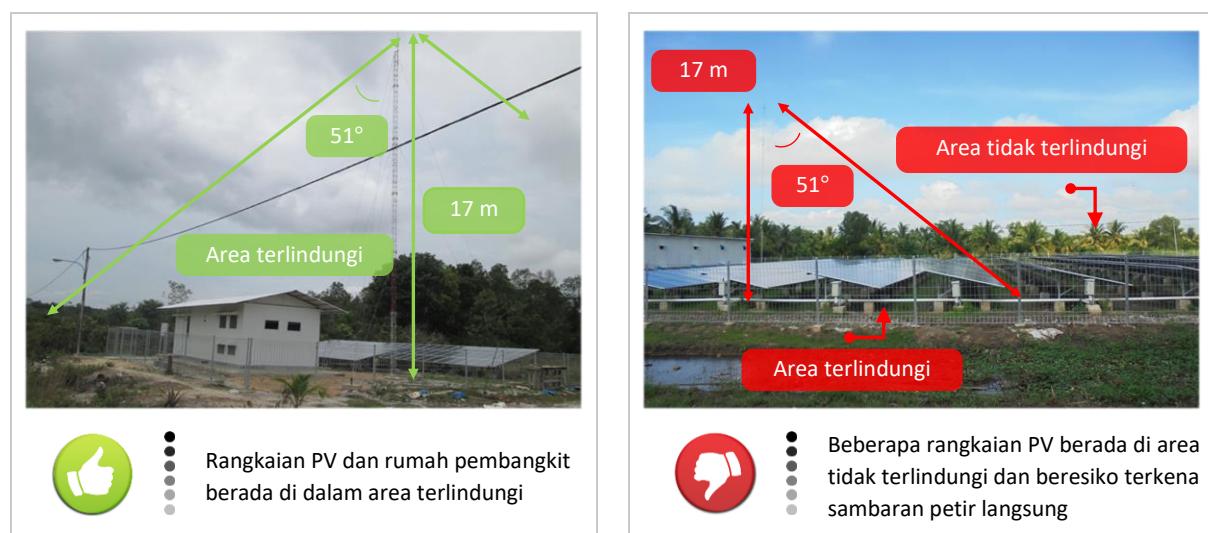
- **Batang penangkal petir** menyediakan jalur ke tanah yang dapat digunakan untuk mengalirkan arus petir yang tinggi saat terjadi sambaran petir atau untuk menangkap kilat.
- **Tiang penangkal petir** menopang batang penangkal petir agar dapat mencapai ketinggian yang ditargetkan. Tiang ini juga menunjang kawat pengencang untuk menyediakan stabilitas terhadap tiang penangkal petir.
- **Konduktor penangkal petir** menyediakan jalur arus sambaran petir yang aman untuk disalurkan oleh elektroda pembumian.
- **Pembumian penangkal petir** atau sistem terminasi bumi bertanggungjawab dalam menyalurkan arus sambaran petir ke tanah.
- **Ikatan ekipotensial** memastikan bahwa tidak ada perbedaan potensial atau penurunan potensial antar elektroda pembumian.
- **Jarak pemisah** adalah jarak antara sistem terminasi udara atau konduktor penangkal petir dan komponen logam di dalam instalasi.
- **Perangkat proteksi surja** melindungi peralatan kelistrikan dari lonjakan arus dan tegangan saat terjadi sambaran petir.



Sistem penangkal petir harus didesain sesuai dengan IEC 62305 – *Protection against lightning*.

■■■ Sistem terminasi udara

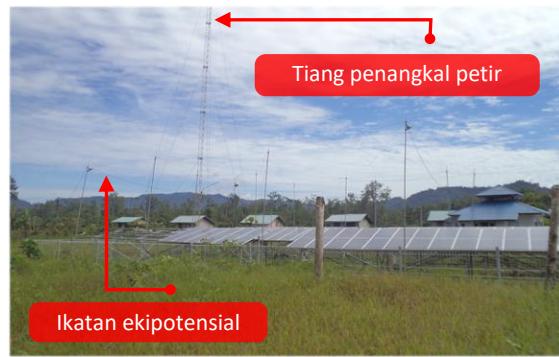
Sistem terminasi udara memberikan perlindungan dengan cara menarik muatan listrik dan mengalirkannya ke kabel penangkal petir. Lokasi dan desain sistem terminasi udara harus didefinisikan dengan benar agar pembangkit listrik mendapatkan perlindungan utuh dari sambaran petir langsung. Beberapa metode seperti *rolling sphere* atau *protective angle* dapat digunakan untuk memperkirakan luas area sistem terminasi udara yang mendapat perlindungan. Tiang penangkal petir yang berdiri bebas menggunakan batang sistem terminasi udara dengan desain *protective angle* biasanya digunakan di dalam sistem *PLTS off-grid*. *Protective angle* atau sudut terlindungi adalah sudut antara ujung tiang penangkal petir dan proyeksinya ke tanah. Area yang terlindungi adalah berupa area tiga dimensi yang berbentuk kerucut. Area terlindungi akan bergantung pada ketinggian batang sistem terminasi udara dari tanah dan kelas dari LPS seperti terdefinisi didalam IEC 62305-3.



Ketinggian dari tiang penangkal petir sebaiknya tidak lebih rendah dari 15 m agar dapat mencapai radius perlindungan sebesar 20 m. Dengan mempertimbangkan kelas LPS III (Sistem PLTS yang lebih besar dari 10 kWp), penambahan ketinggian hanya akan menambah radius perlindungan hingga 2 meter.



- Tiang dipasang di lokasi yang tepat untuk melindungi modul fotovoltaik dan rumah pembangkit.



- Pemasangan batang penangkal petir yang terlalu tinggi dapat membuat bayangan pada rangkaian PV.

➲ Bagaimana cara untuk memperbaiki instalasi?

- Tambahkan radius pelindungan dengan mengganti batang *franklin* dengan batang *early streamer* atau dengan memasang batang *franklin* tambahan. Metode desain *rolling sphere* dapat dipertimbangkan saat memasang beberapa batang penangkal petir.
- Pemasangan beberapa batang penangkal petir tidak dibutuhkan. Untuk PLTS yang relatif kecil, optimasi ketinggian tiang penangkal petir lebih dianjurkan daripada memasang beberapa batang penangkal petir untuk menambah area perlindungan.
- Ikatan ekipotensial dari batang penangkal petir harus dipasang di bawah tanah menggunakan sistem terminasi pembumian berjala.



- Batang *Early Streamer Emission (ESE)* digunakan untuk memperbesar radius perlindungan dan meningkatkan akurasi penangkapan.



- Batang sederhana atau jenis *Franklin* digunakan. Batang logam akan mengalirkan secara pasif saat disambar petir.



➲ Mengapa batang ESE atau batang penangkal petir aktif lebih dianjurkan daripada batang penangkal pasif?

- Batang ESE menyediakan radius perlindungan yang lebih jauh. Sistem ionisasi dari batang ini diaktifkan oleh gelombang elektromagnetik yang ditimbulkan saat badai dan berujung pada terbentuknya *streamer*.
- Batang ESE tidak lebih mahal dibanding pemasangan beberapa batang *Franklin* untuk melindungi area yang lebih besar.
- Batang ESE memiliki akurasi yang lebih baik saat mengalirkan arus ke batang penangkal petir.



■■■ Konduktor penangkal petir



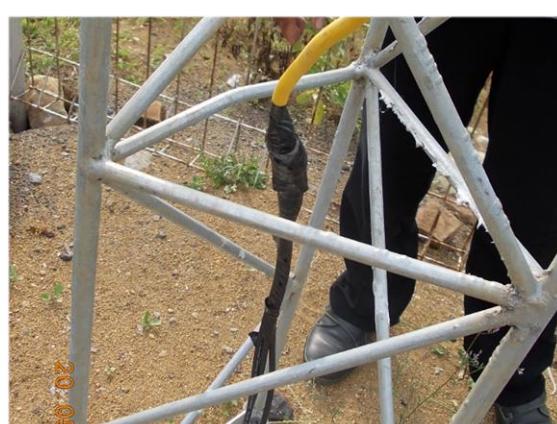
- Konduktor penangkal petir terlindungi dengan baik di dalam pipa PVC dan dipancangkan pada tiang.



- Konduktor penangkal petir yang kecil (16 mm^2) mempunyai resistansi jalur aliran petir yang lebih tinggi.



- Kabel 50 mm^2 digunakan sebagai konduktor untuk mengalirkan arus petir ke tanah dengan aman.



- Konduktor penangkal petir disambung dengan kabel biasa yang dibungkus dengan isolasi. Kabel terlalu kecil untuk menahan arus petir

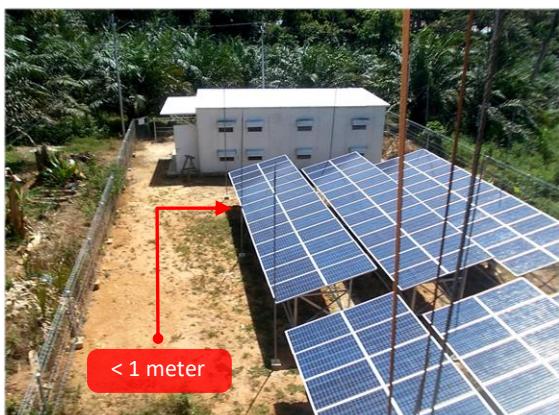


Konduktor penangkal petir menghubungkan batang penangkal petir dan elektroda pembumian, sehingga konduktor ini harus memiliki luas penampang setidaknya sebesar 35 mm^2 , untuk bahan tembaga, agar dapat mengatasi kenaikan temperatur yang diakibatkan aliran arus penangkal petir.

Jarak pemisah (*separation distance*) antara tiang penangkal petir, termasuk konduktor penangkal petir dan bagian konduktif lainnya di area pembangkit seperti bingkai modul fotovoltaik dan rumah pembangkit, harus dijaga untuk menghindari induksi tegangan dan busur listrik. Tegangan surja dapat terjadi karena adanya medan elektromagnetik yang besar akibat aliran arus pada tiang penangkal petir. Jarak pemisah adalah isolasi kelistrikan antara sistem terminasi udara, termasuk konduktor penangkal petir dan bagian konduktif lainnya.



- Jarak pemisah antara konduktor penangkal petir dan bingkai modul fotovoltaik yang jauh dan aman.

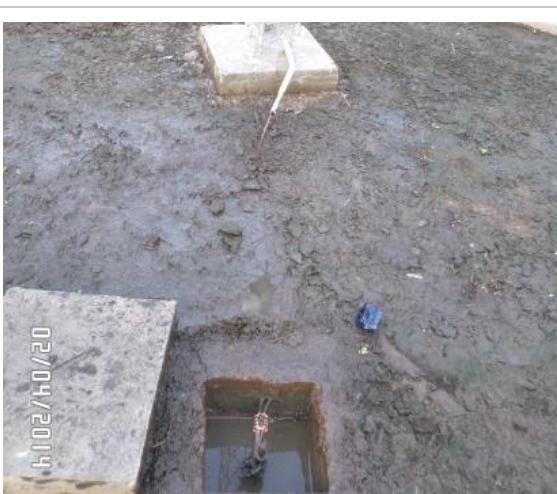


- Batang penangkal petir dipasang terlalu dekat dengan rangkaian modul fotovoltaik.

⦿ Bagaimana cara untuk memperbaiki instalasi?

- Tambah jarak pemisah antara batang penangkal petir dan rangkaian fotovoltaik untuk menghindari busur listrik atau induksi tegangan dengan memindahkan lokasi batang penangkal petir yang lebih jauh.
- Jarak minimum sesungguhnya yang dibutuhkan pada pemisah jarak harus dihitung berdasarkan IEC 62305-3, yaitu dengan mempertimbangkan kelas LPS, bahan insulasi, pergerakan arus melalui terminal udara, dan konduktor penangkal petir, serta ketinggian antar titik dimana jarak pemisah diukur ke tanah. Direkomendasikan jarak pemisah tidak lebih dekat dari 1 meter ($s \geq 1$ meter).

■■■ Pembumian penangkal petir



- Elektroda pembumian dari penangkal petir dikubur didalam tanah dan dipasang di dalam sebuah kotak pembumian.



- Elektroda pembumian seharusnya tidak ditanam di beton karena temperatur elektroda akan meningkat dan berakibat rusaknya beron.

⌚ Apa yang harus dipertimbangkan dari pembumian penangkal petir?

- Pembumian penangkal petir harus memiliki jalur dengan impedansi rendah agar dapat menyalurkan arus petir ke tanah secara efektif dan menghindari kerusakan mekanis, panas, atau percikan.
- Sambungan pembumian harus sependek mungkin dan dipasang dekat dengan kabel power untuk menghindari *loop* yang dapat menginduksi tegangan.
- Pembumian penangkal petir harus memiliki hambatan yang kecil antara elektroda pembumian dan tanah. Pastikan bahwa hambatan pembumian tidak lebih besar dari 5Ω . Direkomendasikan untuk menggunakan dua elektroda pembumian secara paralel untuk pembumian penangkal petir.



⌚ Bagaimana cara untuk memperbaiki instalasi?



- Pasang ulang elektroda pembumian dari beton ke tanah dan pasang di dalam kotak pembumian.
- Sambungkan konduktor penangkal petir ke elektroda pembumian melalui batang ikatan ekipotensial. Ikatan ekipotensial penangkal petir dan sistem ikatan ekipotensial utama harus tersambung dengan konduktor yang tidak lebih kecil dari 16 mm^2 untuk bahan tembaga.
- Periksa secara berkala sambungan antara kabel penangkal petir dan batang ikatan ekipotensial, maupun sambungan dengan elektroda dan batang pembumian.

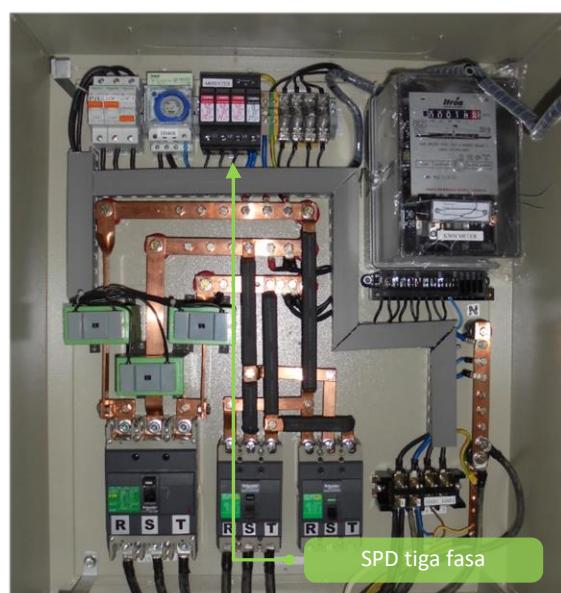
▣ Perangkat proteksi surja

Perangkat proteksi surja atau *Surge Protection Device* (SPD) digunakan untuk melindungi perangkat dari sambaran petir langsung, tidak langsung atau sambaran terdekat pada struktur yang dibumikan, juga dari sambaran petir antar dan dalam awan yang dapat menghasilkan medan elektromagnetik. Medan elektromagnetik ini yang menginduksi arus sesaat kedalam *loop* kabel. SPD bekerja dengan mengalihkan lonjakan arus karena sambaran petir ke tanah. Pada fase ini, impedansi dari saklar semikonduktor pada SPD menjadi kecil dan dengan aman mengalirkan arus ke pembumian. Oleh

karena itu, pembumian pada SPD sangat dibutuhkan. Proteksi surja idealnya dipasang di tempat awal masuknya kabel di rumah pembangkit untuk melindungi komponen elektronika daya dari tegangan surja.

⦿ **Apa tujuan pemasangan perangkat proteksi surja?**

- Mengurangi resiko sengatan sesaat dengan menyediakan ikatan ekipotensial ke sistem pembumian utama.
- Meredakan lonjakan di sistem yang diakibatkan sambaran petir langsung maupun tidak langsung. Sambaran listrik langsung pada jaringan distribusi, konduktor penangkal petir, atau komponen lainnya, dapat memengaruhi instalasi sampai radius 10 km. Disisi lain, induksi pada elemen konduktif di instalasi PLTS, seperti pada kabel daya, mengakibatkan efek tidak langsung yang berdampak dalam jarak 1 km.
- Melindungi peralatan kelistrikan dan komponen elektronika daya yang sensitif, serta melindungi modul fotovoltaik. Semikonduktur fotovoltaik yang sensitif harus dilindungi dari pelepasan muatan listrik statis dan lonjakan tegangan.



- Perangkat pelindung surja tiga fasa dipasang di dalam panel untuk melindungi instalasi dari tegangan surja.



- Instalasi tidak dilengkapi dengan SPD.
- Perangkat elektronik beresiko terkena dampak dari lonjakan tegangan.



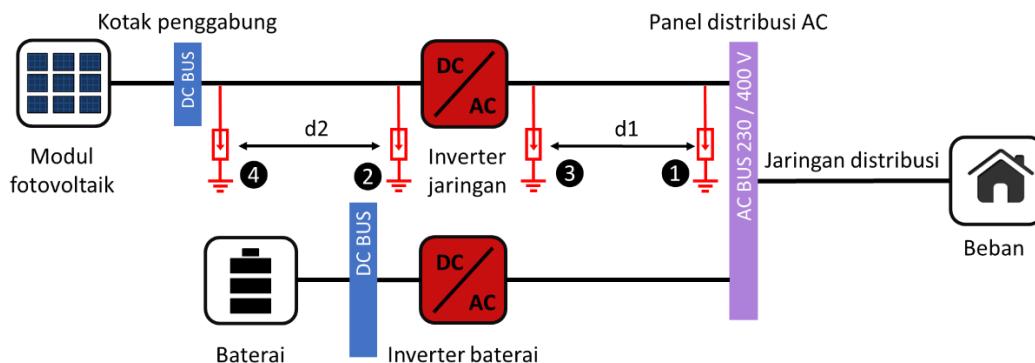
Jangan pernah membiarkan perangkat kelistrikan tidak terlindungi. Induksi tegangan atau tegangan *transient* yang diakibatkan oleh sambaran petir dapat memasuki instalasi sehingga merusak perangkat elektronik atau insulasi kabel dan terminal.

⌚ Apa yang harus dipertimbangkan saat memasang SPD?

- Selalu gunakan SPD DC pada sistem DC dan SPD AC untuk sistem AC karena saklar tiap tipe SPD memiliki mekanisme kerja yang berbeda dalam mematikan busur listrik.
- Perangkat proteksi surja harus dipilih dengan tepat sesuai dengan besar arus impuls, tingkat proteksi tegangan, dan tegangan sistem. Pastikan bahwa tegangan operasi maksimum kontinyu dari SPD DC lebih besar 1.2 kali dibanding tegangan rangkaian terbuka dari lari modul fotovoltaik yang tersambung ($1.2 \times U_{oc}$).
- SPD tidak hanya dipasang untuk melindungi sistem distribusi daya, tetapi juga jaringan komunikasi jika kabel datang dari luar rumah pembangkit. SPD tambahan mungkin butuh dipasang pada jaringan komunikasi.
- SPD harus menunjukkan indikator status yang berwarna hijau atau indicator lainnya yang menandakan masih berfungsi. Ganti perangkat saat indikator menunjukkan bahwa masa hidup dari perangkat telah berakhir, biasanya berwarna merah.



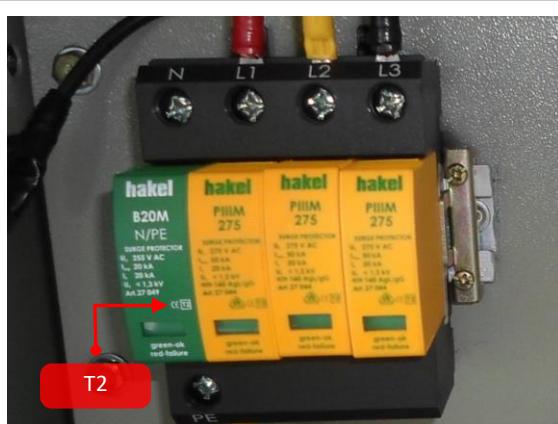
Dimana dan tipe SPD apa yang seharusnya dipasang?



- Pasang **SPD AC tipe 1** dekat dengan kabel yang akan keluar dari panel distribusi AC jika jarak antara inverter dan panel distribusi AC tidak lebih besar dari 10 meter ($d1 < 10m$).
- Pasang **SPD AC tipe 2** dekat dengan inverter jaringan (atau *solar charge controller* untuk sambungan DC) jika jarak antara kotak penggabung dan komponen elektronika daya lebih kecil dari 10 meter ($d2 < 10m$). Pasang **SPD DC tipe 1** jika jarak antara kotak penggabung dan komponen elektronika daya lebih besar dari 10 meter ($d2 > 10m$).
- Pasang **SPD AC tipe 2** tambahan dekat dengan inverter, jika jarak antara inverter jaringan dan panel distribusi AC lebih besar dari 10 meter ($d1 > 10 m$).
- Pasang **SPD tipe 2** tambahan dekat dengan kotak penggabung, jika jarak antara kotak penggabung dan komponen elektronika daya lebih besar dari 10 meter ($d2 > 10 m$).



- SPD yang terbakar mungkin karena ketidak mampuan perangkat untuk menyalurkan arus petir.



- SPD tipe 2 tidak cukup untuk melindungi perangkat kelistrikan dari sambaran petir langsung.



SPD AC tipe 1 harus dipasang pada panel distribusi AC jika penangkal petir eksternal dipasang (tanpa memperhatikan jarak pemisah). SPD tipe 1 dapat mengalirkan arus petir parsial dengan arus impuls 10/350 μ s.



- Kabel fasa, netral, dan pembumian disambungkan dengan baik ke perangkat proteksi surja.



- SPD yang tidak disambungkan ke pembumian tidak akan berfungsi untuk mengalihkan surja.

⇒ Bagaimana cara untuk meningkatkan instalasi diatas?

- Sambungkan kabel pembumian ke SPD. Minimal konduktor tembaga sebesar 6 mm^2 harus digunakan untuk SPD tipe 2 dan 16 mm^2 untuk tipe 1.
- Perangkat pelindung hubungan arus pendek seperti MCB atau sekering harus dipasang sebelum perangkat proteksi surja, untuk menghindari gangguan pada instalasi yang diakibatkan oleh arus hubung pendek didalam SPD.

■■■ Penghitung sambaran petir

Penghitung sambaran petir dipasang untuk mengukur densitas dan jumlah sambaran petir di lokasi PLTS *off-grid*. Data dari perangkat ini digunakan sebagai dasar pengambilan tindakan pencegahan tambahan untuk menghindari kerusakan yang diakibatkan oleh sambaran petir langsung atau tidak langsung, seperti penggantian sistem terminasi udara atau pada perangkat proteksi surja.



- Penghitung sambaran petir dengan daya bersumber dari baterai beroperasi dan terlindung dari lingkungan luar didalam sebuah kotak.



- Penghitung sambaran petir tidak terlindung dari paparan sinar matahari langsung dan air.



- Sensor induktif dari impuls penghitung sambaran petir dipasang di konduktor penangkal petir.



- Impuls penghitung sambaran petir dipasang di lokasi yang tidak benar. *Loop induktif* ini seharusnya dipasang di konduktor penangkal petir.



- Penggunaan impuls penghitung sambaran petir dengan suplai tenaga AC. Perangkat tidak dapat beroperasi jika PLTS tidak beroperasi.



- Impuls penghitung sambaran petir tidak disambungkan ke jaringan dan tidak ada *loop* induktif yang dipasang.

Energising Development (EnDev) Indonesia

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Energising Development (EnDev) Indonesia
Gedung De RITZ, Lantai 3
Jl. HOS. Cokroaminoto No. 91
Menteng, Jakarta Pusat 10310
Indonesia
Tel: +62 21 391 5885
Fax: +62 21 391 5859
Website: www.endev-indonesia.info

