

Analisis Penyebab Kegagalan *Inverter* DC-AC Sistem *Back Up* Daya di Gardu Induk Cibatu dengan Metode RCA

Roni Kurniawan, Setyo Supratno*, Seta Samsiana
Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam 45 Bekasi, Indonesia

Article Info	ABSTRACT
Article history: Submitted August 9, 2024 Accepted August 27, 2024 Published August 29, 2024	Studi ini menganalisis penyebab kegagalan <i>inverter</i> DC-AC dalam sistem <i>back-up</i> daya di Gardu Induk Cibatu. Meskipun telah dilengkapi dengan berbagai sistem proteksi seperti <i>overload</i> , <i>overvoltage</i> , <i>short circuit</i> , dan <i>over-temperature</i> , namun adanya insiden kebakaran menunjukkan kegagalan sistem proteksi tersebut. Dengan menggunakan metode <i>Root Cause Analysis</i> (RCA), yang mencakup inspeksi visual, pengumpulan data, analisis sistem proteksi, dan wawancara, ditemukan bahwa kualitas material yang rendah dan usia komponen yang tua adalah penyebab utama kegagalan. Penelitian merekomendasikan penggantian komponen dengan bahan berkualitas tinggi, peningkatan prosedur pemeliharaan, dan monitoring operasional yang lebih ketat.
Keywords: <i>Inverter</i> DC-AC, sistem <i>back up</i> daya, <i>Root Cause Analysis</i> , sistem proteksi <i>DC-AC inverter</i> , <i>back up power system</i> , <i>Root Cause Analysis</i> , <i>protection system</i>	<i>This study analyzes the causes of DC-AC inverter failure in the power back-up system at the Cibatu Substation. Although it has been equipped with various protection systems such as overload, overvoltage, short circuit, and overtemperature, the occurrence of a fire incident indicates the failure of the protection system. Using the Root Cause Analysis (RCA) method, which includes visual inspection, data collection, protection system analysis, and interviews, it was found that low-quality materials and the aging of components were the primary causes of the failure. The study recommends replacing components with high-quality materials, improving maintenance procedures, and implementing stricter operational monitoring.</i>
	 

Corresponding Author:

Setyo Supratno
Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam 45 Bekasi
Jalan Cut Meutia No. 83, Margahayu, Bekasi Timur, Kota Bekasi, Jawa Barat, Indonesia
Email: *setyo@unismabekasi.ac.id

1. PENDAHULUAN

Gardu induk merupakan komponen vital dalam sistem distribusi listrik [1], memastikan kontinuitas dan keandalan pasokan listrik ke konsumen [2][3]. Di gardu induk Cibatu, sistem *back up* daya menggunakan *inverter* DC-AC untuk mengubah arus searah (DC) dari sumber daya cadangan menjadi arus bolak-balik (AC) yang diperlukan untuk operasional peralatan kritis saat terjadi gangguan pada sumber utama. *Inverter* ini mendapat suplai daya dari pembangkit listrik, di mana energi listrik tersebut pertama-tama diubah menjadi arus searah (DC) dan kemudian disimpan dalam baterai. *Inverter* ini dilengkapi dengan sistem proteksi canggih yang dirancang untuk menangani berbagai kondisi abnormal seperti kelebihan beban (*overload*) [4], tegangan berlebih (*overvoltage*), hubungan pendek (*short circuit*), dan suhu berlebih (*overtemperature*) [5].

Sistem *back up* yang dibebankan pada *inverter* DC-AC mencakup beberapa komponen penting. Pertama, relai proteksi yang berfungsi untuk pembacaan arus gangguan dan tegangan gangguan yang terjadi di tower transmisi. Kedua, panel kontrol yang mengoperasikan peralatan pada gardu induk seperti Pemutus Tenaga (PMT), Pemisah Busbar (PMS), Pemisah Line, dan Pemisah Tanah/*Grounding*. Ketiga, *Human Machine Interface* (HMI) yang menampilkan *single line diagram* (150 kV, 20 kV) dari *switch-yard* serta menampilkan *annunciator* berupa indikasi gangguan dan alarm dari panel kontrol. Keseluruhan sistem ini bergantung pada *inverter* untuk memastikan operasional yang aman dan stabil dalam situasi darurat [6]. Namun, meskipun dilengkapi dengan berbagai mekanisme proteksi, insiden kebakaran yang terjadi baru-baru ini pada *inverter* di gardu induk Cibatu menimbulkan kekhawatiran serius. Kebakaran ini tidak hanya mengakibatkan kerusakan perangkat keras yang signifikan tetapi juga mengganggu kestabilan pasokan listrik, dengan potensi dampak luas terhadap pelayanan publik dan keselamatan. Kegagalan ini menyoroti keperluan analisis yang mendalam untuk mengidentifikasi akar penyebab dari kerusakan tersebut. Penting untuk memahami apakah kegagalan ini

disebabkan oleh kekurangan dalam desain sistem proteksi, kesalahan manusia, kondisi operasional yang tidak terduga, atau kombinasi dari faktor-faktor ini. Mengidentifikasi dan mengatasi akar penyebab kegagalan adalah langkah penting untuk mencegah insiden serupa di masa depan, meningkatkan keandalan sistem, dan memastikan keselamatan operasional di gardu induk.

Pola kegagalan umum pada penyearah DC-AC sering dikaitkan dengan stres suhu yang mempengaruhi kapasitor dan semikonduktor daya, yang dapat menyebabkan kegagalan dan pemadaman sistem [7]. Selain itu, pemodelan kegagalan dependen, seperti *Common Cause Failures* (CCF), penting untuk memahami akar penyebab kegagalan dalam sistem tenaga, menekankan perlunya pemodelan berbasis fisika untuk secara eksplisit memasukkan mekanisme kegagalan dan dependensi antar komponen [8]. Menerapkan analisis akar penyebab (RCA) [9][10] dalam masalah mekanis dapat membantu menentukan alasan kegagalan peralatan kritis dengan mengkarakterisasi elemen yang gagal, melakukan analisis material, dan membandingkannya dengan penelitian sebelumnya untuk mengidentifikasi kemungkinan akar penyebab [11]. Selanjutnya, perawatan kegagalan penyebab umum dalam studi reliabilitas melibatkan penanganan komponen yang gagal, pemeliharaan preventif, dan mode kegagalan terkait, menyoroti kepentingan mempertimbangkan sifat asimetri dalam kelompok komponen [12].

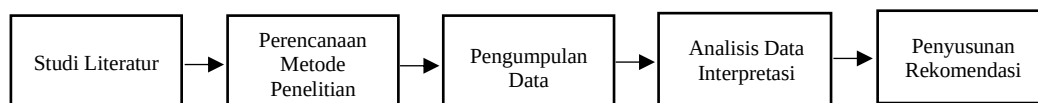
Studi literatur telah dilakukan penulis mencakup beberapa penelitian sebelumnya yang relevan. Penelitian Luh Nyoman Widyastuti mengkaji gangguan sistem transmisi listrik PT. PLN (Persero) di Sumatera yang menyebabkan kerugian energi sebesar 10.682,24 MWh. Dengan menggunakan metode RCA [13][14], penelitian ini mengidentifikasi 21 akar penyebab gangguan, dengan lima penyebab dominan yaitu: arus gangguan melebihi kapasitas alat, korosi pada konduktor, kurangnya kompetensi pelaksana pemasangan alat, kurangnya koordinasi dengan masyarakat sekitar, dan tindak lanjut inspeksi yang terlambat. Rekomendasi yang diajukan mencakup peningkatan jumlah tenaga lapangan, penggantian konduktor dengan tipe ACCC, peningkatan koordinasi dengan masyarakat, respons cepat terhadap temuan inspeksi, dan peningkatan kompetensi pelaksana. Penelitian ini juga mengungkap empat kategori kejadian dasar yaitu gangguan peralatan, material, manusia, dan alam, serta menyarankan penelitian lebih lanjut pada gangguan transformator.

Penelitian Andikha Kuswardana, Novi Eka Mayangsari, dan Haidar Natsir Amrullah menganalisis kecelakaan kerja di PT. PAL Indonesia dengan metode RCA yang didukung oleh analisis 5 *Whys* dan *diagram fishbone* [14]. Dari 77 kecelakaan yang terjadi antara tahun 2014 hingga 2016, penelitian ini menyoroti kecelakaan tertimpa tangga besi sebagai kasus utama. Penyebab kecelakaan diidentifikasi dalam dua kategori utama: *unsafe actions* dan *unsafe conditions*. Rekomendasi yang diajukan termasuk pelatihan K3, peningkatan penerangan dan kebersihan, penggunaan APD yang konsisten, penerapan konsep 5R, dan penandaan bahaya. Penelitian ini menyimpulkan bahwa banyak kecelakaan disebabkan oleh tindakan dan kondisi tidak aman, yang dapat diatasi dengan pelatihan, penerapan SOP yang ketat, dan perbaikan lingkungan kerja untuk mengurangi frekuensi dan keparahan kecelakaan di PT. PAL Indonesia.

Mengacu pada kedua penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis akar penyebab kegagalan *inverter* dalam sistem *back up* daya di Gardu Induk Cibatuan menggunakan metode RCA, *diagram fishbone*, dan 5M analisis untuk mengembangkan tindakan korektif dan pencegahan yang efektif. Penelitian ini menggunakan metode RCA untuk mengeksplorasi dan memahami faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kegagalan pada *inverter* DC-AC tersebut. Dengan RCA, penelitian ini akan melalui proses sistematis mulai dari inspeksi visual, pengumpulan data operasional dan pengukuran, analisis sistem proteksi, hingga wawancara dengan teknisi serta staf pemeliharaan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis untuk perbaikan dan peningkatan sistem, serta langkah-langkah pencegahan yang efektif.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode RCA, *diagram fishbone*, dan 5M analisis untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan *inverter* dalam sistem *back up* daya di Gardu Induk Cibatuan. Metode ini melibatkan pengumpulan data, inspeksi visual, analisis dokumentasi, serta wawancara dengan personel terkait untuk memahami faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kegagalan sistem. Analisis ini bertujuan untuk mengembangkan tindakan korektif yang efektif dan meningkatkan keandalan sistem. Secara detail tahapan-tahapan metode penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Metode Penelitian

2.1 Studi literatur.

RCA adalah metode sistematis untuk mengidentifikasi akar penyebab masalah. RCA telah digunakan dalam penelitian gangguan sistem transmisi listrik oleh Widyastuti (2023) dan kecelakaan kerja di PT. PAL Indonesia oleh Kuswardana dkk. (2023). Sementara itu, *diagram fishbone* dan analisis 5 Whys adalah alat yang digunakan dalam RCA untuk mengkategorikan penyebab masalah berdasarkan manusia, mesin, metode, bahan, dan pengukuran. Widyastuti telah menggunakan *diagram fishbone* untuk mengidentifikasi penyebab dominan gangguan listrik; sementara Kuswardana dkk. menggunakan 5 Whys untuk menemukan akar penyebab kecelakaan kerja. Metode 5M Analysis (*Man, Machine, Method, Material, Measurement*) juga membantu dalam mengidentifikasi faktor penyebab masalah. Studi ini menerapkan RCA, *diagram fishbone*, dan 5M Analysis untuk menganalisis kegagalan inverter dalam sistem *back up* daya di Gardu Induk Cibatu, dengan tujuan mengembangkan tindakan korektif dan pencegahan yang efektif.

2.2 Perencanaan metode penelitian

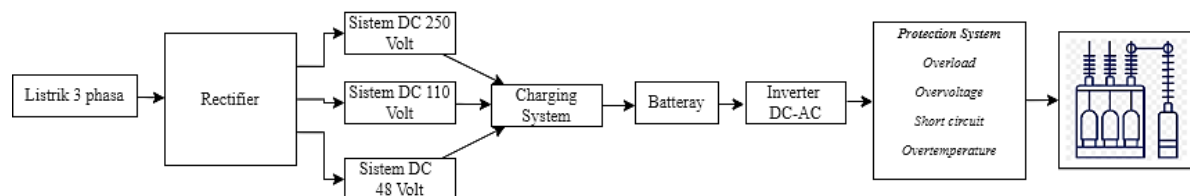
Kegiatan ini melibatkan proses RCA untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan inverter melalui langkah-langkah yang signifikan untuk mengungkap penyebab utama kegagalan inverter DC-AC sistem *back up* daya di gardu induk Cibatu.

2.3 Pengumpulan data

Kegiatan ini meliputi: a. inspeksi visual berisi pemeriksaan fisik terhadap *inverter* dan komponen terkait untuk mengidentifikasi kerusakan fisik dan tanda-tanda keausan, b. Analisis dokumentasi dengan tahapan pemeriksaan laporan pemeliharaan, catatan pengukuran operasional, dan dokumentasi teknis terkait untuk mendapatkan wawasan tentang kondisi operasional sebelumnya, masalah yang pernah terjadi, dan tindakan perbaikan yang telah dilakukan, dan c. wawancara dengan personel terkait yakni mengumpulkan informasi dari teknisi, operator, dan personel pemeliharaan mengenai pengalaman mereka dengan inverter, observasi terhadap insiden kebakaran, dan potensi masalah lainnya. Data yang terkumpul meliputi: sistem *Back Up* daya di gardu Induk Cibatu, komponen utama peralatan sistem DC, dan identifikasi permasalahan.

2.3.1 Sistem *Back Up* Daya di gardu Induk Cibatu

Di Gardu Induk, sumber DC merupakan alat bantu utama yang sangat diperlukan sebagai *supply* arus searah (*direct current*) yang dipasok oleh inverter atau *charger* tiga fasa maupun satu fasa yang dihubungkan dengan satu atau dua set baterai yang digunakan untuk peralatan-peralatan kontrol, proteksi, dan peralatan lainnya yang menggunakan sumber arus DC, baik untuk Gardu Induk dalam keadaan normal maupun dalam keadaan darurat (*emergency*). Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Sistem *Back Up* Daya di gardu Induk Cibatu

Di gardu induk Cibatu terdapat tiga sistem instalasi DC yang digunakan, yaitu sistem DC 250 V, 110 V, dan 48 V, yang masing-masing memiliki peran khusus untuk memastikan operasional gardu induk berjalan dengan optimal. Pertama, instalasi sistem DC 250 V digunakan untuk menyalurkan suplai listrik dari inverter atau *charger* tiga fasa yang terhubung dengan baterai. Sistem ini mengoperasikan berbagai peralatan kritis di gardu induk, seperti motor yang menggerakkan komponen mekanis, motor PMT dan PMS yang mengoperasikan pemutus tenaga utama dan siaga, serta relai proteksi yang menjaga sistem perlindungan bekerja dengan baik. Selain itu, instrumen yang mendukung fungsi pengukuran dan monitoring serta *tripping* dan *closing coil* yang memfasilitasi operasi pembukaan dan penutupan sirkuit listrik juga mendapatkan suplai dari sistem ini.

Kedua, sistem instalasi DC 110 V dirancang untuk menyalurkan suplai dari inverter atau *charger* yang terhubung dengan baterai dan digunakan untuk mengoperasikan peralatan yang memerlukan daya sedang, motor-motor PMT dan PMS, serta relai proteksi dan meter digital adalah beberapa peralatan yang menggunakan suplai dari sistem ini. Sistem ini juga memberikan daya untuk sinyal, alarm, dan indikasi serta *tripping* dan *closing coil* untuk operasi sirkuit yang lebih ringan.

Ketiga, sistem instalasi DC 48 V dirancang untuk aplikasi yang memerlukan daya lebih rendah namun sangat vital, seperti SCADA/RTU yang menyediakan daya untuk sistem kendali dan akuisisi data, serta teleproteksi unit yang mengoperasikan unit proteksi jarak jauh. Selain itu, sistem ini mendukung perangkat komunikasi seperti PLC, *continuous load* yang memerlukan suplai daya konstan, dan perangkat yang mengeluarkan alarm, sinyal, serta indikasi status operasional.

2.3.2 Komponen Utama Peralatan Sistem DC

Komponen utama peralatan sistem DC meliputi:

a. Rectifier/Charger

Charger atau bisa juga disebut dengan *rectifier* adalah suatu alat yang digunakan untuk mengubah arus AC menjadi arus DC. *Charger* juga digunakan untuk memberikan *charger current* pada baterai. *Charger* sebagai pengisi baterai selalu di hubungkan ke baterai agar kapasitasnya tetap terjaga penuh sehingga keandalan sumber DC pada Gardu Induk terjamin. *Rectifier* digunakan secara berkelanjutan ke beban, dan menjaga baterai dalam kondisi penuh, sehingga memastikan keandalan sistem cadangan daya. Umumnya *rectifier* yang terpasang di Gardu Induk berfungsi untuk mengisi muatan baterai, memasok daya secara kontinu ke beban dan menjaga baterai agar tetap dalam kondisi penuh.

b. Inverter

Alat ini berfungsi untuk mengubah menjadi arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Selain itu, alat ini juga berfungsi untuk memberikan arus pengisian pada baterai, sehingga memastikan bahwa baterai selalu siap digunakan sebagai sumber daya cadangan.

c. Baterai

Alat penyimpan energi listrik dalam bentuk arus searah. Fungsinya sebagai sumber cadangan sangat penting untuk menjaga kontinuitas suplai listrik ke berbagai beban di gardu induk, terutama saat terjadi gangguan pada suplai listrik utama. Konfigurasi baterai dalam sistem ini dirangkai secara paralel atau seri, tergantung pada kebutuhan tegangan dan kapasitas yang diperlukan untuk mendukung operasi sistem. Masing-masing konfigurasi memiliki karakteristik dan fungsi yang berbeda.

d. Konduktor

Komponen yang berfungsi untuk menghantarkan energi listrik arus searah dari *inverter/charger* atau baterai ke berbagai peralatan di gardu induk. Kualitas konduktor yang baik memastikan bahwa aliran listrik dapat terdistribusi dengan efisien dan minim kehilangan energi. Kabel yang menjadi penghubung sumber daya utama untuk sistem, menghubungkan unit kontrol dengan sumber listrik eksternal. Biasanya terbuat dari bahan tembaga berkualitas tinggi untuk memastikan konduktivitas optimal dan meminimalkan kehilangan energi.

e. Terminal-terminal

Merupakan titik percabangan dalam sistem distribusi listrik DC di mana energi listrik akan dikirim atau dibagi ke berbagai beban. Terminal-terminal ini memungkinkan penyaluran listrik secara teratur dan terarah ke berbagai komponen yang memerlukan daya, sehingga mendukung operasional yang optimal dari seluruh sistem di gardu induk.

2.3.3 Identifikasi Masalah

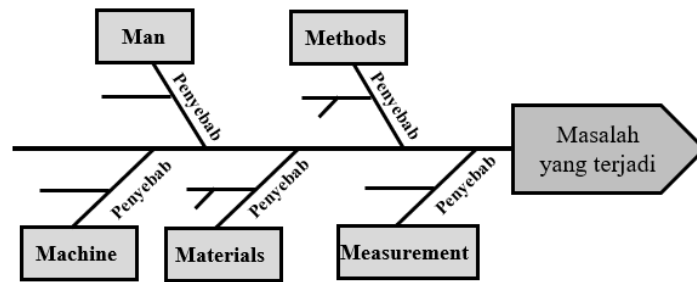
Penelitian ini mengidentifikasi dua isu utama yang mempengaruhi kinerja sistem, yakni penurunan tegangan dan kerusakan pada modul inverter. Inverter memainkan peranan penting dalam sistem penyaluran DC di Gardu Induk Cibat. Inverter ini menyediakan tegangan DC yang diperlukan untuk berbagai perangkat dan sistem operasional, dengan spesifikasi sebagai berikut:

- DC 48 V, tegangan ini digunakan untuk menyuplai berbagai perangkat kritis, termasuk SCADA/RTU, sistem tele-proteksi, unit komunikasi (PLC), unit *continuous load*, serta sistem alarm, sinyal, dan indikasi.
- DC 110 V, tegangan ini digunakan untuk menyuplai motor-motor (PMT dan PMS), relai proteksi, meter digital, serta sistem sinyal, alarm, indikasi *tripping*, dan *closing coil*.

Permasalahan utama yang teridentifikasi adalah penurunan tegangan pada inverter DC 48V unit 2. Penurunan tegangan ini menyebabkan ketidakstabilan dalam penyediaan daya untuk perangkat yang tergantung pada tegangan ini. Investigasi lebih lanjut mengungkapkan bahwa kerusakan ini disebabkan oleh salah satu komponen modul inverter yang terbakar akibat tegangan lebih. Kejadian ini tidak hanya mengakibatkan penurunan tegangan tetapi juga menyebabkan kerusakan yang lebih parah pada modul inverter, yang berakibat pada pembakaran unit tersebut. Penurunan tegangan dan kerusakan modul inverter ini menunjukkan perlunya tindakan perbaikan dan pemeliharaan lebih lanjut untuk memastikan keandalan dan stabilitas sistem penyaluran daya di Gardu Induk Cibat. Langkah-langkah perbaikan yang tepat harus diambil untuk mengatasi masalah ini dan mencegah terulangnya kerusakan serupa di masa depan.

2.4 Analisis data interpretasi

Kegiatan ini mencari penyebab utama akar permasalahan dengan menggunakan *diagram fishbone* atau analisis 5M. *Diagram fishbone*, juga dikenal sebagai diagram Ishikawa, membantu mengidentifikasi berbagai faktor atau penyebab masalah. *Diagram fishbone* 5M yang digunakan dalam basis penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram *Fishbone* Pemecahan Masalah

Gambar 2 menggambarkan analisis 5M yang mengidentifikasi lima faktor utama: *Man*, *Machine*, *Method*, *Material*, *Measurement* yang dapat menyebabkan kegagalan dalam sistem. Diagram *fishbone* atau analisis 5M digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan inverter secara sistematis. Gambar visualisasi diagram *fishbone* atau analisis 5M menjelaskan metode yang telah diterapkan. Adapun penjelasan dan tindakan terkait metode RCL 5M adalah sebagai berikut: *Man* (Manusia), peneliti melakukan tanya jawab dengan operator dan teknisi untuk memahami bagaimana *briefing* dilakukan dan mengevaluasi efektivitasnya dalam memulai pekerjaan. Observasi akan dilakukan untuk menilai bagaimana *knowledge sharing* diterapkan, dan apakah program pelatihan serta pendidikan (DIKLAT) sudah memenuhi kebutuhan peningkatan keterampilan teknisi. Selain itu, peneliti akan mengidentifikasi hambatan komunikasi yang dihadapi antar teknisi selama pemeliharaan inverter, serta mengamati bagaimana jadwal kerja disusun untuk mendukung pelaksanaan kegiatan seperti *knowledge sharing*. Selanjutnya, peneliti meneliti faktor *Machine* (Mesin) melalui observasi dan wawancara dengan teknisi dan manajemen. Peneliti mengevaluasi bagaimana mesin dipilih berdasarkan teknologi dan kapasitas beban yang sesuai untuk menjamin keandalan sistem. Investigasi mencakup identifikasi masalah seperti keausan, kegagalan komponen, dan kelemahan desain yang dapat mempengaruhi kualitas hasil. Diskusi dilakukan untuk memahami langkah-langkah yang telah diambil guna mengatasi masalah kapasitas beban mesin.

Pada faktor *Method* (Metode), peneliti melakukan sesi tanya jawab dengan operator dan supervisor untuk memahami prosedur pemeliharaan rutin di gardu induk. Observasi langsung dilakukan untuk memastikan bagaimana pelaporan hasil pemeliharaan kepada supervisor dilaksanakan dan mengevaluasi keefektifannya. Peneliti mengidentifikasi kesalahan umum dalam prosedur melalui wawancara dan mencari cara untuk menghindarinya. Praktik pemeliharaan menggunakan panel miniatur atau metode simulasi juga akan diamati untuk menilai efektivitasnya dalam meningkatkan keterampilan teknisi.

Untuk faktor *Material* (Bahan), peneliti melakukan observasi dan wawancara dengan teknisi untuk menentukan kriteria pemilihan bahan berkualitas yang digunakan di gardu induk. Investigasi dilakukan melalui *checklist* rutin pada setiap komponen untuk memantau kinerja sistem. Peneliti juga meneliti penyebab utama kegagalan sistem di gardu induk yang telah beroperasi lama dan berdiskusi dengan manajemen tentang solusi pencegahannya. Terakhir, dalam faktor *Measurement* (Pengukuran), peneliti mengamati bagaimana indikasi atau annunciator ditambahkan di panel kontrol untuk memantau kondisi metering inverter. Peneliti mengadakan tanya jawab dengan teknisi untuk memahami penggunaan metering digital dalam mengukur tegangan baterai dan parameter penting lainnya secara akurat. Observasi dilakukan untuk mengevaluasi risiko kesalahan pengukuran dalam kondisi online dan mencari cara untuk memastikan pengukuran yang tepat.

2.5 Penyusunan rekomendasi

Kegiatan ini terkait pemeliharaan dari pola analisis 5M yang menghasilkan rekomendasi untuk mengurangi kegagalan di masa yang akan datang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Data

Inverter memiliki komponen utama dalam sistem kinerjanya yaitu trafo yang berfungsi sebagai penurun tegangan AC 220/380 V menjadi 110/48 V. Seiring bertambahnya waktu, umur dari setiap peralatan yang ada pada Gardu Induk bertambah pula, sehingga permasalahan pada *inverter* DC 48V unit 2 yang mengalami kehilangan tegangan atau tegangan di bawah normal karena trafo *step-down* yang tidak bekerja sesuai fungsinya. Untuk menganalisis masalah ini, dilakukan beberapa langkah analisis data sebagai berikut:

1. Inspeksi Visual dilakukan terhadap *inverter* dan komponen-komponen terkaitnya untuk mengidentifikasi adanya kerusakan fisik, tanda-tanda keausan, atau kondisi operasional yang tidak biasa. Langkah ini penting untuk mendeteksi masalah yang mungkin tidak terlihat secara langsung namun berdampak pada kinerja *inverter*. Gambar 6 merupakan hasil pengambilan saat inspeksi visual modul *inverter*.



Gambar 6. Hasil inspeksi visual modul *inverter*

Gambar 6 hasil inspeksi visual menunjukkan warna hitam di pojok kanan atas modul *inverter*, yang disebabkan oleh terbakar salah satu komponen. Akibatnya, modul *inverter* DC 48V unit 2 mengalami pemanasan berlebihan dan tidak dapat menghasilkan tegangan.

2. Pemeliharaan

Pemeliharaan baterai dan sistem *charging* dilakukan untuk menjaga efisiensi operasi dan daya tahan peralatan pada Gardu Induk, khususnya baterai agar dapat bekerja sebagaimana semestinya, sehingga keandalan peralatan dan penyaluran tenaga. Pengukuran tegangan dilakukan pada setiap sel baterai untuk memastikan bahwa tegangan tersebut sesuai dengan standar yang ditetapkan. Untuk baterai dengan tegangan 110 VDC, setiap sel harus menunjukkan tegangan sekitar 1,40 VDC. Hal yang sama berlaku untuk baterai 48VDC. Pengukuran ini penting untuk memastikan bahwa baterai beroperasi dalam rentang tegangan yang sesuai. Pengukuran berat jenis elektrolit pada setiap sel baterai bertujuan untuk memeriksa konsentrasi elektrolit dan memastikan tidak adanya kebocoran. Selain itu, pemeriksaan juga dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan warna pada air elektrolit yang dapat mengindikasikan ketidaknormalan atau kerusakan pada sel baterai. Pengecekan ini membantu dalam mendeteksi masalah sebelum menjadi lebih serius. Pengisian air elektrolit dilakukan jika ditemukan penurunan volume air elektrolit di bawah level normal setelah pemeliharaan. Proses ini dilakukan secara rutin setiap minggu, atau lebih sering jika diperlukan. Selain itu, pemeliharaan ini juga melibatkan penanganan segera setelah terjadi gangguan pada sistem DC, baik pada baterai maupun *inverter*, untuk memastikan pasokan sumber DC tetap andal dan sistem berfungsi dengan optimal.

3. Wawancara dengan personel terkait dilakukan dengan teknisi operator dan personel pemeliharaan untuk memperoleh informasi mendalam mengenai pengalaman mereka dengan *inverter* serta observasi mereka terhadap insiden kegagalan. Informasi dari wawancara ini memberikan perspektif praktis mengenai bagaimana *inverter* beroperasi dan masalah yang mungkin tidak tercatat dalam dokumentasi resmi. Pertama, wawancara dengan teknisi operator menunjukkan bahwa teknisi tersebut hanya menjalankan tugasnya untuk mengontrol panel dan melakukan pemeliharaan rutin sesuai agenda mingguan yang telah ditetapkan. Tugas ini penting untuk menjaga keamanan sistem dan memastikan keandalannya di Gardu Induk. Dari hasil pemeliharaan dan pengukuran yang dilakukan, tidak ditemukan hasil yang berada di bawah standar SOP. Namun, terdapat masalah pada panel kontrol yang tidak dapat di-reset, meskipun kinerja pemeliharaan secara umum dinilai baik.

Kedua, wawancara dengan personel pemeliharaan mengungkapkan bahwa tugas mereka meliputi penyimpanan, pemeliharaan rutin, dan investigasi terhadap gangguan yang dapat mempengaruhi keandalan sistem. Personel pemeliharaan memperoleh informasi dari teknisi operator mengenai gangguan pada *inverter*. Pengecekan visual dan pemeliharaan rutin yang dilakukan menunjukkan hasil yang konsisten dan baik. Berdasarkan informasi yang didapat dari teknisi operator dan hasil pengecekan, personel pemeliharaan dapat mengidentifikasi bahwa indikasi masalah pada panel kontrol yang tidak dapat di-reset disebabkan oleh kegagalan *inverter*. Dengan demikian, personel pemeliharaan berhasil mengetahui sumber gangguan dan berusaha mencari solusinya.

Langkah (1) sampai (4) ini dirancang untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai penyebab penurunan tegangan dan membantu dalam menentukan tindakan perbaikan yang tepat untuk mengatasi permasalahan yang ada.

3.2 Analisis Penyebab Kegagalan

Data yang diperoleh dari inspeksi visual, analisis dokumentasi, dan wawancara diolah menggunakan alat bantu seperti *diagram fishbone* dan analisis 5M untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan. Analisis 5M diterapkan untuk mengidentifikasi lima faktor utama yang dapat menyebabkan kegagalan dalam sistem:

1. *Man* (Manusia)
Faktor manusia yang berperan dalam kegagalan *inverter* mencakup kurangnya komunikasi antar teknisi yang mengakibatkan kesalahan saat pemeliharaan dan perbedaan jadwal kerja yang menyulitkan pelaksanaan *knowledge sharing*. Rekomendasi meliputi pendampingan teknisi oleh supervisor, pembentukan tim untuk *knowledge sharing* secara *on line*, dan pelaksanaan DIKLAT secara internal di Gardu Induk.
2. *Machine* (Mesin)
Faktor mesin berhubungan dengan kondisi fisik *inverter* yang mengalami keausan, kegagalan komponen, dan kelemahan desain. Penting untuk memilih mesin dengan teknologi tinggi dan kapasitas besar untuk menjaga keandalan sistem dan mencegah *overload*.
3. *Method* (Metode)
Metode yang digunakan dalam pemeliharaan, pengoperasian, dan perbaikan *inverter* harus mengikuti prosedur yang tepat. Rekomendasi mencakup pengawasan manuver paralel oleh atasan dan penggunaan panel miniatur untuk praktik pemeliharaan, serta pelaporan hasil pemeliharaan kepada supervisor.
4. *Material* (Bahan)
Faktor bahan berkaitan dengan kualitas dan keandalan komponen *inverter*. Penggunaan bahan berkualitas tinggi dan penggantian *inverter* yang sudah tua dengan yang lebih modern dan canggih diperlukan untuk mencegah kegagalan dan memastikan sistem berfungsi dengan baik.
5. *Measurement* (Pengukuran)
Faktor pengukuran melibatkan kesalahan dalam pengukuran dan pemantauan kinerja *inverter*. Rekomendasi mencakup penambahan indikasi atau *annunciator* pada panel kontrol untuk mendeteksi metering *inverter* lemah dan pemasangan metering digital pada panel kontrol atau HMI untuk pengukuran tegangan dan berat jenis baterai.

3.3 Temuan Penelitian

Berdasarkan analisis 5M, penelitian ini menyoroti aspek material/bahan sebagai penyebab utama kegagalan *inverter* di Gardu Induk Cibatu. Dalam analisis ini, teridentifikasi bahwa penggunaan bahan berkualitas rendah dan usia komponen yang sudah tua merupakan faktor utama yang menyebabkan kegagalan *inverter*. Pertama, penggunaan bahan berkualitas rendah dalam pembuatan atau perakitan *inverter* menjadi salah satu penyebab utama masalah. Bahan yang tidak memenuhi standar kualitas dapat memengaruhi performa dan daya tahan *inverter*, berpotensi menyebabkan kerusakan yang signifikan pada sistem. Komponen yang terbuat dari bahan yang kurang baik cenderung mengalami keausan lebih cepat dan kegagalan fungsional lebih awal, mengakibatkan gangguan pada operasi sistem backup daya.

Kedua, usia komponen yang sudah tua juga berkontribusi terhadap kegagalan *inverter*. Seiring dengan berjalannya waktu, komponen-komponen *inverter* mengalami penurunan kinerja dan efisiensi. Komponen yang telah lama digunakan cenderung mengalami keausan dan kerusakan, yang pada gilirannya memengaruhi keandalan keseluruhan sistem *inverter*. Usia komponen yang sudah tua dapat menyebabkan kegagalan operasional dan mengurangi efektivitas *inverter* dalam mendukung sistem backup daya.

Ketiga, untuk mengatasi permasalahan ini, perbaikan dengan mengganti *inverter* dan komponen terkait dengan yang lebih modern dan berkualitas tinggi sangat diperlukan. *Inverter* yang lebih baru, yang dibuat dengan bahan berkualitas tinggi dan teknologi mutakhir, dapat meningkatkan keandalan sistem backup daya secara signifikan. Dengan mengganti komponen-komponen lama dengan yang lebih canggih, diharapkan performa dan daya tahan sistem dapat diperbaiki, mengurangi risiko kegagalan dan meningkatkan efisiensi operasional di Gardu Induk Cibatu.

Gardu Induk Cibatu dioperasikan sejak tahun 1996, menyebabkan banyak komponen, termasuk modul pada *inverter*, telah mencapai usia tua dan tidak dapat beroperasi dengan baik. Kualitas komponen yang buruk atau tidak sesuai dengan fungsinya juga berkontribusi terhadap kegagalan ini. Contoh konkret dari kegagalan ini dapat dilihat pada panel 500KV *synchronizing & common service +ES1100*, di mana indikator "*48V DC 2 board fault*" menyala dan tidak dapat di-*reset*. Pengukuran tegangan pada baterai 48 V menunjukkan penurunan tegangan di DC 48 V unit 2, menyebabkan indikator tetap menyala dan tidak bisa di-*reset*. Setelah pemeriksaan lebih lanjut, ditemukan kerusakan fisik pada modul *inverter* akibat salah satu komponen terbakar, menyebabkan *inverter* DC 48V unit 2 menjadi gosong dan tidak beroperasi.

Analisis ini menegaskan bahwa material berkualitas rendah dan komponen yang sudah tua adalah penyebab utama kegagalan *inverter*. Oleh karena itu, penggantian *inverter* dan komponen terkait dengan yang lebih modern dan berkualitas tinggi adalah langkah penting untuk meningkatkan keandalan sistem *back up* daya di Gardu Induk Cibatu.

3.4 Rekomendasi

Berdasarkan temuan penelitian, rekomendasi praktis disusun untuk meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem *back up* daya di Gardu Induk Cibat, yang mencakup beberapa hal.

1. Pemeliharaan perlu ditingkatkan dengan implementasi prosedur pemeliharaan yang lebih ketat dan terjadwal. Hal ini mencakup penjadwalan pemeliharaan rutin dan preventif untuk menghindari kerusakan yang tidak terduga serta memastikan bahwa semua komponen sistem berfungsi dengan baik.
2. Pengawasan atasan dalam pengoperasian manuver paralel antara *inverter* unit 1 dan unit 2 harus diperketat. Pengawasan ini penting untuk memastikan bahwa prosedur dijalankan dengan benar dan untuk mendeteksi serta mengatasi potensi masalah sebelum berkembang menjadi isu yang lebih besar.
3. Setelah pemeliharaan *inverter* dilakukan, penting untuk melakukan *briefing* dan evaluasi. *Briefing* ini bertujuan untuk menilai efektivitas pemeliharaan dan mendiskusikan hasilnya, sehingga area perbaikan dapat diidentifikasi dan pemeliharaan dapat dilakukan sesuai dengan standar yang ditetapkan.
4. Dalam hal pengembangan teknologi, mengganti *inverter* yang ada dengan model terbaru yang menggunakan teknologi canggih sangat dianjurkan. *Inverter* yang lebih baru biasanya menawarkan performa yang lebih baik dan fitur tambahan yang mendukung operasi yang lebih stabil.
5. Mesin yang dilengkapi dengan teknologi tinggi dan mampu menangani kapasitas besar harus dipilih untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas sistem. Pilihan mesin yang tepat akan meningkatkan daya tahan dan kinerja sistem secara keseluruhan.
6. Pembuatan metering digital yang dipasang pada panel kontrol atau HMI juga direkomendasikan. Metering digital akan memudahkan pemantauan dan pengelolaan sistem dengan memberikan data yang akurat dan *real-time* mengenai kondisi sistem, memungkinkan tindakan cepat jika terjadi gangguan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkap bahwa kegagalan *inverter* DC-AC pada sistem backup daya di Gardu Induk Cibat terutama disebabkan oleh penggunaan material berkualitas rendah, yang mengakibatkan penurunan performa dan keandalan sistem serta ketidakmampuan untuk bertahan dalam kondisi operasional yang berat. Selain itu, banyak komponen di gardu tersebut telah mencapai usia tua, termasuk modul *inverter* yang tidak lagi berfungsi optimal, sehingga meningkatkan risiko kegagalan sistem. Kerusakan fisik, seperti komponen yang terbakar pada modul *inverter*, menunjukkan dampak dari material berkualitas rendah dan menyebabkan gangguan pada keandalan sistem. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keandalan sistem *back up* daya di Gardu Induk Cibat, penting untuk memastikan penggunaan material berkualitas tinggi dan mengganti komponen yang sudah tua dengan yang lebih modern.

REFERENSI

- [1] N. Nurdiana, "Studi Keandalan Sistem Distribusi 20 kV Gardu Induk Talang Ratu Palembang," *Jurnal Ampere*, vol. 2, no. 1, 2017. <https://doi.org/10.31851/ampere.v2i1.1208>
- [2] S. M. Gunawan, J. Sentosa, "Analisa Perancangan Gardu Induk Sistem Outdoor 150 kV di Tallasa, Kabupaten Takalar, Sulawesi Selatan," *Jurnal Dimensi Teknik Elektro*, vol. 1, no. 1, hal. 37-42, 2013.
- [3] D. Saefulloh, A. Warsito, K. Karnoto, "Perencanaan Pengembangan Gardu Induk Untuk 10 Tahun Ke Depan," *Skripsi*, 2011, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, UNDIP.
- [4] B. Wei, A. Marzabal, J. Perez, R. Pinyol, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, "Overload and Short-circuit Protection Strategy for Voltage Source Inverter-based UPS," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 11, hal. 11371–11382, 2019, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2898165>
- [5] I. Cortés, X. Perpiñà, J. Urresti, X. Jordà, J. Rebollo, "Study of Layout Influence on Ruggedness of NPT-IGBT Devices by Physical Modelling," *Microelectronics Reliability*, vol. 52, no. 9–10, hal. 2471–2476, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.06.074>
- [6] H. Yamashika, S. Syafii, A. Adrianti, A. Aulia, "Literature review skema proteksi jaringan distribusi yang terhubung dengan pembangkit tersebar," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 22, no. 1, hal. 87, 2023. <http://dx.doi.org/10.24843/MITE.2023.v22i01.P11>
- [7] S. Peyghami, H. Wang, P. Davari, F. Blaabjerg, "Mission-Profile-Based System-Level Reliability Analysis in DC Microgrids," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 5, hal. 5055–5067, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2920470>
- [8] A. O'Connor, A. Mosleh, "A General Cause based Methodology for Analysis of Common Cause and Dependent Failures in System Risk and Reliability Assessments," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 145, hal. 341–350, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.06.007>
- [9] M. F. A. Muttaqin, "Analisis Gangguan Sistem Transmisi Listrik 150 kV Menggunakan Metode Root Cause Analysis (RCA)," *Skripsi*, Universitas Pendidikan Indonesia, 2018.
- [10] A. F. Fuadi, M. A. Sahbana, D. Hermawan, "Analisa Kebocoran Line Warming Up High Pressure Boiler Feed Pump menggunakan Metode Root Cause and Failure Analysis di Pembangkit Listrik Tenaga Gas &

- Uap Grati,” *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, vol. 11, no. 2, 2022. <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v11i2.2015>
- [11] J. D. Castro Castro, E. D. Cendales Ladino, “Casos Aplicados del Análisis de Causa Raíz: Revisión,” *Ciencia e Ingenieria Neogranadina*, vol. 29, no. 1, hal. 95–134, 2019. <https://doi.org/10.18359/rcin.3197>
- [12] S. S. Moosavi, A. Djerdir, Y. Ait-Amirat, D. A. Khaburi, A. N’Diaye, “Artificial Neural Network-Based Fault Diagnosis in the AC-DC Converter of the Power Supply of Series Hybrid Electric Vehicle,” *IET Electrical System in Transportation*, vol. 6, no. 2, hal. 96–106, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2014.0055>
- [13] N. Widyastuti, “Analisis Gangguan Sistem Transmisi Listrik Menggunakan Metode Root Cause Analysis,” *Industrial Engineering Online Journal*, vol. 3, no. 3, hal. 1–8, 2014.
- [14] A. Kuswardana, N. Eka, H. Natsir, “Analisis Penyebab Kecelakaan Kerja Menggunakan Metode RCA (Diagram *fishbone* Method And 5 – Why Analysis) di PT. PAL Indonesia,” *dalam Conference on Safety Engineering and Its Application*, vol. 1, no. 1, hal. 141–146, 2017.