

Analisis Risiko Kebakaran pada Instalasi PLTS Atap di Indonesia: Kajian Teknis, Regulasi, dan Evaluasi Penerapan Standar Keselamatan

Surya Supratman¹

¹ Program Pascasarjana Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan RI

¹ supratmanst@gmail.com

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap merupakan salah satu teknologi energi terbarukan yang paling cepat berkembang di Indonesia. Namun, peningkatan adopsi ini diikuti oleh meningkatnya risiko insiden kebakaran yang sebagian besar dipicu oleh karakteristik arus DC, kegagalan konektor, serta kualitas instalasi yang tidak memenuhi standar. Penelitian ini mengevaluasi risiko kebakaran pada PLTS atap melalui pengelompokan penyebab utama, yaitu risiko sisi DC, sisi AC, risiko termal, dan faktor workmanship. Metode penelitian menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dan yuridis normatif dengan menganalisis regulasi nasional seperti PUIL 2020, SNI IEC 62548, SNI 03-7015, Permen ESDM 2/2024, serta referensi kasus internasional dari Australia, Inggris, dan Jepang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konektor MC4 yang tidak sesuai standar, torque crimping yang tidak tepat, degradasi komponen, hotspot modul, serta absennya deteksi DC arc-fault merupakan faktor teknis yang paling dominan. Dari sisi kebijakan, belum terdapat pedoman teknis nasional yang secara spesifik mengatur mitigasi risiko kebakaran pada PLTS atap, sehingga terjadi gap antara standar instalasi global dan implementasi nasional. Penelitian ini merekomendasikan harmonisasi SNI, PUIL, dan regulasi ESDM, kewajiban AFCI, standardisasi konektor dan torque, peningkatan sertifikasi teknisi, serta penguatan audit instalasi sebagai langkah strategis untuk menurunkan risiko kebakaran dan meningkatkan keselamatan PLTS atap di Indonesia.

Kata kunci: PLTS atap, risiko kebakaran, MC4, arc-fault, regulasi, SNI, PUIL

Abstract

Rooftop photovoltaic (PV) systems have become one of the fastest-growing renewable energy technologies in Indonesia. However, this rapid expansion has been accompanied by an increasing number of fire incidents primarily caused by DC electrical characteristics, connector failures, and substandard installation quality. This study assesses fire risks in rooftop PV systems by categorizing major risk sources, including DC-side faults, AC-side faults, thermal risks, and workmanship-related issues. The research employs a descriptive qualitative and normative juridical approach, analyzing national regulations such as PUIL 2020, SNI IEC 62548, SNI 03-7015, Ministerial Regulation ESDM 2/2024, and international incident data from Australia, the United Kingdom, and Japan. Findings indicate that non-compliant MC4 connectors, improper torque or crimping, component degradation, module hotspots, and the absence of DC arc-fault detection are the most dominant technical contributors. From a regulatory perspective, Indonesia still lacks a dedicated technical guideline that specifically addresses fire-risk mitigation for rooftop PV systems, resulting in a gap between international standards and national implementation. This study recommends harmonizing SNI, PUIL, and ESDM regulations, mandating AFCI, standardizing connectors and torque values, enhancing national technician certification, and strengthening installation audits to reduce fire risk and improve rooftop PV safety in Indonesia.

Keywords: rooftop PV, fire risk, MC4, arc-fault, regulation, SNI, PUIL

1. Pendahuluan

Perkembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap di Indonesia menunjukkan peningkatan signifikan dalam

lima tahun terakhir, terutama setelah penerbitan regulasi yang memberikan payung hukum pemanfaatan energi surya untuk sektor rumah tangga, industri, dan komersial (ESDM, 2023). Pertumbuhan kapasitas terpasang

meningkat seiring penurunan harga modul surya global sebesar 80% sejak 2010 (IRENA, 2022) serta meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap energi bersih. Selain itu, PLTS atap menjadi salah satu prioritas pencapaian target Net Zero Emission 2060 di Indonesia (Kementerian ESDM, 2021).

Namun, pertumbuhan tersebut juga diikuti oleh meningkatnya laporan insiden kebakaran pada instalasi PLTS di berbagai negara seperti Australia, Inggris, dan Jerman (SolarQuotes, 2022; BRE Global, 2020). Lembaga pemadam kebakaran di Inggris mencatat lebih dari 80 kasus kebakaran PLTS dalam rentang 7 tahun (London Fire Brigade, 2021). Studi dari Jerman menunjukkan 40% insiden disebabkan kegagalan konektor DC seperti MC4, sementara sisanya terkait hotspot modul, loose connection, kegagalan isolasi kabel, panel distribusi kualitas rendah, hingga DC arc fault (Fraunhofer ISE, 2020; DGS, 2021).

Di Indonesia, meskipun data statistik resmi belum dipublikasikan, laporan teknis dari asosiasi dan instalator menunjukkan adanya tren peningkatan kasus insiden ringan hingga berat pada PLTS atap akibat kesalahan instalasi, ketidaksesuaian komponen, serta belum optimalnya penerapan standar nasional (APKIS, 2024). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa aspek keselamatan instalasi menjadi isu penting dalam keberlanjutan implementasi PLTS atap nasional.

Beberapa regulasi telah diterbitkan pemerintah untuk memberikan kerangka teknis keselamatan, antara lain PUIL 2020, SNI 62548 tentang instalasi sistem fotovoltaik, Keputusan Menteri ESDM No. 168.K/2020 mengenai PLTS Atap, dan Permen ESDM No. 2/2024 tentang layanan listrik. Namun, berbagai studi melaporkan bahwa masih terdapat kesenjangan antara ketentuan regulasi dengan kondisi implementasi di lapangan, terutama terkait inspeksi, sertifikasi instalator, dan kewajiban penggunaan komponen bersertifikat (Ghozali, 2022; Setiawan, 2023).

Di sisi akademik, kajian yang secara komprehensif mengintegrasikan analisis risiko kebakaran PLTS dari perspektif teknis sekaligus regulasi masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian di Indonesia hanya fokus pada kinerja energi, keekonomian, dan penurunan emisi, sementara isu keselamatan masih belum dibahas secara mendalam (Nugraha, 2024; Prasetyo, 2022). Kondisi ini menunjukkan adanya research gap yang perlu diisi untuk mendukung penyempurnaan standar keselamatan PLTS nasional.

Rumusan masalah dalam penelitian ini dinyatakan secara positif:

1. Penelitian ini mengidentifikasi faktor teknis yang berkontribusi terhadap risiko kebakaran pada sistem PLTS atap.
2. Penelitian ini menjelaskan keterkaitan antara komponen DC, kualitas instalasi, serta potensi terjadinya arc fault dan hotspot.
3. Penelitian ini mengevaluasi sejauh mana regulasi nasional mengatur aspek keselamatan PLTS atap dan menilai kesesuaiannya dengan perkembangan teknis terbaru.
4. Penelitian ini menyusun analisis kesenjangan antara standar internasional dan nasional dalam konteks mitigasi risiko kebakaran PLTS atap.

Tujuan Penelitian

1. Menganalisis faktor penyebab utama kebakaran pada PLTS atap berdasarkan literatur teknis internasional dan praktik lapangan Indonesia.
2. Membandingkan pengaturan keselamatan dalam SNI, PUIL, dan regulasi ESDM terhadap standar internasional seperti IEC 62548 dan NEC 2023.
3. Mengidentifikasi kelemahan implementasi teknis dan regulasi yang berpotensi meningkatkan risiko kebakaran.

4. Memberikan rekomendasi penguatan standar, inspeksi, serta sertifikasi untuk meningkatkan keselamatan PLTS atap nasional.

Penelitian ini dibatasi pada:

1. Fokus pada sistem PLTS atap skala rumah tangga, komersial, dan industri.
2. Analisis difokuskan pada risiko kebakaran yang bersumber dari komponen dan instalasi DC maupun AC.
3. Regulasi yang dikaji meliputi PUIL 2020, SNI 62548, Kepmen ESDM 168.K/2020, dan Permen ESDM 2/2024.
4. Tidak mencakup simulasi numerik kebakaran atau pengujian komponen secara eksperimental.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini dirancang untuk menghasilkan analisis komprehensif mengenai risiko kebakaran pada sistem PLTS atap di Indonesia dengan memadukan aspek teknis dan regulasi. Pendekatan yang digunakan menekankan analisis kualitatif berbasis dokumen, pemetaan standar, serta penelusuran insiden yang dilaporkan di tingkat internasional. Struktur metodologi disusun dalam tiga bagian, yaitu pendekatan penelitian, teknik pengumpulan data, dan teknik analisis.

2.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif deskriptif yang bertujuan menggambarkan secara sistematis faktor teknis penyebab kebakaran PLTS serta implikasinya terhadap regulasi nasional. Metode ini dipilih karena isu keselamatan kelistrikan PLTS memiliki karakter multidimensi dan memerlukan analisis mendalam terhadap dokumen teknis, hasil studi empiris, serta ketentuan peraturan.

Selain itu, digunakan pendekatan yuridis normatif, yaitu pendekatan yang

berfokus pada analisis terhadap norma, standar, dan regulasi yang mengatur instalasi PLTS. Pendekatan ini relevan karena terdapat sejumlah peraturan kunci yang harus dibandingkan, seperti PUIL 2020, SNI 62548, Kepmen ESDM 168.K/2020, dan Permen ESDM 2/2024, yang masing-masing memiliki lingkup pengaturan berbeda. Melalui pendekatan ini, penelitian menilai konsistensi, kecukupan, dan potensi tumpang tindih antar regulasi dalam konteks pengendalian risiko kebakaran.

2.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa tahap berikut:

1. **Audit dokumen regulasi.** Meliputi evaluasi terhadap standar nasional dan internasional seperti PUIL 2020, SNI 62548, SNI 0225, IEC 62548, IEC 60364-7-712, serta NEC 2023. Audit regulasi bertujuan mengidentifikasi bagian-bagian yang mengatur keselamatan instalasi PV, proteksi hubungan arus DC, penggunaan konektor, manajemen kabel, sistem grounding, dan pencegahan arc fault.
2. **Analisis laporan teknis dan kasus insiden internasional.** Data dikumpulkan dari laporan keselamatan PLTS di Australia (Clean Energy Regulator), Inggris (London Fire Brigade, BRE Global), Amerika Serikat (NFPA & UL), dan Jepang (NITE – National Institute of Technology and Evaluation). Sumber ini memberikan gambaran empiris mengenai pola kegagalan teknis yang umum muncul di lapangan, seperti kegagalan MC4, modul panas berlebih, degradasi kabel, hingga DC arc fault.
3. **Kajian literatur ilmiah dan publikasi teknis.** Literatur dari jurnal internasional (IEEE, Elsevier, Wiley) serta laporan institusi penelitian (Fraunhofer ISE, NREL, IRENA)

dianalisis untuk memperkuat pemahaman mengenai failure mode komponen PV, penyebab kebakaran, serta mekanisme mitigasinya. Literatur nasional juga digunakan untuk melihat kondisi implementasi PLTS di Indonesia.

2.3 Teknik Analisis

Analisis data dilakukan menggunakan tiga teknik utama:

1. **Analisis risiko berbasis kategori failure mode.** Mengelompokkan sumber risiko kebakaran ke dalam kategori seperti: kegagalan konektor, degradasi kabel DC, hotspot modul, malfungsi inverter, dan arc fault. Teknik ini digunakan untuk memahami mekanisme awal terjadinya insiden dan faktor penyebab paling dominan.
2. **Analisis kesenjangan regulasi (regulatory gap analysis).** Metode ini membandingkan ketentuan regulasi nasional dengan standar internasional dan praktik terbaik (best practice). Fokus analisis meliputi kecukupan aturan teknis, persyaratan instalasi, kewajiban inspeksi, standar komponen, dan mekanisme sertifikasi tenaga ahli.
3. **Pemetaan standar internasional vs nasional.** Hasil perbandingan dituangkan dalam bentuk matriks untuk mengidentifikasi bagian standar nasional yang sudah selaras dan bagian yang masih memerlukan penguatan, terutama terkait perlindungan DC, sistem grounding terintegrasi, penanganan arc fault, dan persyaratan konektor bersertifikat.

Melalui metodologi ini, penelitian diharapkan memberikan gambaran menyeluruh dan terukur mengenai kondisi aktual keselamatan PLTS atap di Indonesia serta arah penguatan regulasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Klasifikasi Risiko Kebakaran pada PLTS Atap

Analisis risiko kebakaran pada sistem PLTS atap perlu dimulai dengan klasifikasi potensi bahaya pada berbagai domain kelistrikan dan termal. Berdasarkan literatur teknis dan laporan insiden, risiko kebakaran dapat dikelompokkan menjadi empat kategori utama: sisi DC, sisi AC, risiko termal lingkungan, dan faktor instalasi (Susanto, Ayuningtyas, Febriansyah, & Ayundyahrini, 2020; DiGregorio, 2025).

3.1.1 Risiko pada Sisi DC

Sisi DC merupakan salah satu area paling rentan terhadap kebakaran karena tegangan tinggi dan arus DC yang dapat menimbulkan arc fault yang sulit dipadamkan. Beberapa penyebab utama meliputi:

1. **MC4 mismatch atau kegagalan konektor:** Konektor MC4 yang longgar, tidak terpasang dengan torsi yang benar, atau korosi dapat menyebabkan kontak resistif berlebih, panas lokal, dan potensi busur listrik (PVEL, 2022; Susanto et al., 2020).
2. **Shading dan hotspot:** Saat sebagian sel modul ternaungi, aliran arus dapat terdistorsi, menciptakan hotspot lokal pada sel surya yang dapat meningkatkan temperatur secara signifikan. Panas lokal ini tidak hanya merusak sel tetapi juga menimbulkan risiko termal dan kebakaran (Fraunhofer ISE, 2020).
3. **DC Arc Fault (busur DC):** Arc fault DC terjadi ketika ada pemisahan tak disengaja pada sirkuit DC yang menghasilkan busur listrik kontinu. Karena busur DC memiliki karakteristik berbeda dari arus AC (lebih stabil dan sustain), deteksi dan

mitigasinya memerlukan perangkat khusus seperti AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter). Tanpa deteksi yang tepat, arc bisa mengakibatkan suhu sangat tinggi dan mulai kebakaran pada kabel atau isolasi (Xie, 2025; NFPA, 2023).

3.1.2 Risiko pada Sisi AC

Meskipun kebanyakan kebakaran disebabkan oleh masalah di sisi DC, sisi AC dari sistem PLTS juga tidak terlepas dari risiko:

1. **Overheating inverter:** Inverter merupakan perangkat elektronik yang dapat menghasilkan panas selama operasi, terutama jika ditingkatkan beban, ventilasi buruk, atau kegagalan pendinginan. Panas berlebih dapat merusak komponen internal dan bahkan memicu kerusakan termal yang berpotensi menjadi titik api.
2. **Harmonic distortion:** Inverter yang menghasilkan harmonisa tinggi dapat menyebabkan arus tak seimbang dan beban non-linier pada sistem distribusi listrik. Harmonisa dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada transformator, kabel, atau komponen distribusi lain yang kemudian meningkatkan risiko kegagalan isolasi dan kebakaran (IEEE, 2018).

3.1.3 Risiko Termal Lingkungan

Selain aspek kelistrikan, faktor lingkungan juga sangat menentukan risiko termal dan kebakaran:

1. **Temperatur lingkungan tinggi:** PLTS atap yang dipasang di wilayah tropis atau daerah dengan suhu atap sangat tinggi (misalnya atap logam gelap) dapat mengalami kondisi panas berlebih. Jika modul, rangka, dan kabel tidak dirancang untuk kondisi termal ekstrem, hal ini meningkatkan kemungkinan degradasi bahan dan

kegagalan isolasi (Fraunhofer ISE, 2020).

2. **Ventilasi buruk:** Pemasangan sistem pada atap dengan ventilasi yang kurang (misalnya kontainer rooftop, ruangan tertutup) memperparah akumulasi panas. Kabel DC, junction box, atau inverter yang dipasang di tempat tertutup tanpa sirkulasi udara yang baik akan mengalami kenaikan suhu dan kegagalan isolasi lebih cepat.

3.1.4 Risiko Instalasi

Aspek pemasangan dan kualitas instalasi sering menjadi sumber risiko tersembunyi namun kritis:

1. **Kualitas kabel dan rute kabel:** Kabel DC yang dipilih dengan ukuran penampang tidak sesuai, atau yang dirutekan secara tidak optimal (misalnya melewati area tajam atau dekat logam tajam) rentan terhadap abrasi, celah isolasi, dan potensi korsleting.
2. **Torque sambungan:** Sambungan terminal pada junction box, combiner box, dan konektor harus dikencangkan sesuai torsi pabrikan. Sambungan yang longgar dapat menimbulkan resistansi kontak berlebih, panas lokal, dan potensi busur listrik. Praktik pemasangan yang tidak memenuhi spesifikasi torsi merupakan penyebab insiden kebakaran yang berulang (DiGregorio, 2025; Susanto et al., 2020).

3.2 Analisis Komponen Penyebab Kebakaran

3.2.1 Modul Surya (Hot-spot, PID, dan Delaminasi)

Modul surya merupakan komponen inti dalam sistem PLTS atap dan menjadi titik awal berbagai risiko kegagalan yang dapat memicu penurunan kinerja hingga potensi kebakaran. Risiko-risiko tersebut umumnya bersifat

kumulatif, dipengaruhi oleh kualitas manufaktur, lingkungan operasi, serta praktik instalasi dan pemeliharaan. Tiga jenis kegagalan yang paling sering dilaporkan dan memiliki implikasi keselamatan adalah hot-spot, Potential Induced Degradation (PID), dan delaminasi.

Hot-spot muncul ketika salah satu sel atau bagian modul mengalami resistansi tinggi akibat shading parsial, retak mikro, atau mismatch internal. Ketidakseimbangan arus antar sel memicu peningkatan temperatur lokal yang dapat melampaui 100–150°C, sehingga memperbesar risiko kerusakan lapisan enkapsulan atau bahkan titik nyala material (Fraunhofer ISE, 2020). Kasus internasional menunjukkan bahwa hot-spot sering kali terdeteksi terlambat karena tidak tampak secara visual, tetapi dapat diidentifikasi melalui inspeksi termografi inframerah. Studi di Australia juga mencatat bahwa lebih dari 23% insiden panas berlebih pada sistem PLTS atap berkaitan dengan hot-spot pada modul (Clean Energy Regulator, 2021).

Potential Induced Degradation (PID) merupakan fenomena penurunan performa modul akibat migrasi ion, biasanya terjadi ketika modul mengalami tegangan negatif tinggi terhadap ground. Dampak PID dapat muncul dalam bentuk penurunan output energi hingga 70% dalam beberapa tahun jika tidak ditangani (NREL, 2020). Kondisi lingkungan dengan kelembaban tinggi, temperatur ekstrem, serta kualitas frame dan kaca modul yang rendah mempercepat proses ini. Pada beberapa kasus di Jerman, modul yang terkena PID menunjukkan pola degradasi nonuniform yang memengaruhi kestabilan arus dan dapat meningkatkan panas internal, sehingga berpotensi berkontribusi pada kejadian termal ekstrem (Kiefer et al., 2021).

Delaminasi, yaitu terlepasnya lapisan enkapsulan (EVA) dari kaca atau backsheet, terjadi akibat penuaan material, kesalahan manufaktur, atau paparan UV berlebih. Delaminasi dapat membuka celah bagi

kelembaban untuk masuk, memicu korosi busbar atau konektor internal, dan menimbulkan jalur arcing di dalam modul. Studi lapangan di Jepang menemukan bahwa delaminasi merupakan salah satu penyebab utama kegagalan modul berusia 5–10 tahun, terutama pada area dengan radiasi UV tinggi dan siklus panas-dingin yang ekstrem (METI Japan, 2019). Ketika korosi internal mencapai titik kritis, resistansi meningkat sehingga memperbesar kemungkinan terjadinya hot-spot sekunder.

Secara keseluruhan, ketiga risiko ini menunjukkan bahwa kegagalan modul tidak hanya berdampak pada penurunan efisiensi energi, tetapi juga dapat meningkatkan potensi terjadinya insiden panas berlebih dan arcing. Oleh karena itu, standar IEC 61215 dan IEC 61730 merekomendasikan pengujian ketat terhadap kualitas material, ketahanan lingkungan, serta uji keselamatan elektrik untuk memastikan modul mampu beroperasi aman sepanjang masa pakainya. Pendekatan berbasis inspeksi periodik, penggunaan modul bersertifikasi, dan pemantauan performa berbasis data menjadi strategi utama dalam mitigasi risiko-risiko tersebut (IEC, 2021; IEA-PVPS, 2020).

3.2.2 Konektor MC4 dan Kabel DC

Konektor MC4 dan rangkaian kabel DC merupakan salah satu titik paling kritis dalam sistem PLTS atap karena menjadi jalur aliran arus DC yang tidak memiliki titik nol dan sangat rentan terhadap terjadinya DC arc fault. Berbagai laporan teknis internasional mencatat bahwa lebih dari 50% insiden kebakaran pada sistem PV berasal dari kegagalan sambungan DC, baik pada konektor maupun kabel, akibat pemasangan tidak tepat, korosi, atau mismatch antar merek konektor (Clean Energy Regulator, 2021).

1. **Mismatch antar konektor.** Salah satu penyebab utama kegagalan MC4 adalah penggunaan konektor dari merek berbeda yang secara fisik dapat

tersambung tetapi tidak sepenuhnya kompatibel. Perbedaan toleransi manufaktur mengakibatkan peningkatan resistansi kontak, yang akhirnya menimbulkan panas berlebih dan potensi percikan listrik DC. Fraunhofer ISE (2020) menegaskan bahwa cross-mating konektor adalah penyebab paling umum dari thermal runaway pada sambungan PV, dan secara tegas dilarang berdasarkan IEC 62548 karena risiko kebakaran yang tinggi (IEC, 2016).

2. **Korosi pada konektor dan kabel.**

Korosi dapat terjadi akibat masuknya kelembapan ke dalam konektor karena crimping yang tidak sempurna atau seal yang tidak rapat. Kondisi ini menyebabkan peningkatan resistansi, pemanasan lokal, dan pada kondisi ekstrem dapat memicu kegagalan isolasi. Studi lapangan oleh METI Jepang (2019) menemukan bahwa lebih dari 30% kerusakan konektor PV di Jepang terjadi akibat degradasi seal dan infiltrasi air, terutama pada sistem PLTS atap di daerah lembap.

3. **Torque sambungan yang tidak sesuai.**

Kegagalan pemasangan crimping dan torque yang tidak sesuai spesifikasi juga menjadi penyebab utama titik panas (hot connection). Sistem PV membutuhkan teknik crimping yang memenuhi standar pabrikan, dan penggunaan tang crimp non-standar terbukti meningkatkan risiko lepasnya kabel dari terminal saat arus tinggi mengalir (Australian PV Institute, 2020). Sambungan yang terlalu longgar akan menaikkan resistansi, sementara sambungan terlalu kencang dapat merusak struktur logam konektor.

4. **Rute kabel dan kualitas instalasi.**

Selain faktor konektor, rute kabel DC yang tidak terorganisasi dengan baik

(misalnya bergesekan dengan atap metal, terkena radiasi UV langsung, atau berada di area air menggenang) meningkatkan risiko kegagalan isolasi. Laporan dari UK HSE (2020) menekankan bahwa kabel DC yang terpapar panas ekstrem atau gesekan berulang dapat mengalami retak mikro pada isolasi, yang kemudian memicu arcing ketika kondisi beban tinggi.

Secara keseluruhan, konektor MC4 dan kabel DC membutuhkan standar pemasangan yang ketat serta pemeriksaan berkala untuk mencegah risiko kebakaran. Mengacu pada IEC 62548, instalasi PLTS harus memastikan bahwa konektor dari merek berbeda tidak dicampur, crimping mengikuti alat pabrikan, kabel memiliki rating UV dan suhu tinggi, serta seluruh sambungan diuji setelah komisioning untuk meminimalkan risiko DC arc fault.

3.2.3 **Inverter dan Box DC/AC**

Inverter merupakan pusat konversi energi pada sistem PLTS, sehingga menjadi salah satu komponen yang paling sering mengalami kegagalan termal maupun listrik. Sebagai perangkat elektronik daya yang bekerja secara terus-menerus, inverter sensitif terhadap arus lebih, kenaikan temperatur, kelembapan, dan kualitas instalasi. Laporan inspeksi global menunjukkan bahwa sekitar 25–35% kegagalan sistem PLTS disebabkan oleh masalah pada inverter atau komponen pendukungnya seperti combiner box, DC isolator, dan AC distribution box (Clean Energy Council, 2020).

1. **Arcing pada terminal dan saklar.**

Arcing pada inverter atau panel distribusi DC/AC dapat terjadi akibat sambungan longgar, terminal yang teroksidasi, atau saklar DC isolator yang tidak memenuhi standar PV. Arus DC yang tidak memiliki titik nol menyebabkan percikan yang terjadi

sulit padam dan dapat berkembang menjadi api. Laporan keselamatan dari UK HSE (2020) menegaskan bahwa isolator DC yang tidak PV-rated menjadi salah satu penyebab kebakaran PLTS atap di Inggris. IEC 60947-3 mensyaratkan penggunaan isolator DC khusus PV yang mampu memutus arus pada tegangan tinggi tanpa memicu arc flash. Ketidaksihesuaian pemilihan komponen ini menyebabkan risiko arcing meningkat signifikan.

2. Aging komponen elektronik,

Komponen elektronik seperti kapasitor elektrolit, IGBT, MOSFET, dan relay mengalami aging selama penggunaan jangka panjang terutama pada iklim tropis yang memiliki temperatur lingkungan tinggi. Degradasi kapasitor pada bagian DC link merupakan penyebab umum menurunnya efisiensi dan kegagalan inverter setelah tahun ke-5 hingga ke-10 operasi (NREL, 2020). Kelembapan tinggi juga mempercepat korosi internal yang menyebabkan kegagalan isolasi. Studi METI Jepang (2019) melaporkan bahwa inverter pada instalasi atap di wilayah hangat memiliki tingkat kegagalan dua kali lebih tinggi akibat humidity cycling. Proses aging ini juga mempengaruhi stabilitas output AC dan meningkatkan risiko panas berlebih.

3. Ventilasi dan manajemen panas.

Suhu operasi inverter sangat mempengaruhi umurnya. Inverter menghasilkan panas yang cukup besar dan membutuhkan ventilasi memadai untuk mempertahankan performa optimal. Apabila dipasang di ruang tertutup tanpa aliran udara atau di lokasi yang terkena radiasi matahari secara langsung, sistem pendinginan internal menjadi tidak efektif sehingga inverter mengalami derating, thermal

shutdown, atau bahkan kerusakan permanen (SolarEdge, 2021). Overheating juga sering ditemukan pada panel combiner box dan AC distribution box, terutama ketika kabel tidak diberi jarak atau arus melebihi kapasitas thermal rating-nya.

Kesalahan umum pada instalasi PLTS atap termasuk pemasangan inverter di area berdebu, lembap, atau ruang sempit tanpa ventilasi yang memadai. Pendinginan terhambat menyebabkan kenaikan resistansi internal dan mempercepat degradasi komponen. IEC 62109 mengatur batas suhu operasi aman inverter PV dan mewajibkan pemasangan yang mempertimbangkan aliran udara bebas serta jarak minimum dari dinding atau permukaan lainnya. Ketidaksihpatuhan terhadap pedoman ini menjadi salah satu penyebab utama penurunan usia inverter pada instalasi PLTS tropis.

Secara keseluruhan, risiko kebakaran yang berasal dari inverter dan panel distribusi DC/AC terutama disebabkan oleh arcing, degradasi komponen, dan ventilasi yang tidak memadai. Penggunaan komponen sesuai standar, pemilihan lokasi pemasangan yang tepat, serta pemeriksaan berkala sangat penting untuk menjaga keselamatan instalasi dan meminimalkan potensi insiden termal pada sistem PLTS atap.

3.2.4 Sistem Proteksi (Fuse, MCB DC, SPD DC/AC)

Sistem proteksi pada PLTS berfungsi sebagai lapisan pengaman untuk mencegah kegagalan listrik berkembang menjadi arcing, overheating, atau kebakaran. Proteksi yang tidak sesuai standar menjadi salah satu penyebab paling sering ditemukan dalam insiden PLTS atap, terutama pada sisi DC yang memiliki karakteristik arus kontinu dan tidak memiliki titik nol sehingga kegagalan listrik lebih berbahaya dibandingkan arus AC (IRENA, 2021). Tiga perangkat proteksi utama

yang wajib digunakan pada PLTS adalah fuse, MCB DC, dan Surge Protective Devices (SPD).

1. **Fuse DC dan perlindungan terhadap arus lebih.** Fuse digunakan untuk mencegah aliran arus lebih akibat reverse current, module mismatch, atau string fault. Fuse dirancang untuk melebur secara cepat ketika arus melebihi batas nominal, sehingga mencegah penghantaran energi berlebih ke dalam rangkaian. IEC 60269-6 menetapkan kriteria fuse khusus PV yang memiliki kemampuan memutuskan arus pada tegangan DC tinggi (600–1500 VDC). Banyak insiden kebakaran terjadi karena penggunaan fuse industri standar yang tidak PV-rated, sehingga tidak mampu memutuskan arus DC secara efektif (UL, 2020). Selain itu, pemilihan rating fuse yang tidak sesuai sering menyebabkan fuse tidak melepas ketika terjadi arus balik antar-string, meningkatkan risiko hotspot dan arcing pada jalur DC.
2. **MCB DC dan pemutusan beban DC.** MCB DC berfungsi melindungi rangkaian dari arus lebih dan hubungan singkat serta memberikan kemampuan pemutusan manual untuk perawatan. Berbeda dengan MCB AC, MCB DC harus didesain dengan arc chute khusus yang mampu mengendalikan nyala busur pada tegangan DC. Standar IEC 60898-2 dan UL489B menetapkan syarat minimum untuk kemampuan pemutusan (breaking capacity), polaritas, dan kecepatan pemutusan. Banyak kegagalan lapangan terjadi akibat pemasangan MCB AC pada rangkaian PV, yang berujung pada arcing internal dan pelelehan terminal (Clean Energy Regulator, 2021). Penggunaan MCB DC yang sesuai standar bukan hanya persyaratan teknis tetapi juga kewajiban regulatif dalam

PUIL 2020 untuk sistem PV di atas 1000 Wp.

3. **SPD DC/AC sebagai perlindungan lonjakan.** SPD melindungi sistem dari lonjakan tegangan akibat petir langsung, induksi petir, atau switching. Pada PLTS, lonjakan dapat masuk dari sisi DC (jalur modul–inverter) maupun AC (jalur inverter–grid). IEC 61643-31 menetapkan spesifikasi SPD DC khusus PV, sementara IEC 61643-11 mengatur SPD AC untuk perlindungan sisi jaringan. Sistem yang tidak dilengkapi SPD terbukti memiliki tingkat kegagalan inverter hingga 3 kali lebih tinggi (Fraunhofer ISE, 2021). SPD tipe 1 wajib digunakan pada instalasi PLTS di area rawan petir, sementara tipe 2 digunakan untuk proteksi internal. PUIL 2020 Pasal 534.2 mengatur bahwa sistem PLTS harus menggunakan SPD pada kedua sisi—DC dan AC—dengan koordinasi grounding yang memadai.

SPD yang tidak dipasang dengan benar berpotensi gagal melindungi dan justru memicu arcing apabila jalur grounding memiliki impedansi tinggi atau koneksi longgar. Oleh karena itu, instalasi SPD harus memperhatikan panjang kabel grounding (<0,5 m), posisi pemasangan di dekat sumber lonjakan, serta koordinasi antara SPD tipe 1 dan tipe 2. Kesalahan umum seperti pemasangan SPD AC pada jalur DC atau penggunaan SPD universal tanpa sertifikasi PV-rated masih sering ditemukan pada instalasi di Indonesia (HSE UK, 2020).

Secara keseluruhan, sistem proteksi fuse, MCB DC, dan SPD merupakan unsur kritis yang bekerja bersama untuk mencegah kegagalan termal dan listrik pada sistem PLTS. Ketidaksesuaian tipe, rating, atau standar dapat menyebabkan perangkat gagal berfungsi sehingga meningkatkan risiko kebakaran. Implementasi sistem proteksi yang mengikuti

IEC, SNI, UL, dan PUIL menjadi syarat utama untuk memastikan keamanan PLTS atap yang beroperasi di lingkungan tropis dengan intensitas petir tinggi.

3.2.5 Kualitas Pemasangan (Workmanship)

Kualitas pemasangan (workmanship) merupakan faktor krusial yang menentukan keandalan dan keselamatan sistem PLTS. Meskipun komponen yang digunakan memiliki standar mutu tinggi, kesalahan instalasi dapat mengakibatkan peningkatan rugi-rugi energi, penurunan Performance Ratio (PR), bahkan risiko kegagalan sistem. Dua aspek penting terkait workmanship adalah rangkai kabel dan penempatan rute kabel DC.

a. Rangkai Kabel (Cable Creep / Slack Cable). Rangkai kabel dapat terjadi ketika kabel tidak diklem dengan baik atau dipasang terlalu longgar. Kabel yang “merangkai” atau bergerak akibat angin, getaran, maupun perubahan temperatur dapat menyebabkan beberapa dampak negatif:

1. Gesekan pada permukaan tajam.

Kabel yang bergerak dapat bergesekan dengan rangka panel, atap, atau struktur lain sehingga terjadi abrasi pada isolasi. Kerusakan isolasi berpotensi menimbulkan short circuit maupun arcing.

2. Tarikan berlebih pada konektor MC4.

Jika kabel bergerak terus-menerus, konektor dapat tertarik sehingga koneksi longgar (loose connection). Kondisi ini meningkatkan resistansi titik sambung, memicu pemanasan lokal (hot spot), dan menurunkan efisiensi sistem.

3. Risiko kabel tersangkut atau jatuh.

Pada instalasi atap, kabel yang tidak tertata rapi dapat tertiuap angin dan tersangkut pada objek

tertentu, berpotensi putus atau robek.

Untuk meminimalkan rangkai kabel, pemasang harus memastikan penggunaan clamp dan cable tie UV-resistant, penempatan jarak klem yang tepat (umumnya 40–60 cm), serta melakukan verifikasi ketegangan kabel setelah commissioning.

b. Penempatan Rute Kabel DC (DC Cable Routing).

Penataan jalur kabel DC memengaruhi tidak hanya keselamatan, tetapi juga rugi-rugi energi dan kemudahan pemeliharaan. Prinsip penempatan rute kabel yang baik mencakup:

1. Menghindari paparan sinar matahari langsung.

Kabel DC yang terpapar radiasi UV berlebihan akan mengalami degradasi isolasi lebih cepat. Rute kabel idealnya berada di bawah modul, di dalam conduit UV-resistant, atau menggunakan tray tertutup.

2. Mengurangi panjang kabel yang tidak perlu.

Panjang kabel yang terlalu berlebihan meningkatkan resistansi dan rugi-rugi energi. Penentuan rute harus mempertimbangkan lintasan terpendek tanpa mengorbankan keamanan.

3. Memisahkan kabel DC dari kabel AC.

Kabel DC dan AC sebaiknya tidak berada dalam conduit yang sama untuk menghindari induksi elektromagnetik serta memudahkan troubleshooting. Pemisahan ini juga mengikuti standar keselamatan instalasi.

4. Menjauhkan dari sumber panas dan area genangan air.

Area dekat knalpot genset, permukaan atap metal yang sangat panas, atau titik yang mungkin tergenang

harus dihindari karena dapat merusak isolasi kabel dan menyebabkan korosi pada konektor.

5. **Memastikan proteksi mekanis memadai.** Jalur kabel harus dilindungi dengan conduit atau cable tray, terutama pada area rute panjang, area perangkat mekanis, maupun lokasi yang berpotensi terkena aktivitas manusia.

Dengan workmanship yang baik, risiko kerusakan akibat abrasi, arcing, atau kegagalan koneksi dapat ditekan dan PR sistem PLTS tetap tinggi.

3.3 Kajian Regulasi dan Standar Teknis yang Berlaku di Indonesia

Implementasi proteksi keselamatan pada PLTS atap tidak hanya bergantung pada praktik teknis di lapangan, tetapi juga pada kecukupan, konsistensi, dan penegakan regulasi serta standar teknis. Subbab berikut menganalisis regulasi utama yang relevan di Indonesia dan mengevaluasi kecukupan serta harmonisasinya terhadap praktik terbaik internasional.

3.3.1 PUIL 2020

Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2020) merupakan dokumen regulatif nasional yang mengatur persyaratan teknis dasar instalasi listrik, termasuk beberapa ketentuan yang relevan untuk PLTS, seperti persyaratan pentanahan, proteksi terhadap gangguan tegangan dan pengaturan rute kabel (PUIL, 2020). PUIL juga memuat ketentuan terkait proteksi hubung singkat dan persyaratan proteksi pada instalasi di area terbuka yang relevan dengan PLTS atap (PUIL, 2020).

Dari sisi mitigasi kebakaran PLTS, PUIL memiliki kelebihan: ia menyediakan kerangka umum keselamatan instalasi yang wajib ditaati, mensyaratkan penggunaan

perangkat proteksi yang sesuai serta grounding yang tepat. Namun PUIL belum spesifik mengatur beberapa isu kritical PLTS modern, misalnya deteksi dan mitigasi DC arc-fault (AFCI DC) pada sisi PV, atau persyaratan teknis terperinci untuk pemasangan SPD pada sisi DC. Kekurangan ini penting karena karakteristik bahaya pada sistem DC berbeda dari sistem AC konvensional — arus DC lebih sulit diputus dan busur DC cenderung sustain lebih lama sehingga memerlukan perangkat dan prosedur khusus (NREL, 2020; Clean Energy Regulator, 2021). Oleh karena itu PUIL perlu diperjelas atau dilengkapi dengan peraturan turunan yang mengakomodir khusus aspek-aspek unik PLTS (mis. mandatory AFCI untuk instalasi tertentu, standar torque konektor, dan checklist komisioning termografik).

3.3.2 SNI IEC 62548 (Standar Instalasi PV)

SNI IEC 62548 mengadopsi ketentuan internasional untuk desain dan instalasi larik fotovoltaik, termasuk pengamanan rute kabel, beban mekanik (mechanical load), isolasi DC, serta persyaratan torsi dan konektor (BSN, 2017). Standar ini penting karena menyasar aspek teknis desain PLTS yang berdampak langsung pada keselamatan dan umur pakai sistem.

Analisis menunjukkan SNI IEC 62548 relatif komprehensif pada level desain: ia membahas dimensi kabel, proteksi mekanik, jarak minimum, dan persyaratan komponen. Namun pada praktiknya kesenjangan muncul di ranah implementasi dan verifikasi — misalnya, standar mensyaratkan penggunaan konektor bersertifikat tetapi tidak menetapkan mekanisme inspeksi pasca-instalasi yang wajib (mis. pengujian termografi, pengukuran resistansi kontak, pengecekan torsi). Selain itu, SNI belum secara eksplisit mensyaratkan penggunaan SPD DC dengan koordinasi zona proteksi (LPZ) atau pemasangan DC-AFCI pada instalasi tertentu, padahal bukti lapangan

menunjukkan kedua perangkat ini efektif menurunkan insiden akibat arcing dan surge (Fraunhofer ISE, 2021; METI, 2019). Oleh karena itu ada kebutuhan untuk menyempurnakan SNI IEC 62548 dengan lampiran teknis operasional yang menjabarkan prosedur verifikasi instalasi dan frekuensi inspeksi.

3.3.3 SNI 03-7015 & IEC 62305 (Proteksi Petir)

SNI 03-7015 dan IEC 62305 mengatur proteksi petir eksternal (LPS) termasuk penempatan air terminal, down conductor, dan sistem grounding serta metodologi penilaian risiko sambaran petir (BSN, 2004; IEC, 2010). Ketentuan ini relevan untuk PLTS karena instalasi panel di atap meningkatkan probabilitas terkena sambaran langsung dan induksi elektromagnetik.

Kekuatan regulasi ini adalah adanya metodologi penentuan tingkat perlindungan (LPL) dan prinsip desain LPS yang jelas. Namun, keterpaduan proteksi petir dengan proteksi internal (SPD dan grounding equipotential bonding) masih belum digariskan secara operasional di tingkat nasional. Akibatnya, masih ada praktik dimana LPS dipasang terpisah tanpa memperhatikan koordinasi dengan sistem pembumian inverter dan SPD sehingga terjadi perbedaan potensial yang memicu arcing internal saat sambaran petir (IEC, 2010; HSE UK, 2020). Kebutuhan pada tingkat nasional adalah pedoman teknis yang mengintegrasikan LPS dan SPD (internal) untuk instalasi PLTS, termasuk persyaratan pengujian integritas pentanahan setelah pemasangan LPS.

3.3.4 Permen ESDM No. 2/2024 & Kepmen ESDM 168K/2020

Peraturan Menteri ESDM dan keputusan menteri terkait PLTS atap memberikan landasan administratif bagi pemasangan dan pengoperasian PLTS yang terhubung ke jaringan, termasuk aspek

perizinan, interkoneksi, dan kewajiban operator (Kementerian ESDM, 2024; Kementerian ESDM, 2020). Peraturan ini memegang peranan penting dalam mensyaratkan kriteria teknis minimal untuk koneksi ke jaringan serta sertifikasi instalator/penyedia.

Namun dari perspektif keselamatan kebakaran, regulasi ini cenderung fokus ke aspek jaringan dan ekonomi, belum memuat ketentuan teknis rinci tentang pencegahan kebakaran seperti kewajiban pemasangan AFCI, requirement pengujian torsi dan resistansi kontak, atau kewajiban inspeksi termografi berkala. Dengan demikian, meskipun Permen/Kepmen mengatur aspek administratif, butuh (gap) regulatif masih ada pada ranah teknis keselamatan yang berorientasi pada mitigasi kebakaran.

3.3.5 Gap Regulasi

Berdasarkan uraian di atas, ada beberapa gap utama yang menuntut perhatian pembuat kebijakan:

1. Belum adanya pedoman nasional khusus PLTS atap untuk pencegahan kebakaran. Regulasi saat ini tersebar di PUIL, SNI, dan peraturan ESDM namun tidak terintegrasi menjadi satu pedoman nasional operasional yang fokus pada fire safety PLTS atap. Hal ini menyulitkan auditor dan penegak aturan untuk melakukan verifikasi yang konsisten di lapangan.
2. Tumpang tindih dan area abu-abu PUIL–SNI pada proteksi DC. PUIL memberikan kerangka legal, sementara SNI teknis; namun keduanya belum menguraikan secara jelas tentang perangkat mitigasi DC-specific (mis. AFCI DC, SPD koordinasi, pengujian pasca-instalasi). Ketidakteraturan ini memicu interpretasi berbeda antar praktisi yang dapat mengurangi konsistensi keselamatan.

3. Minimnya sertifikasi teknisi dan mekanisme inspeksi wajib. Sertifikasi instalator PLTS fokus pada pemasangan umum; modul pelatihan khusus proteksi kebakaran PLTS (deteksi arc, torsi connector, termografi) belum menjadi prasyarat sertifikasi nasional. Selain itu tidak ada kewajiban inspeksi periodik (mis. 3–5 tahun) yang memuat pengujian resistansi kontak, termografi, dan verifikasi grounding.
4. Keterbatasan penegakan dan kapasitas lembaga pengawas. Audit teknis yang memadai memerlukan kapasitas pengawas yang memahami aspek DC-safety; tanpa itu, regulasi yang ada sulit diimplementasikan secara efektif.

Rekomendasi kebijakan singkat (konsekuen dengan analisis di atas)

1. Menyusun SNI khusus Proteksi Kebakaran PLTS Atap yang mengharmonisasikan PUIL, SNI IEC 62548, IEC 62305, dan persyaratan ESDM, termasuk lampiran prosedur verifikasi pasca-instalasi (termografi, pengukuran resistansi kontak, torsi).
2. Memasukkan AFCI DC dan SPD DC koordinatif sebagai persyaratan untuk instalasi tertentu (mis. >1 kWp atau di zona rawan petir).
3. Mewajibkan sertifikasi lanjutan teknisi untuk aspek proteksi kebakaran PLTS dan menetapkan jadwal inspeksi berkala (mis. setiap 3 tahun).
4. Meningkatkan koordinasi antar lembaga (BSN, ESDM, PUPR, pemadam kebakaran) untuk penegakan dan sosialisasi standar.

Dengan penyesuaian regulasi yang terfokus dan mekanisme pengawasan yang kuat, risiko kebakaran PLTS atap dapat

dikelola lebih efektif tanpa menghambat perkembangan energi terbarukan nasional.

3.4 Analisis Kasus Internasional

Tren kebakaran pada sistem PLTS atap di beberapa negara menunjukkan pola risiko yang konsisten, terutama terkait konektor DC, degradasi komponen, dan lemahnya inspeksi pasca-instalasi. Analisis studi internasional berikut memberikan dasar pembandingan untuk memperkuat rekomendasi teknis dan regulatif di Indonesia.

Australia: Insiden PLTS Atap >1.000 Kasus

Clean Energy Regulator (CER) Australia melaporkan lebih dari 1.000 insiden kerusakan serius dan kebakaran terkait PLTS atap selama periode 2018–2021 (Clean Energy Regulator, 2021). Faktor dominan penyebab insiden adalah konektor MC4 yang tidak sesuai spesifikasi, kabel DC yang tidak terpasang dengan benar, serta tidak adanya pemeriksaan berkala. Temuan audit CER menunjukkan lebih dari 20% instalasi memiliki cacat signifikan yang berpotensi menyebabkan kebakaran.

Salah satu aspek penting dari laporan CER adalah bahwa komponen sebenarnya bukan masalah utama, melainkan kualitas pemasangan (workmanship). Banyak insiden dipicu oleh koneksi MC4 yang longgar, kabel tidak dijepit dengan clamp UV-rated, serta rute kabel yang bersinggungan dengan material atap sehingga terjadi abrasi. Hal ini memberi pelajaran penting bahwa standar teknis yang baik tidak cukup tanpa prosedur inspeksi wajib dan kompetensi instalator yang memadai.

Inggris: Risiko MC4 Mencapai >70%

Health and Safety Executive (HSE) Inggris melaporkan bahwa lebih dari 70% insiden kebakaran PLTS berasal dari konektor DC tipe MC4 dan solderless connector lain yang tidak kompatibel atau tidak dikencangkan dengan benar (HSE UK, 2020). Pemeriksaan lapangan menemukan bahwa praktik

mencampur merek MC4 berbeda (cross-branding) meningkatkan resistansi kontak dan memicu busur listrik (arcing).

Studi kasus di Inggris juga menunjukkan bahwa arus bocor DC dan kebocoran isolasi merupakan pemicu lain yang relevan, terutama pada instalasi yang sudah berumur. Risiko meningkat pada atap industri yang memiliki getaran mekanis lebih tinggi, menyebabkan konektor semakin longgar seiring waktu (Fraunhofer ISE, 2021). Kasus Inggris mempertegas pentingnya ketentuan torque dan kompatibilitas konektor yang harus diwajibkan di dalam standar nasional.

Jepang: Faktor Aging dan Panel KW

Kementerian Ekonomi, Perdagangan, dan Industri Jepang (METI) melakukan survei besar terhadap ribuan instalasi PLTS dan menemukan bahwa aging komponen, delaminasi modul, serta penggunaan panel tidak bersertifikat (KW/palsu) menjadi penyebab utama peningkatan insiden pada sistem berumur >10 tahun (METI Japan, 2019). Studi tersebut menemukan korelasi kuat antara PID (Potential Induced Degradation) dengan peningkatan hotspot dan risiko termal pada modul lama.

Selain itu, Jepang melaporkan bahwa 15–20% modul yang diproduksi dari produsen tidak bersertifikasi memiliki cacat struktural yang meningkatkan risiko titik panas lokal. Kejadian ini memberikan konteks penting untuk Indonesia: risiko penggunaan panel KW dapat meningkat jika pasar tidak memiliki pengawasan sertifikasi produk yang kuat. Temuan ini relevan mengingat maraknya perdagangan panel non-sertifikat di beberapa negara berkembang.

Analisis lintas negara tersebut memperkuat kesimpulan bahwa risiko kebakaran PLTS atap bersifat global dan dapat diminimalkan melalui mekanisme regulatif yang lebih kuat terkait kualitas pemasangan, inspeksi, dan pengawasan komponen.

3.5 Rekomendasi Teknis dan Regulasi

Berdasarkan analisis regulasi nasional dan studi kasus internasional, beberapa rekomendasi berikut dirumuskan untuk memperkuat keselamatan sistem PLTS atap di Indonesia.

- 1. Penambahan Ketentuan DC Arc-Fault Detector (AFCI).** Saat ini PUIL dan SNI belum mewajibkan penggunaan AFCI DC untuk proteksi terhadap busur listrik, padahal DC arc fault merupakan penyebab utama kebakaran pada instalasi PLTS secara global (NREL, 2020; HSE UK, 2020). Disarankan agar Indonesia mengadopsi paradigma NEC 690.11 (USA) yang mewajibkan AFCI pada sistem tertentu. Untuk kondisi Indonesia, AFCI dapat diwajibkan untuk PLTS atap kapasitas > 1 kWp, gedung publik, sekolah, pabrik, dan fasilitas dengan risiko kebakaran tinggi.
- 2. Standardisasi Torque Instalasi MC4 dan Larangan Cross-Branding.** Kasus internasional menunjukkan 50–70% insiden berasal dari koneksi MC4 yang tidak tepat. Pemerintah perlu menetapkan nilai torque standar (mis. 2.5–3 Nm tergantung pabrikan), prosedur verifikasi torque saat commissioning, larangan mencampur konektor beda merek. Standar ini harus masuk dalam lampiran teknis SNI IEC 62548 serta menjadi bagian dari modul sertifikasi teknis.
- 3. Program Sertifikasi Teknis Nasional Berbasis Risiko Kebakaran.** Sertifikasi teknis PLTS yang ada saat ini belum memasukkan modul keselamatan DC tingkat lanjut seperti deteksi arcing, pengujian termografi, teknik crimping dan torque, mitigasi PID. Perlu dibuat sertifikasi Level 2 – Fire Safety for Rooftop PV sebagai

persyaratan untuk instalator PLTS skala residensial dan komersial.

4. **Penguatan Audit Instalasi dan Inspeksi Berkala.** Mengacu pada praktik Australia dan Jepang, audit instalasi harus ditingkatkan melalui inspeksi wajib setelah komisioning, inspeksi berkala setiap 3–5 tahun, pengujian termografi, resistansi isolasi, dan resistansi kontak konektor. Inspeksi wajib dapat ditugaskan kepada lembaga inspeksi terakreditasi (LAK), bekerja sama dengan pemerintah daerah.

5. **Revisi PUIL dan SNI Terkait PLTS Atap.** Kebutuhan revisi meliputi menambahkan ketentuan proteksi DC lebih rinci (AFCI, SPD DC koordinatif, DC isolator kelas PV), menegaskan rute kabel DC, jarak minimum dari sumber panas, dan proteksi mekanik, menyelaraskan SNI 03-7015 dan IEC 62305 untuk penanganan petir pada sistem PV, menyusun Pedoman Nasional Keselamatan Kebakaran PLTS Atap sebagai dokumen integratif. Harmonisasi ini akan menghilangkan tumpang tindih antara PUIL dan SNI, serta memberikan kepastian standar bagi instalator dan pengawas.

5. Kesimpulan dan Saran

Risiko kebakaran pada sistem PLTS atap merupakan isu krusial yang perlu mendapat perhatian serius dalam pengembangan energi surya di Indonesia. Karakteristik arus DC yang tidak mengalami pemutusan alami seperti arus AC menjadikan busur listrik (DC arc fault) sebagai salah satu penyebab utama kebakaran, terutama pada sambungan konektor, titik isolasi kabel, serta komponen proteksi yang tidak sesuai standar. Analisis pada Bab 3 menunjukkan bahwa konektor MC4, rute kabel DC, kualitas

crimping, serta workmanship menjadi faktor dominan yang memicu kegagalan termal, sejalan dengan temuan lembaga internasional seperti Clean Energy Regulator Australia, HSE UK, dan METI Jepang.

Di tingkat regulasi, Indonesia sebenarnya telah memiliki kerangka dasar melalui PUIL 2020, SNI IEC 62548, SNI 03-7015, IEC 62305, Permen ESDM 2/2024, dan Kepmen ESDM 168 K/2020. Namun, seluruh regulasi tersebut belum secara spesifik menyusun ketentuan teknis tentang fire risk pada PLTS atap, khususnya yang berkaitan dengan risiko mis-match MC4, aging modul, hotspot, PID, DC arc fault, torque standar, maupun inspeksi berkala. Kesenjangan ini menghasilkan variasi kualitas instalasi dan minimnya pengawasan keselamatan di lapangan.

Oleh karena itu, harmonisasi regulasi nasional menjadi kebutuhan mendesak. Integrasi antara SNI, PUIL, dan regulasi ESDM harus diarahkan untuk membentuk Pedoman Nasional Keselamatan PLTS Atap yang mencakup kewajiban AFCI, standardisasi konektor, persyaratan torque, sertifikasi teknisi, dan audit berkala. Dengan langkah ini, Indonesia dapat meningkatkan keandalan sistem PLTS secara signifikan sekaligus meminimalkan risiko kebakaran, sehingga pengembangan energi surya dapat berjalan lebih aman, berkelanjutan, dan sejalan dengan target transisi energi nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- APKIS. (2024). Laporan teknis instalasi PLTS atap nasional. Asosiasi Pemasang Ketenagalistrikan Indonesia.
- Australian PV Institute. (2020). Analysis of DC isolator and connector failures in Australian rooftop PV systems. APVI Technical Report. <https://apvi.org.au>
- BRE Global. (2020). Fire safety performance of PV systems. BRE Trust.
- Clean Energy Regulator. (2021). Inspection data report 2021: Solar PV system

- safety and performance. Australian Government.
<https://www.cleanenergyregulator.gov.au>
- Clean Energy Regulator. (2021). Solar panel inspection report. Clean Energy Regulator.
- DGS. (2021). PV Fire Safety Guidelines. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie.
- ESDM. (2023). Statistik energi terbarukan Indonesia 2023. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2020). Quality inspection of PV installations: Common failures in PV connectors. Fraunhofer ISE. <https://www.ise.fraunhofer.de>
- Fraunhofer ISE. (2020). Photovoltaic fire risk analysis. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
- Ghozali, I. (2022). Evaluasi implementasi standar keselamatan PLTS. *Jurnal Energi Indonesia*, 12(3), 45–56.
- IEC. (2016). IEC 62548: Photovoltaic (PV) arrays — Design requirements. International Electrotechnical Commission. <https://webstore.iec.ch>
- IEC. (2022). IEC 62548: Photovoltaic (PV) systems – Design and installation. International Electrotechnical Commission.
- IEEE. (2018). IEEE 519: Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems.
- IRENA. (2021). Future of solar PV. International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2022). Renewable energy statistics 2022. International Renewable Energy Agency.
- Japan Ministry of Economy, Trade and Industry. (2019). Field survey on PV module and connector failures. METI Japan. <https://www.meti.go.jp>
- Kepmen ESDM No. 168.K/2020 tentang PLTS Atap. (2020). Jakarta.
- Kementerian ESDM. (2021). Peta jalan transisi energi menuju NZE 2060.
- Kiefer, K., Reil, F., von Reth, B., & Köntges, M. (2021). PID-related performance losses in crystalline modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(3), 311–320.
- London Fire Brigade. (2021). Solar panel-related fire incidents report. LFB.
- Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). (2019). PV module failure survey in field installations. METI Japan.
- NEC. (2023). National Electrical Code: Article 690 PV Systems. National Fire Protection Association.
- NFPA. (2023). NFPA 855 – Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems.
- Nugraha, R. (2024). Pengembangan analisis risiko pada sistem PLTS atap industri. *Jurnal Teknologi Energi*, 8(1), 11–22.
- Permen ESDM No. 2 Tahun 2024 tentang Layanan Kelistrikan. (2024). Jakarta.
- Prasetyo, A. (2022). Kajian keselamatan listrik pada sistem PV. *Jurnal Sistem Energi*, 5(2), 77–88.
- PUIL. (2020). Persyaratan Umum Instalasi Listrik. Badan Standardisasi Nasional.
- Setiawan, M. (2023). Review implementasi PUIL terhadap instalasi PV. *Jurnal Kelistrikan Nasional*, 4(1), 29–41.
- SolarQuotes. (2022). Analysis of global rooftop solar fire incidents. SolarQuotes Technical Reports.
- SNI 62548. (2017). Instalasi sistem fotovoltaik. Badan Standardisasi Nasional.
- UK Health and Safety Executive. (2020). Safety notice: Risks of DC arcing in rooftop solar PV installations. HSE UK. <https://www.hse.gov.uk>