



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 6445-6453

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Analisis Degradasi Isolasi Kabel String pada Sistem PLTS

Sofi Patricia Putri¹, Royb Fatkhur Rizal²

¹²Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang

¹sofi.patricia.2309346@students.um.ac.id, ²fatkhurizal.fv@um.ac.id

Abstrak

Degradasi isolasi kabel string merupakan salah satu permasalahan yang sering dijumpai pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), khususnya pada instalasi yang beroperasi dalam jangka waktu panjang dan berada pada lingkungan dengan kondisi cuaca yang beragam. Penurunan kualitas isolasi kabel dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti paparan radiasi ultraviolet, temperatur operasi yang tinggi, kelembapan, kontaminasi debu, serta kerusakan mekanis pada kabel maupun konektor. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan kebocoran arus (*leakage current*), munculnya alarm *ground fault*, menurunkan efisiensi penyaluran energi listrik, dan mengurangi keandalan sistem secara keseluruhan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh degradasi isolasi kabel string terhadap performa daya DC pada PLTS Sengkol milik PT Infrastruktur Terbarukan Cemerlang (Vena Energy). Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif melalui analisis data hasil *Insulation Resistance Test* (IR Test), inspeksi visual kondisi kabel di lapangan, serta data operasional yang diperoleh dari sistem SCADA. Objek penelitian terdiri atas lima string yang mengalami alarm *ground fault* dan warning akibat indikasi penurunan kualitas isolasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai resistansi isolasi sebelum perbaikan berada pada rentang 0,7–1,5 M Ω dan meningkat menjadi 5,5–6,4 M Ω setelah dilakukan tindakan perbaikan. Peningkatan nilai resistansi isolasi diikuti oleh kenaikan daya DC dari rentang 72–80 kW menjadi 92–95 kW. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi isolasi kabel memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa sistem PLTS. Oleh karena itu, penerapan pemeliharaan preventif melalui inspeksi berkala dan pengujian resistansi isolasi secara rutin sangat diperlukan untuk menjaga efisiensi, keandalan, dan keberlangsungan operasi PLTS.

Kata Kunci: Degradasi Isolasi Kabel, *Insulation Resistance*, Kabel String PLTS, Daya DC, *Ground Fault*

1. Latar Belakang

Perkembangan kebutuhan energi listrik yang terus meningkat mendorong pemanfaatan energi baru terbarukan sebagai sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan. Salah satu teknologi energi terbarukan yang berkembang pesat adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Sistem PLTS memanfaatkan energi radiasi matahari untuk diubah menjadi energi listrik menggunakan modul fotovoltaik. Selain memiliki emisi karbon rendah, sistem PLTS juga memiliki biaya operasional yang relatif kecil sehingga banyak diterapkan pada skala industri maupun utilitas [1].

Dalam sistem PLTS, kabel string DC memiliki peran penting sebagai penghantar arus listrik dari modul surya menuju inverter. Kondisi kabel yang bekerja secara terus-menerus pada lingkungan terbuka menyebabkan kabel rentan mengalami degradasi isolasi akibat pengaruh suhu, kelembapan, paparan sinar ultraviolet, dan kerusakan mekanis. Penurunan kualitas isolasi kabel dapat menyebabkan kebocoran arus (*leakage current*), munculnya alarm *ground fault*, serta penurunan performa daya pada sistem PLTS [2].

Berdasarkan hasil pengamatan di PLTS Sengkol milik PT Infrastruktur Terbarukan Cemerlang (Vena Energy), ditemukan beberapa string mengalami alarm *ground fault* dan penurunan daya DC. Kondisi tersebut diduga dipengaruhi oleh rendahnya nilai *Insulation Resistance* (IR) pada kabel string DC. Beberapa kabel ditemukan berada pada area lembab, bersentuhan dengan mounting logam, serta mengalami kerusakan konektor MC4 akibat gigitan hewan. Permasalahan tersebut menyebabkan kualitas isolasi kabel menurun dan mengganggu stabilitas sistem PLTS.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh degradasi isolasi kabel string terhadap performa daya DC pada sistem PLTS Sengkol berdasarkan hasil *Insulation Resistance Test* sebelum dan sesudah dilakukan tindakan perbaikan kabel. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam pelaksanaan pemeliharaan preventif kabel string guna menjaga efisiensi dan keandalan sistem PLTS.

1. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PLTS Sengkol milik PT Infrastruktur Terbarukan Cemerlang (Vena Energy), Kabupaten Lombok Tengah, Nusa Tenggara Barat. Penelitian difokuskan pada analisis degradasi isolasi kabel string terhadap performa daya DC pada sistem PLTS.

Objek penelitian berupa kabel string DC tipe DONGGUAN SLOCABLE berukuran $1 \times 6 \text{ mm}^2$ dengan tegangan nominal 800 VDC dan standar IEC 62930/EN 50618 [4], [12]. Data penelitian diperoleh melalui hasil pengukuran lapangan, inspeksi kondisi fisik kabel, dan data operasional sistem SCADA PLTS Sengkol [11].

Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan teknik pengukuran nilai *Insulation Resistance* (IR) sebelum dan sesudah dilakukan tindakan perbaikan kabel. Pengukuran dilakukan menggunakan *insulation tester* pada kondisi sistem tidak bertegangan sesuai prosedur pengujian sistem PLTS [5].

Tahapan penelitian dimulai dengan identifikasi string yang mengalami alarm *ground fault* dan *warning* berdasarkan data SCADA. Selanjutnya dilakukan inspeksi visual untuk mengetahui penyebab penurunan resistansi isolasi kabel. Beberapa kondisi yang ditemukan meliputi kabel berada pada area lembab, kabel bersentuhan dengan mounting logam, dan kerusakan konektor MC4 akibat gigitan hewan.

Setelah proses inspeksi selesai, dilakukan pengukuran nilai resistansi isolasi kabel sebelum perbaikan. Tindakan perbaikan dilakukan dengan memisahkan kabel dari mounting logam, mengangkat kabel dari area lembab, dan mengganti konektor yang mengalami kerusakan. Setelah proses perbaikan selesai, dilakukan pengujian ulang nilai resistansi isolasi dan pengamatan perubahan daya DC pada sistem PLTS.

Perhitungan daya DC dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$P_{DC} = V_{DC} \times I_{DC} \quad (1)$$

Keterangan:

P_{DC} adalah daya sisi DC (W), V_{DC} adalah tegangan DC (V), dan I_{DC} adalah arus DC (A).

Selain itu, perhitungan tahanan penghantar kabel dilakukan menggunakan persamaan:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

Keterangan:

R merupakan tahanan kabel (Ω), ρ adalah resistivitas penghantar tembaga ($1,72 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$), L adalah panjang kabel (m), dan A adalah luas penampang kabel (m^2).

Tabel 1. Data Hasil Pengujian Kabel String

String	IR Sebelum (M Ω)	IR Sesudah (M Ω)	Daya DC Sebelum (kW)	Daya DC Sesudah (kW)	Status Alarm
S1	1,2	5,8	78	92	Ground Fault
S2	0,9	6,1	74	94	Ground Fault

S3	1,5	5,5	80	93	Warning
S4	0,7	6,4	72	95	Ground Fault
S5	1,1	5,9	76	92	Warning

3. Hasil dan Diskusi

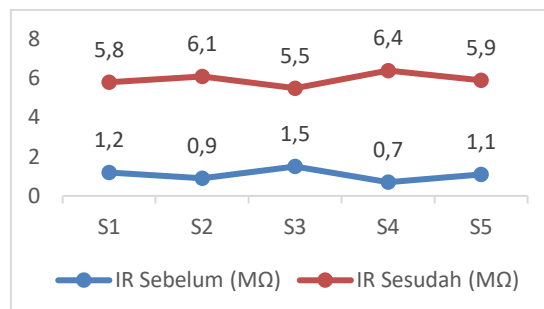
Hasil pengujian menunjukkan bahwa beberapa kabel string pada sistem PLTS mengalami penurunan kualitas isolasi yang ditandai dengan rendahnya nilai *Insulation Resistance* (IR). Penurunan kualitas isolasi tersebut menyebabkan munculnya alarm *ground fault* dan penurunan daya DC pada sistem PLTS.

Berdasarkan hasil pengamatan lapangan, penurunan nilai resistansi isolasi dipengaruhi oleh kondisi lingkungan operasional dan kerusakan fisik kabel. Beberapa kabel ditemukan berada pada area lembab dan bersentuhan langsung dengan mounting logam. Selain itu, ditemukan kerusakan konektor MC4 akibat gigitan hewan yang menyebabkan lapisan pelindung kabel mengalami kerusakan.

3.1 Analisis Nilai Insulation Resistance

Berdasarkan Tabel 1, nilai resistansi isolasi sebelum perbaikan berada pada rentang 0,7–1,5 M Ω . Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi isolasi kabel mengalami penurunan dan berpotensi menyebabkan kebocoran arus pada sistem PLTS. String S4 memiliki nilai IR terendah sebesar 0,7 M Ω dengan status alarm *ground fault*. Setelah dilakukan tindakan perbaikan, seluruh string mengalami peningkatan nilai resistansi isolasi menjadi 5,5–6,4 M Ω . Peningkatan nilai IR menunjukkan bahwa kondisi isolasi kabel menjadi lebih baik dan potensi kebocoran arus dapat dikurangi.

Gambar 1. Grafik Perbandingan Nilai IR Sebelum dan Sesudah Perbaikan

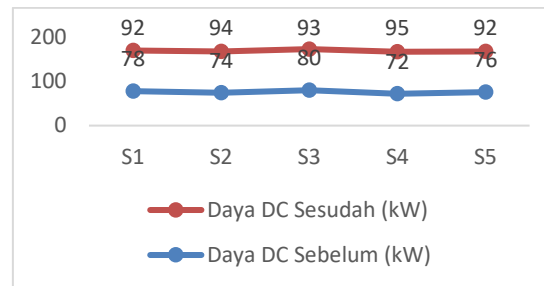


Peningkatan nilai resistansi isolasi terjadi setelah kabel dipisahkan dari mounting logam dan area lembab. Selain itu, penggantian konektor MC4 yang rusak turut meningkatkan kualitas isolasi kabel sehingga sistem menjadi lebih stabil.

3.2 Analisis Pengaruh terhadap Daya DC

Selain memengaruhi kualitas isolasi, degradasi kabel juga berdampak terhadap performa daya DC pada sistem PLTS. Nilai daya DC sebelum perbaikan berada pada rentang 72–80 kW. Setelah dilakukan perbaikan, nilai daya meningkat menjadi 92–95 kW.

Gambar 2. Grafik Perbandingan Daya DC Sebelum dan Sesudah Perbaikan



Peningkatan daya DC menunjukkan bahwa kondisi isolasi kabel memiliki pengaruh terhadap kualitas penyaluran energi listrik pada sistem PLTS. Ketika terjadi kebocoran arus pada kabel, arus efektif yang mengalir menuju inverter menjadi berkurang sehingga daya keluaran sistem ikut menurun.

Hubungan antara daya DC, tegangan, dan arus dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$P_{DC} = V_{DC} \times I_{DC} \quad (3)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, peningkatan arus setelah proses perbaikan menyebabkan daya DC yang dihasilkan sistem menjadi lebih besar. String S4 mengalami peningkatan daya paling signifikan, yaitu dari 72 kW menjadi 95 kW setelah dilakukan perbaikan kondisi kabel.

3.3 Pembahasan Hasil Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi lingkungan memiliki pengaruh besar terhadap degradasi isolasi kabel pada sistem PLTS. Kabel yang berada pada area lembab lebih mudah mengalami penurunan resistansi isolasi dibandingkan kabel pada kondisi normal. Selain itu, kabel yang bersentuhan langsung dengan mounting logam meningkatkan risiko terjadinya *ground leakage current*.

Kerusakan konektor MC4 akibat gigitan hewan juga menjadi salah satu faktor yang mempercepat penurunan kualitas isolasi kabel. Kerusakan tersebut menyebabkan lapisan pelindung kabel terbuka sehingga mempermudah terjadinya kebocoran arus.

Setelah dilakukan tindakan perbaikan, nilai resistansi isolasi dan daya DC mengalami peningkatan pada seluruh string. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pemeliharaan kabel secara berkala sangat penting untuk menjaga efisiensi dan keandalan sistem PLTS. Pemeriksaan kondisi kabel secara rutin dapat membantu mendeteksi gangguan lebih awal sehingga risiko penurunan performa pembangkit dapat diminimalkan.

3.4 Analisis Faktor Lingkungan terhadap Degradasi Isolasi Kabel

Berdasarkan hasil pengamatan lapangan dan pengujian *Insulation Resistance* (IR), kondisi lingkungan operasional terbukti memiliki pengaruh terhadap penurunan kualitas isolasi kabel string pada sistem PLTS Sengkol. Kabel dengan nilai resistansi isolasi yang rendah umumnya ditemukan pada lokasi yang memiliki tingkat kelembapan tinggi, berdekatan dengan struktur logam, serta rentan terhadap gangguan fisik dari lingkungan sekitar. Kondisi tersebut dapat mempercepat proses degradasi isolasi sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya kebocoran arus pada sistem.

Kelembapan merupakan salah satu faktor yang paling berkontribusi terhadap penurunan resistansi isolasi kabel. Masuknya air melalui bagian konektor atau lapisan isolasi yang mengalami kerusakan dapat membentuk jalur penghantar yang mempermudah aliran arus bocor menuju tanah (*ground leakage current*). Akibatnya, kemampuan isolasi kabel dalam menahan tegangan listrik menjadi berkurang. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Zhang et al. [6] yang menyatakan bahwa peningkatan kadar kelembapan pada lingkungan operasi sistem fotovoltaik dapat mempercepat degradasi isolasi dan menurunkan nilai resistansi kabel.

Selain kelembapan, perubahan temperatur yang terjadi secara terus-menerus juga berpengaruh terhadap kondisi isolasi. Kabel yang terpasang pada area terbuka akan mengalami siklus pemanasan pada siang hari dan pendinginan pada malam hari. Siklus termal tersebut menyebabkan material isolasi mengalami ekspansi dan kontraksi berulang yang dalam jangka panjang dapat menimbulkan retakan mikro. Kerusakan tersebut berpotensi menurunkan kemampuan dielektrik material dan meningkatkan risiko kebocoran arus [7].

Selama proses inspeksi juga ditemukan beberapa kerusakan mekanis pada konektor MC4 yang diduga disebabkan oleh aktivitas hewan di sekitar area instalasi. Kerusakan pada konektor mengakibatkan bagian penghantar lebih mudah terpapar lingkungan luar sehingga mempercepat penurunan kualitas isolasi. Selain itu, beberapa kabel ditemukan bersentuhan langsung dengan struktur *mounting* logam yang berpotensi memicu gangguan *ground fault* apabila terjadi penurunan ketahanan isolasi.

Hasil analisis menunjukkan bahwa degradasi isolasi kabel tidak hanya dipengaruhi oleh satu faktor, tetapi merupakan kombinasi dari pengaruh kelembapan, temperatur, dan kerusakan mekanis yang terjadi selama masa operasi. Setelah dilakukan tindakan perbaikan berupa penggantian konektor yang rusak, penataan ulang jalur kabel, serta pemisahan kabel dari struktur logam, nilai resistansi isolasi mengalami peningkatan yang signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa pengelolaan kondisi lingkungan dan pelaksanaan pemeliharaan preventif secara berkala sangat penting untuk menjaga keandalan, keamanan, dan performa sistem PLTS dalam jangka panjang.

3.5 Analisis Kerusakan Fisik Kabel dan Konektor

Berdasarkan hasil inspeksi lapangan, ditemukan beberapa bentuk kerusakan fisik yang berkontribusi terhadap rendahnya nilai resistansi isolasi. Salah satu kerusakan yang paling dominan adalah kerusakan konektor MC4 akibat gangguan hewan. Lapisan pelindung yang rusak menyebabkan bagian penghantar lebih mudah terpapar lingkungan sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya kebocoran arus.

Selain itu, ditemukan pula kabel yang bersentuhan langsung dengan struktur mounting logam. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan abrasi akibat getaran dan pergerakan kabel yang terjadi secara terus-menerus. Jika lapisan isolasi terkikis, maka risiko terjadinya gangguan ground fault akan meningkat. Oleh karena itu, pemasangan cable management yang baik menjadi aspek penting dalam menjaga keandalan sistem PLTS.

3.6 Evaluasi Efektivitas Tindakan Perbaikan

Tindakan perbaikan yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pemisahan kabel dari struktur logam, pengangkatan kabel dari area lembap, serta penggantian konektor MC4 yang mengalami kerusakan. Hasil pengukuran setelah perbaikan menunjukkan peningkatan nilai resistansi isolasi pada seluruh string yang diuji. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sumber utama permasalahan memang berasal dari degradasi isolasi kabel dan konektor.

Peningkatan resistansi isolasi berdampak langsung pada penurunan kebocoran arus sehingga energi listrik yang dihasilkan modul surya dapat disalurkan dengan lebih optimal menuju inverter. Hal ini dibuktikan dengan meningkatnya daya DC setelah proses perbaikan dilakukan. Dengan demikian, tindakan korektif yang diterapkan terbukti efektif dalam memulihkan performa sistem.

3.7 Implikasi terhadap Keandalan dan Efisiensi Sistem PLTS

Kualitas isolasi kabel DC merupakan salah satu faktor yang menentukan tingkat keandalan operasional sistem PLTS. Kabel DC berfungsi sebagai jalur utama penyaluran energi listrik dari modul fotovoltaik menuju inverter, sehingga penurunan kualitas isolasi dapat memengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. Nilai resistansi isolasi yang rendah berpotensi menyebabkan terjadinya arus bocor (*leakage current*) yang dapat memicu alarm *ground fault* maupun aktivasi sistem proteksi pada inverter. Pada kondisi tertentu, inverter dapat membatasi kapasitas operasi atau menghentikan proses konversi energi secara otomatis untuk menghindari kerusakan peralatan dan menjaga keselamatan sistem [17].

Selain berdampak pada aspek keandalan, degradasi isolasi kabel juga berpengaruh terhadap efisiensi penyaluran daya listrik. Arus bocor yang muncul akibat penurunan kemampuan isolasi menyebabkan sebagian energi yang dihasilkan modul surya tidak dapat ditransmisikan secara optimal ke inverter. Kondisi tersebut mengakibatkan daya keluaran sistem menjadi lebih rendah dibandingkan potensi daya yang seharusnya dapat dicapai. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai resistansi isolasi setelah tindakan perbaikan diikuti oleh peningkatan daya DC pada seluruh string yang diamati, sehingga mengindikasikan adanya hubungan antara kondisi isolasi kabel dan performa sistem PLTS. Temuan ini sejalan dengan penelitian Omar et al. [8] yang menyatakan bahwa kebocoran arus dapat menurunkan efisiensi operasi sistem fotovoltaik dan mengurangi produksi energi.

Peningkatan nilai resistansi isolasi yang diperoleh setelah proses perbaikan menunjukkan bahwa kondisi kabel memiliki kontribusi penting terhadap kualitas penyaluran energi listrik. Oleh karena itu, kegiatan inspeksi visual, pengujian *Insulation Resistance* (IR), serta pemantauan parameter operasional secara berkala perlu menjadi bagian dari program pemeliharaan preventif. Menurut standar IEC 61724-1 [17], pemantauan kondisi sistem secara berkelanjutan merupakan langkah penting untuk menjaga performa dan mendeteksi potensi gangguan sejak dini. Selain itu, pedoman operasi dan pemeliharaan PLTS yang diterbitkan oleh TÜV Rheinland [15] menekankan bahwa pemeriksaan rutin pada kabel, konektor, dan perangkat proteksi dapat membantu meningkatkan keandalan sistem serta meminimalkan kehilangan energi selama masa operasi. Dengan demikian, penerapan program pemeliharaan yang terencana tidak hanya mampu mengurangi risiko gangguan operasional, tetapi juga mendukung peningkatan efisiensi dan keberlanjutan kinerja PLTS dalam jangka panjang [18].

3.8 Rekomendasi Strategi Pemeliharaan Preventif

Berdasarkan hasil penelitian, strategi pemeliharaan preventif yang direkomendasikan meliputi inspeksi visual kabel secara rutin, pengujian resistansi isolasi secara berkala, pemeriksaan kondisi konektor MC4, serta pemantauan alarm ground fault melalui sistem SCADA. Selain itu, perlu dilakukan pengelolaan vegetasi dan pengendalian gangguan hewan di sekitar area instalasi guna mengurangi risiko kerusakan fisik kabel.

Penerapan teknologi pemantauan berbasis thermography dan predictive maintenance juga dapat menjadi solusi untuk mendeteksi potensi gangguan sebelum menyebabkan penurunan performa sistem. Dengan adanya program pemeliharaan yang terstruktur, umur pakai kabel dapat diperpanjang dan risiko gangguan operasional dapat diminimalkan. Strategi tersebut tidak hanya meningkatkan keandalan sistem, tetapi juga membantu menjaga produksi energi listrik tetap optimal selama masa operasi PLTS.

3.9 Hubungan Nilai Resistansi Isolasi dengan Keandalan Operasi Inverter

Inverter merupakan komponen utama dalam sistem PLTS yang berfungsi mengubah energi listrik arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Kinerja inverter sangat dipengaruhi oleh kondisi jaringan DC yang terhubung dengan modul fotovoltaik. Salah satu parameter yang menjadi perhatian dalam sistem proteksi inverter adalah nilai resistansi isolasi terhadap tanah (*ground insulation resistance*). Nilai resistansi isolasi yang rendah dapat menyebabkan peningkatan arus bocor dan menurunkan tingkat keamanan operasional sistem fotovoltaik [5], [14]. Ketika nilai resistansi isolasi mengalami penurunan, arus bocor menuju tanah akan meningkat sehingga sistem proteksi inverter mendeteksi kondisi tersebut sebagai potensi gangguan. Pada inverter modern, mekanisme proteksi akan memberikan peringatan (*warning*) atau alarm *ground fault* apabila nilai resistansi isolasi berada di bawah batas aman yang telah ditentukan oleh pabrikan. Jika kondisi ini terus berlanjut, inverter dapat memasuki mode *derating* atau bahkan menghentikan operasi secara otomatis untuk mencegah kerusakan yang lebih serius pada sistem [3], [17].

Hasil pengamatan pada PLTS Sengkol menunjukkan bahwa string dengan nilai resistansi isolasi rendah lebih sering memunculkan alarm *ground fault* dibandingkan string yang memiliki nilai resistansi isolasi lebih tinggi. Setelah dilakukan tindakan perbaikan, alarm yang sebelumnya muncul dapat dihilangkan dan sistem kembali beroperasi secara normal. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas isolasi kabel memiliki peran penting dalam menjaga kontinuitas operasi inverter. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Omar et al. yang menyatakan bahwa peningkatan arus bocor akibat degradasi isolasi dapat menurunkan keandalan operasi sistem fotovoltaik [8].

Menurut standar IEC 62446-1, pengujian resistansi isolasi secara berkala merupakan salah satu prosedur penting dalam pemeliharaan sistem PLTS karena dapat membantu mendeteksi potensi gangguan sebelum menyebabkan penghentian operasi pembangkit [5]. Oleh karena itu, pemantauan kondisi isolasi kabel tidak hanya berfungsi untuk menjaga keamanan instalasi, tetapi juga mendukung peningkatan *system availability* dan keandalan operasional PLTS dalam jangka panjang [17], [19].

3.10 Analisis Dampak Ekonomi Akibat Penurunan Kinerja Kabel String

Penurunan kualitas isolasi kabel tidak hanya berdampak pada aspek teknis, tetapi juga berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi akibat berkurangnya energi listrik yang dapat diproduksi oleh sistem PLTS. Ketika terjadi kebocoran arus pada jaringan DC, sebagian energi yang dihasilkan modul surya tidak dapat disalurkan secara optimal menuju inverter sehingga daya keluaran pembangkit mengalami penurunan. Kondisi tersebut pada akhirnya berpengaruh terhadap nilai produksi energi tahunan (*annual energy yield*) sistem PLTS [8], [13].

Berdasarkan hasil penelitian, daya DC pada lima string yang diamati mengalami peningkatan setelah dilakukan perbaikan kondisi kabel. Sebelum perbaikan, daya DC berada pada rentang 72–80 kW, sedangkan setelah perbaikan meningkat menjadi 92–95 kW. Selisih daya tersebut menunjukkan bahwa degradasi isolasi kabel dapat menyebabkan kehilangan energi yang cukup signifikan apabila tidak segera ditangani. Hasil ini mendukung penelitian Setiawan dan Maulana yang menyatakan bahwa kualitas isolasi kabel memiliki hubungan langsung dengan performa daya keluaran sistem PLTS [9].

Pada sistem PLTS skala utilitas, kehilangan daya yang berlangsung dalam jangka waktu panjang dapat menurunkan nilai produksi energi tahunan dan berdampak pada berkurangnya pendapatan perusahaan. Selain itu, munculnya alarm *ground fault* yang berulang juga meningkatkan kebutuhan pemeliharaan korektif yang memerlukan biaya tenaga kerja, pengujian, dan penggantian komponen [12], [15].

Dari sudut pandang ekonomi, pelaksanaan pemeliharaan preventif secara berkala lebih menguntungkan dibandingkan menunggu terjadinya kegagalan sistem. Biaya inspeksi dan pengujian resistansi isolasi relatif lebih kecil dibandingkan potensi kerugian akibat kehilangan produksi energi maupun penghentian operasi inverter. Oleh sebab itu, penerapan program pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) dapat menjadi strategi yang efektif untuk menjaga produktivitas pembangkit dan mengurangi biaya operasional jangka panjang [15], [19].

3.11 Pentingnya Monitoring Berbasis SCADA dalam Deteksi Dini Gangguan Isolasi

Sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) merupakan salah satu teknologi yang banyak digunakan pada PLTS skala besar untuk memantau kondisi operasional pembangkit secara *real-time*. Sistem ini memungkinkan operator memperoleh informasi mengenai parameter listrik, status inverter, alarm proteksi, serta performa masing-masing string secara berkelanjutan [17], [19].

Dalam penelitian ini, identifikasi awal terhadap string yang mengalami gangguan dilakukan melalui data alarm yang terekam pada sistem SCADA. Informasi tersebut menjadi dasar dalam menentukan lokasi inspeksi dan pengujian lebih lanjut menggunakan metode *Insulation Resistance Test*. Dengan adanya sistem pemantauan yang terintegrasi, proses identifikasi gangguan dapat dilakukan lebih cepat dibandingkan inspeksi manual pada seluruh area pembangkit [10], [17].

Selain memberikan informasi terkait alarm *ground fault*, data historis yang tersimpan dalam SCADA juga dapat digunakan untuk menganalisis tren penurunan performa sistem. Apabila terjadi penurunan daya secara bertahap pada suatu string, operator dapat melakukan investigasi lebih awal sebelum gangguan berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *predictive maintenance* yang berfokus pada pencegahan kegagalan peralatan melalui analisis data operasional dan pemantauan kondisi secara berkelanjutan [12], [20].

Pemanfaatan SCADA yang dikombinasikan dengan inspeksi visual dan pengujian resistansi isolasi dapat meningkatkan efektivitas program pemeliharaan PLTS. Melalui pendekatan tersebut, gangguan dapat dideteksi pada tahap awal sehingga risiko kehilangan produksi energi dan penghentian operasi pembangkit dapat diminimalkan. Menurut IEC 61724-1, pemantauan kinerja sistem secara berkelanjutan merupakan salah satu aspek penting dalam menjaga efisiensi dan keandalan pembangkit fotovoltaik [17]. Oleh karena itu, integrasi antara sistem monitoring dan kegiatan pemeliharaan menjadi faktor penting dalam menjaga keberlanjutan operasi PLTS jangka panjang [15], [19].

3.12 Analisis Korelasi Nilai Resistansi Isolasi terhadap Peningkatan Daya DC

Untuk mengetahui sejauh mana pengaruh kondisi isolasi kabel terhadap performa sistem PLTS, dilakukan analisis hubungan antara peningkatan nilai resistansi isolasi (*Insulation Resistance*) dengan peningkatan daya DC setelah tindakan perbaikan. Nilai resistansi isolasi merupakan indikator kemampuan kabel dalam menahan kebocoran arus ke tanah. Semakin tinggi nilai resistansi isolasi, semakin kecil kemungkinan terjadinya arus bocor yang dapat menyebabkan kehilangan daya pada sistem [6], [7].

Berdasarkan data pada Tabel 1, seluruh string yang mengalami peningkatan nilai resistansi isolasi juga menunjukkan peningkatan daya DC. Sebelum perbaikan, nilai resistansi isolasi berada pada rentang 0,7–1,5 M Ω dengan daya DC sebesar 72–80 kW. Setelah dilakukan perbaikan, nilai resistansi isolasi meningkat menjadi 5,5–6,4 M Ω dan diikuti peningkatan daya DC menjadi 92–95 kW. Kondisi tersebut menunjukkan adanya hubungan yang positif antara kualitas isolasi kabel dan kemampuan sistem dalam menyalurkan energi listrik secara optimal menuju inverter [8], [9].

Tabel 2 menunjukkan persentase peningkatan nilai resistansi isolasi dan daya DC pada masing-masing string setelah dilakukan tindakan perbaikan.

Tabel 2. Persentase Peningkatan Nilai IR dan Daya DC

String	IR Sebelum (M Ω)	IR Sesudah (M Ω)	Peningkatan IR (%)	Daya Sebelum (kW)	Daya Sesudah (kW)	Peningkatan Daya (%)
S1	1,2	5,8	383,33	78	92	17,95
S2	0,9	6,1	577,78	74	94	27,03
S3	1,5	5,5	266,67	80	93	16,25
S4	0,7	6,4	814,29	72	95	31,94
S5	1,1	5,9	436,36	76	92	21,05

Berdasarkan Tabel 2, string S4 mengalami peningkatan resistansi isolasi tertinggi yaitu sebesar 814,29%, yang diikuti oleh peningkatan daya DC sebesar 31,94%. Sebaliknya, string S3 memiliki peningkatan resistansi isolasi paling rendah yaitu sebesar 266,67% dan menunjukkan peningkatan daya sebesar 16,25%. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa semakin besar perbaikan kondisi isolasi kabel, semakin besar pula potensi peningkatan daya yang dapat diperoleh sistem PLTS.

Secara teoritis, hubungan tersebut dapat dijelaskan melalui berkurangnya arus bocor (*leakage current*) setelah kualitas isolasi kabel meningkat. Pada kondisi isolasi yang buruk, sebagian energi listrik yang dihasilkan modul surya tidak seluruhnya disalurkan menuju inverter karena mengalir ke tanah melalui jalur kebocoran. Setelah dilakukan perbaikan, jalur kebocoran dapat diminimalkan sehingga arus yang diterima inverter menjadi lebih besar dan daya keluaran sistem meningkat [2], [8].

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Kumar dan Sharma yang menyatakan bahwa penurunan resistansi isolasi pada sistem fotovoltaik dapat menyebabkan berkurangnya efisiensi penyaluran energi akibat meningkatnya arus bocor dan rugi-rugi daya pada sisi DC [7]. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Setiawan dan Maulana yang menunjukkan bahwa kualitas isolasi kabel memiliki hubungan langsung terhadap stabilitas daya keluaran PLTS dan tingkat keandalan operasi sistem [9].

Dengan demikian, nilai resistansi isolasi dapat digunakan sebagai salah satu parameter penting dalam evaluasi kesehatan (*health assessment*) sistem PLTS. Pengujian resistansi isolasi secara berkala tidak hanya berfungsi untuk mendeteksi potensi gangguan keselamatan listrik, tetapi juga dapat digunakan sebagai indikator awal untuk mengidentifikasi penurunan performa sistem sebelum berdampak signifikan terhadap produksi energi listrik [5], [17], [19].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan pada sistem PLTS Sengkol milik PT Infrastruktur Terbarukan Cemerlang (Vena Energy), dapat disimpulkan bahwa degradasi isolasi kabel string berpengaruh signifikan terhadap performa daya DC, keandalan operasi inverter, dan stabilitas sistem PLTS secara keseluruhan. Penurunan nilai resistansi isolasi ditemukan pada beberapa string yang mengalami paparan kelembapan, kontak langsung dengan struktur logam, serta kerusakan konektor MC4 akibat gangguan hewan. Kondisi tersebut memicu munculnya alarm *ground fault*, meningkatkan potensi kebocoran arus, dan menyebabkan penurunan daya keluaran pada sisi DC.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai *Insulation Resistance* (IR) sebelum perbaikan berada pada rentang 0,7–1,5 M Ω dan meningkat menjadi 5,5–6,4 M Ω setelah dilakukan tindakan perbaikan berupa pemisahan kabel dari struktur logam, pengangkatan kabel dari area lembap, serta penggantian konektor yang mengalami kerusakan. Peningkatan kualitas isolasi tersebut diikuti oleh kenaikan daya DC dari rentang 72–80 kW menjadi 92–95 kW. Analisis persentase peningkatan menunjukkan bahwa string dengan peningkatan nilai resistansi isolasi terbesar juga mengalami peningkatan daya yang lebih tinggi, sehingga mengindikasikan adanya hubungan positif antara kualitas isolasi kabel dan performa sistem PLTS.

Selain berdampak pada peningkatan daya, perbaikan kondisi isolasi juga mampu mengurangi risiko kebocoran arus dan menghilangkan alarm *ground fault* yang sebelumnya terdeteksi oleh inverter. Temuan ini menunjukkan bahwa nilai resistansi isolasi dapat digunakan sebagai indikator penting dalam mengevaluasi kesehatan sistem (*system health assessment*) dan mendeteksi potensi gangguan sebelum memengaruhi produksi energi listrik secara signifikan.

Oleh karena itu, pelaksanaan pemeliharaan preventif melalui inspeksi visual, pengujian resistansi isolasi secara berkala, pemeriksaan konektor MC4, serta pemantauan berbasis SCADA sangat diperlukan untuk menjaga keandalan, keamanan, dan efisiensi operasi PLTS dalam jangka panjang. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji pengaruh umur kabel, temperatur operasional, tingkat kelembapan lingkungan, serta pengembangan metode prediksi degradasi isolasi berbasis data historis guna mendukung implementasi *predictive maintenance* pada sistem PLTS skala utilitas.

Referensi

- [1] Arizal, R. Hidayat, dan M. Fadli, “Analisis Kinerja Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) On-Grid 735 kWp,” *Jurnal Teknik Energi*, vol. 12, no. 1, pp. 1–10, 2024.
- [2] Nugroho dan D. Prasetyo, “Analisis Pengaruh Resistansi Isolasi Kabel terhadap Performa Sistem PLTS,” *Jurnal Energi Terbarukan*, vol. 9, no. 2, pp. 45–53, 2023.
- [3] M. F. Ramadhan, I. Kurniawan, dan S. Hidayat, “Evaluasi *Ground Fault* pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya,” *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 14, no. 1, pp. 22–30, 2022.
- [4] IEC 62930, *Electric Cables for Photovoltaic Systems with a Voltage Rating of 1,5 kV DC*, International Electrotechnical Commission, 2020.
- [5] IEC 62446-1, *Grid Connected Photovoltaic Systems – Minimum Requirements for System Documentation, Commissioning Tests and Inspection*, International Electrotechnical Commission, 2021.

- A. Kusuma dan B. Santoso, "Analisis Kebocoran Arus pada Kabel DC Sistem PLTS Menggunakan Metode *Insulation Resistance Test*," *Jurnal Rekayasa Energi*, vol. 11, no. 3, pp. 95–103, 2023.
- [6] M. Zhang, Y. Li, dan H. Chen, "Effect of Humidity on Insulation Degradation in Photovoltaic DC Cable Systems," *Renewable Energy*, vol. 198, pp. 1254–1262, 2022.
- [7] S. Kumar dan P. Sharma, "Analysis of Insulation Resistance Degradation in Solar Photovoltaic Installations," *Solar Energy*, vol. 231, pp. 556–564, 2022.
- [8] M. Omar, A. Rahman, dan F. Hasan, "Performance Analysis of Photovoltaic Systems Affected by Leakage Current," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 141, pp. 108–116, 2022.
- [9] H. Setiawan dan R. Maulana, "Pengaruh Kualitas Isolasi Kabel terhadap Daya Keluaran PLTS," *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 5, no. 2, pp. 66–74, 2024.
- [10] PT Infrastruktur Terbarukan Cemerlang, *Data Operasional dan Hasil IR Test PLTS Sengkol*, Lombok Tengah, Indonesia, 2026.
- [11] DONGGUAN SLOCABLE, *Photovoltaic DC Cable Specification 1 × 6 mm²*, China, 2023.
- DONGGUAN SLOCABLE Official
- [12] A. Mellit, S. Kalogirou, dan H. Shaari, "Maintenance and Fault Diagnosis of Photovoltaic Systems: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 1–17, 2018.
- [13] M. A. Green, E. D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, dan X. Hao, "Solar Cell Efficiency Tables," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 31, no. 1, pp. 3–16, 2023.
- [14] IEC 60364-7-712, *Requirements for Special Installations or Locations – Solar Photovoltaic (PV) Power Supply Systems*, International Electrotechnical Commission, 2017.
- [15] TÜV Rheinland, *Photovoltaic Power Plants: Technical Guidelines for Operation and Maintenance*, Cologne, Germany, 2021.
- [16] M. Köntges et al., *Review of Failures of Photovoltaic Modules*, International Energy Agency (IEA PVPS), Report T13-01:2014.
- [17] IEC 61724-1, *Photovoltaic System Performance – Monitoring*, International Electrotechnical Commission, 2021.
- [18] M. Wolf dan R. Brendel, "Impact of Environmental Stress on PV System Reliability," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 230, 2021.
- [19] International Energy Agency (IEA PVPS), *Operation and Maintenance of Grid-Connected Photovoltaic Systems*, Report IEA-PVPS T13-19, 2022.
- [20] M. Dhimish and V. Holmes, "Fault Detection in Photovoltaic Systems Using Monitoring Techniques: A Review," *Renewable Energy*, vol. 186, pp. 192–208, 2022.
- [21] A. Mellit and S. A. Kalogirou, "Artificial Intelligence Techniques for Photovoltaic Applications: A Review," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 80, 2020.
- [22] IEC 62548, *Photovoltaic (PV) Arrays – Design Requirements*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2016.