

PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI KINERJA PANEL SURYA UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN SISTEM

DESIGN OF A SOLAR PANEL PERFORMANCE PROTECTION SYSTEM TO ENHANCE SYSTEM RELIABILITY

Oleh :

Jagad¹, Nobert Sitorus², Juli Iriani³, M. Syahrudin⁴, Moh Zainul Haq⁵

¹Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan

^{2,3,4,5}Program Studi Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan

jagad@student.polmed.ac.id¹, nobersitorus@polmed.ac.id², juliiriani@polmed.ac.id³,

msyahrudin@polmed.ac.id⁴, zainulhaq@polmed.ac.id⁵

Abstract

This research has a long-term goal of improving the reliability and efficiency of solar panel systems. The specific target of this activity is to design and build a solar panel protection system that is able to detect and respond to abnormal conditions such as overcurrent, short circuit, reverse polarity, overcharge, and overdischarge in real-time. The methods used include literature studies, protection system hardware and software design, experimental system performance testing, and data analysis to evaluate system effectiveness. This activity plan is expected to produce a prototype of an adaptive and data-driven solar panel protection system to support the reliability of renewable energy systems, especially in the context of education and small to medium-scale applications.

Keywords: Protection system, Solar Panel, Real-Time Monitoring, Solar Energy, Reliability System

Abstrak

Penelitian ini bertujuan jangka panjang untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem panel surya. Target khusus dari kegiatan ini adalah merancang dan membangun sistem proteksi panel surya yang mampu mendeteksi dan merespons kondisi abnormal seperti *overcurrent*, *short circuit*, *reverse polarity*, *overcharge*, dan *overdischarge* secara *real-time*. Metode yang digunakan mencakup studi literatur, perancangan perangkat keras dan lunak sistem proteksi, pengujian kinerja sistem secara eksperimental, serta analisis data untuk mengevaluasi efektivitas sistem. Rencana kegiatan ini diharapkan menghasilkan suatu prototipe sistem proteksi panel surya yang adaptif dan berbasis data untuk mendukung keandalan sistem energi terbarukan, khususnya dalam konteks pendidikan dan aplikasi skala kecil hingga menengah.

Kata Kunci: Sistem Proteksi, Panel Surya, Pemantauan *Real-Time*, Energi Surya, Keandalan Sistem

1. PENDAHULUAN

Energi surya merupakan salah satu pilar utama dalam transisi energi global menuju sumber energi bersih, terbarukan, dan ramah lingkungan. Pemanfaatan sel surya untuk mengonversi radiasi matahari langsung menjadi energi listrik melalui prinsip efek fotovoltaiik telah diterapkan secara luas, baik untuk skala rumah tangga maupun industri. Berdasarkan analisis efisiensi penggunaan energi alternatif, integrasi sistem fotovoltaiik terbukti menawarkan penghematan biaya investasi jangka panjang serta penurunan emisi karbon yang signifikan jika dibandingkan dengan generator fosil konvensional seperti genset. Di wilayah khatulistiwa seperti Indonesia, potensi ini sangat melimpah dengan rata-rata durasi penyinaran efektif mencapai 4 hingga 6 jam per hari dan intensitas radiasi di atas 4 kWh/m² harian, menjadikannya opsi andalan untuk daerah terpencil maupun perkotaan (Purwoto, Huda, Teknik, Surakarta, & Surya, 2000).

Meskipun memiliki potensi ekologis dan ekonomis yang besar, sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sangat rentan terhadap gangguan teknis operasional. Paparan fluktuasi cuaca ekstrem, kesalahan instalasi kabel, degradasi material, serta beban berlebih dapat memicu kondisi abnormal

seperti lonjakan arus (*overcurrent*), tegangan lebih (*overvoltage*), suhu berlebih (*overtemperature*), arus balik malam hari (*reverse current*), pengisian berlebih (*overcharge*), hingga pengosongan berlebih (*overdischarge*) pada elemen penyimpan daya. Gangguan-gangguan tersebut apabila tidak diisolasi dengan cepat dapat menyebabkan kerusakan permanen pada komponen vital seperti modul fotovoltaik, *solar charge controller*, dan inverter, bahkan mampu memicu bahaya keselamatan serius berupa kebakaran sirkuit akibat panas berlebih (Djulihenanto, Saputra, Luthfi, & Nabel, 2025).

Kebutuhan akan media pembelajaran interaktif berupa trainer kit PLTS menjadi sangat krusial dalam lingkup pendidikan teknik energi terbarukan guna membekali mahasiswa dengan keahlian praktis. Namun, sebagian besar trainer kit edukasional yang tersedia saat ini belum dilengkapi dengan sistem proteksi multi-layered yang memadai, sehingga rentan mengalami kerusakan dini akibat kesalahan pengawatan (*wiring error*) yang dilakukan oleh praktikan selama proses simulasi. Kondisi ketidaktersediaan sistem pengaman otomatis ini membatasi pemahaman mahasiswa mengenai dinamika gangguan sistem tenaga listrik yang sebenarnya.

Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada perancangan dan implementasi sistem proteksi komparatif yang mengintegrasikan pengaman elektromekanis dan pengaman cerdas berbasis data *real-time* pada *trainer kit* PLTS. Dengan menerapkan koordinasi pengamanan antara *Miniature Circuit Breaker* DC pada sisi generator, fuse DC sebagai backup pengaman hubung singkat, *Solar Charge Controller* berbasis *Maximum Power Point Tracking* untuk manajemen baterai, serta MCB AC pada sisi beban inverter, keandalan operasional sistem dapat ditingkatkan secara signifikan. Eksperimen ini memformulasikan parameter proteksi secara presisi guna menghasilkan prototipe pengaman yang adaptif, andal, dan mendemonstrasikan perilaku respon transien terhadap gangguan kelistrikan secara transparan untuk kebutuhan edukasi dan aplikasi praktis skala menengah.

2. TINJAUAN TEORITIS

Sel surya bekerja berdasarkan fenomena efek fotovoltaik, di mana energi radiasi matahari dikonversi secara langsung menjadi energi listrik arus searah (DC) melalui material semikonduktor. Intensitas radiasi matahari yang diterima di permukaan bumi pada kondisi cuaca cerah berkisar di angka 1000 W/m², dengan fluktuasi harian yang dipengaruhi oleh letak geografis, kondisi awan, dan waktu lokal (Purwoto et al., 2000).

Ketika foton cahaya matahari mengenai permukaan semikonduktor dengan energi yang lebih besar dari sela pita (*bandgap energy*), elektron pada pita valensi akan tereksitasi menuju pita konduksi, meninggalkan *hole* pada pita valensi (Anugerah Putra et al., 2021). Pemisahan pembawa muatan ini pada sambungan p-n (*p-n junction*) menghasilkan beda potensial listrik yang mendorong aliran arus DC melalui sirkuit eksternal.

Karakteristik output dari panel surya direpresentasikan oleh kurva hubungan arus dan tegangan (*I-V Curve*). Parameter krusial yang menentukan efisiensi konversi sel surya mencakup tegangan sirkuit terbuka V_{oc} , arus hubung singkat I_{sc} , tegangan pada titik daya maksimum V_{mp} , dan arus pada titik daya maksimum I_{mp} . Peningkatan intensitas cahaya secara linier akan menaikkan arus keluaran, sedangkan kenaikan suhu sel justru menurunkan tegangan keluaran akibat peningkatan laju rekombinasi pembawa muatan.

Jenis panel surya yang umum digunakan meliputi tipe monokristal (*monocrystalline*) yang menawarkan efisiensi tinggi sebesar 15-20% namun sensitif terhadap pembayangan, tipe polikristal (*polycrystalline*) dengan susunan kristal acak berbiaya rendah, serta tipe lapisan tipis (*thin film*) yang fleksibel (Purwoto et al., 2018).

Sistem proteksi kelistrikan dirancang untuk mengisolasi kondisi abnormal secara cepat dan sensitif agar kerusakan peralatan dapat diminimalisasi. Gangguan arus lebih (*overcurrent*) diklasifikasikan menjadi dua fenomena fisik, yaitu beban lebih (*overload*) dan hubung singkat (*short circuit*) :

1. Beban Lebih (*Overload*), terjadi ketika arus yang mengalir pada sirkuit melebihi arus nominal komponen secara terus-menerus dalam durasi yang lama. Akumulasi panas akibat disipasi daya pada kabel dapat dihitung menggunakan persamaan :

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

Di mana I adalah arus yang mengalir dalam satuan Ampere dan R merupakan resistansi kabel dalam satuan Ohm. Kenaikan suhu yang melebihi batas isolasi konduktor ($>70^\circ\text{C}$) dapat melelehkan selubung polimer dan memicu kebakaran. Pemilihan kapasitas hantar arus (KHA) kabel harus memperhatikan faktor keamanan (Safety Factor atau SF) dengan rumus :

$$I_{\text{kabel}} \geq I_{\text{beban}} \times \text{SF}$$

Di mana SF umumnya berkisar antara 1.25 hingga 1.50.

2. Hubung Singkat (*Short Circuit*), kondisi ketika dua konduktor dengan perbedaan potensial terhubung langsung tanpa melalui beban, sehingga resistansi sirkuit total mendekati nol. Sesuai Hukum Ohm, arus hubung singkat (I_{sc}) melonjak sangat tinggi :

$$I_{\text{sc}} = \frac{V}{R_{\text{sc}}}$$

Di mana R_{sc} adalah resistansi jalur hubung singkat. Arus transien yang ekstrim ini memicu gaya elektromagnetik besar dan kenaikan suhu instan yang dapat melelehkan terminal konektor dalam hitungan milidetik.

Guna mengatasi gangguan tersebut, *Miniature Circuit Breaker* menggabungkan dua prinsip kerja pengamanan dalam satu perangkat. Proteksi termal menggunakan elemen bimetal yang melengkung akibat perbedaan koefisien muai panas saat dilewati arus overload secara kontinu, yang kemudian mendorong tuas mekanis untuk memutuskan kontak sirkuit. Sebaliknya, proteksi magnetik memanfaatkan koil elektromagnetik (*solenoid*) yang menghasilkan medan magnet kuat secara instan saat dilewati arus hubung singkat tinggi, menarik tuas trip secara cepat dalam hitungan milidetik (Riyadi, 2018).

Penggunaan MCB pada sirkuit DC memerlukan konstruksi ruang pemadam busur api (*arc chute*) khusus karena arus DC tidak memiliki titik lintang nol (*zero-crossing*) alami seperti arus AC, sehingga busur api yang terbentuk saat pemutusan kontak cenderung lebih bertahan lama dan destruktif.

Baterai sebagai media penyimpanan energi pada sistem PLTS mandiri (*off-grid*) memerlukan manajemen pengisian daya yang ketat guna mencegah degradasi dini. Dua kondisi kritis yang harus dihindari adalah pengisian berlebih (*overcharge*) dan pengosongan berlebih (*overdischarge*) :

1. Pengisian Berlebih (*Overcharge*), terjadi ketika energi pengisian yang masuk melebihi kapasitas penyerapan sel baterai ($E_{\text{in}} > E_{\text{bat}}$), atau saat tegangan pengisian aktual melampaui tegangan maksimum yang direkomendasikan pabrikan ($V_{\text{charge}} > V_{\text{max}}$), serta arus pengisian melebihi batas laju *C-rate* ($I_{\text{charge}} > I_{\text{charge_max}}$). Pada baterai *Lead-Acid*, *overcharge* memicu elektrolisis air di dalam larutan elektrolit yang menghasilkan gas hidrogen dan oksigen yang mudah meledak, serta mempercepat korosi grid. Pada baterai Lithium (*LiFePO₄*), tegangan pengisian berlebih dapat merusak struktur kristal katoda, memicu deposisi logam lithium bebas yang berujung pada hubungan singkat internal dan pelarian termal (*thermal runaway*).

2. Pengosongan Berlebih (*Overdischarge*), terjadi apabila energi yang ditarik oleh beban melebihi kapasitas efektif baterai ($E_{load} > E_{bat} \times DoD_{max}$), atau tegangan akhir baterai turun di bawah tegangan minimum pelepasan ($V_{bat_end} < V_{min}$). Kondisi ini memicu proses sulfatasi permanen pada baterai *Lead-Acid*, di mana kristal timbal sulfat yang kasar terbentuk pada plat aktif dan menurunkan kapasitas baterai secara drastis. Pada baterai *Lithium*, *overdischarge* yang parah melarutkan kolektor arus tembaga ke dalam elektrolit, menyebabkan kerusakan sel permanen yang membuat baterai tidak dapat diisi ulang dengan aman.

Solar Charge Controller dengan algoritma pengisian MPPT bertindak sebagai pengatur aliran arus pengisian secara *real-time*. Saat baterai mendekati kapasitas penuh, SCC akan membatasi arus pengisian dan menstabilkan tegangan pada tahap *absorption* serta *float*. Sebaliknya, jika tegangan baterai turun mendekati batas minimum, SCC akan mengaktifkan fungsi *Low Voltage Disconnect* (LVD) untuk memutus aliran arus menuju beban AC/DC secara otomatis demi mempertahankan kesehatan baterai (*State of Health*) (Mafirli, Anggraini, & Hariyadi, 2025).

3. METODE PENELITIAN

Konstruksi fisik trainer kit PLTS dirancang dengan memisahkan area interaksi pengguna pada papan depan (*front panel*) dan area penempatan komponen berat pada bagian bawah sasis (*bottom frame*). Pemisahan ini bertujuan untuk menjaga titik berat *trainer* tetap berada di bagian bawah guna meningkatkan kestabilan struktural saat dipindahkan.

Papan depan trainer kit PLTS yang berdimensi lebar 1.50 m, tinggi 1.30 m, dan kedalaman sasis 0.50 m memajang komponen interaktif dan monitoring pengukuran. Di bagian atas papan terpasang unit MPPT *Hybrid Inverter* dan Inverter stand-alone berdampingan dengan unit MPPT *Solar Charge Controller*.

Di bawah baris inverter, dipasang modul pengukuran berupa Watt Meter DC dan Watt Meter AC yang berdampingan dengan *display Controller Monitoring AC* dan *Controller Monitoring DC*. Di bagian tengah dipasang sirkuit *transfer* berupa *Automatic Transfer Switch* (ATS) serta unit *Timer AC* untuk menyimulasikan penjadwalan beban.

Sirkuit pengaman utama yang terdiri dari MCB DC dan beberapa MCB AC diletakkan pada posisi yang mudah dijangkau di bagian tengah papan. Pada area bawah papan depan diletakkan beban-beban representatif yang meliputi Lampu AC, Lampu DC, Kotak Kontak AC, Motor Listrik, Kipas AC, dan Kipas DC.

Selain itu, terdapat unit *Controller Box* Sudut Panel Surya yang terhubung ke aktuator fisik untuk mengubah orientasi sudut elevasi panel surya secara mekanis demi mendapatkan sudut datang radiasi matahari maksimum.

Bagian bawah sasis *trainer* difungsikan untuk menampung komponen dengan bobot berat dan dimensi besar guna mendukung kestabilan mekanis *trainer*. Area ini menampung Bank Baterai LiFePO₄ (12.8 V, 24 Ah) dan dua unit Baterai Lead-Acid Solana (12 V, 12 Ah) yang diletakkan dalam kompartemen pelindung khusus.

Di samping kompartemen baterai, dipasang Motor Listrik 1 Fasa berdaya 125 Watt yang bertindak sebagai beban induktif utama sisi AC. Kawat penghantar berarus tinggi dari baterai menuju inverter di bagian atas dihubungkan menggunakan kabel serabut NYAF berpenampang 6 mm² melalui pipa pelindung sirkuit guna meminimalkan rugi-rugi tegangan (*voltage drop*) serta mencegah kerusakan akibat gesekan mekanis.

Sistem sirkuit kelistrikan trainer dirancang fleksibel untuk dioperasikan dalam dua mode utama melalui konfigurasi jack banana di papan depan, yaitu Mode *Off-Grid* (Mandiri) dan Mode *On-Grid/Hybrid*.

Pada Mode *Off-Grid*, aliran daya dimulai dari panel surya 100 Wp yang menghasilkan arus DC melalui sirkuit kabel khusus menuju terminal input MCB DC. Setelah melewati MCB DC, daya dialirkan ke terminal pengisian modul *Solar Charge Controller* (SCC) MPPT. SCC MPPT mengatur proses pengisian daya ke bank baterai (*LiFePO4* atau *Lead-Acid Solana*) dengan memantau tegangan sel secara *real-time*.

Output beban DC dari controller dihubungkan langsung untuk menyalakan beban Lampu DC dan Kipas DC. Untuk menyuplai beban AC, daya DC dari terminal baterai disalurkan menuju input Inverter 1000 W menggunakan kabel NYAF 6 mm². Output tegangan AC 220 V dari inverter dilewatkan terlebih dahulu pada MCB AC 1 A sebelum didistribusikan ke beban AC melalui sirkuit kontrol Timer AC.

Pada Mode *On-Grid/Hybrid*, terminal output AC dari Inverter Hybrid dihubungkan secara paralel dengan sumber listrik PLN melalui unit *Automatic Transfer Switch* (ATS). ATS memantau ketersediaan fasa dari kedua sumber daya secara terus menerus.

Ketika baterai berada dalam kondisi *State of Charge* (SoC) tinggi, ATS mengarahkan suplai daya utama ke beban AC berasal dari inverter. Namun, apabila terjadi penurunan tegangan baterai hingga menyentuh batas LVD atau inverter mengalami trip akibat beban lebih, ATS secara otomatis memindahkan sirkuit beban AC ke jaringan PLN dalam waktu kurang dari 20 ms untuk menjaga kontinuitas suplai daya.

Seluruh parameter arus dan tegangan pada sirkuit AC ini dibaca secara *real-time* oleh sensor PZEM-004T yang terhubung ke modul NodeMCU ESP8266 untuk ditransmisikan ke server monitoring berbasis IoT.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian eksperimental terhadap keandalan MCB DC berkapasitas nominal 10 A dilakukan dengan menyimulasikan arus beban lebih menggunakan injeksi arus variabel secara terkontrol. Hasil pengukuran waktu trip pemutusan dicatat secara sistematis pada tabel berikut ini.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Waktu Trip Pemutusan di catat secara Sistematis

No.	Kondisi Arus Sirkuit	Arus Pengujian (A)	Rasio Arus terhadap Nominal (I/I_n)	Karakteristik Waktu Trip	Status Aktivasi Sistem Proteksi
1.	Operasional Normal	5.5 A	$0.55 \times I_n$	Tidak Trip	Sistem beroperasi kontinu tanpa gangguan
2.	Batas Rating Maksimal	10.0 A	$1.00 \times I_n$	Tidak Trip	MCB bertahan secara konstan pada batas nominal
3.	Overload Tingkat Rendah	12.0 A	$1.20 \times I_n$	> 3600 Detik	Trip lambat, bimetal mulai memanaskan perlahan
4.	Overload Tingkat Sedang	15.0 A	$1.50 \times I_n$	600 – 800 Detik	Trip termal aktif akibat defleksi bimetal
5.	Hubung Singkat Ringan	20.0 A	$2.00 \times I_n$	4-20 Detik	Transisi cepat antara termal dan elektromagnetik
6.	Hubung Singkat Kritis	50.0 A	$5.00 \times I_n$	< 0.1 Detik	Trip instan dipicu oleh gaya koil magnetik

Analisis data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa MCB DC 10 A tipe kurva C bekerja sangat presisi sesuai dengan standar pengujian IEC 60947-2 (Riyadi, 2018). 1 Ketika arus beban berada pada level 12.0 A ($1.20 \times I_n$), MCB tidak langsung memutus aliran sirkuit karena akumulasi panas pada bimetal membutuhkan waktu pemuatan yang cukup lama.

Karakteristik waktu tunda (*time-delay*) pemutusan termal ini sangat penting pada sistem PLTS untuk mencegah pemutusan sirkuit yang tidak perlu (*nuisance tripping*) akibat lonjakan arus sesaat (*transient spike*) yang disebabkan oleh fenomena *cloud enhancement*.

Namun, saat terjadi kondisi hubung singkat kritis dengan arus gangguan mencapai 50 A ($5.00 \times I_n$), koil elektromagnetik langsung menghasilkan gaya magnet kuat yang menarik pelat trip secara seketika (< 0.1 detik), mengisolasi sirkuit sebelum terjadi kerusakan termal pada kabel penghantar.

Sirkuit beban AC diproteksi menggunakan MCB AC berkapasitas nominal 1 A tipe kurva C. Hasil pengujian waktu *trip* pemutusan pada berbagai kondisi kombinasi beban fisik disajikan pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Hasil Pengujian Waktu *trip* pemutusan pada berbagai kondisi kombinasi beban fisik

No.	Kombinasi Beban Fisik	Daya Aktif Total	Arus Pengujian (A)	Rasio Arus terhadap I_n	Karakteristik Waktu Trip	Hasil Observasi Lapangan
1.	Motor Listrik	100 W	0.45 A	$0.45 \times I_n$	Tidak Trip	Motor beroperasi stabil, inrush awal terlewati
2.	Lampu AC	15 W	0.068 A	$0.068 \times I_n$	Tidak Trip	Beban resistif murni berarus sangat rendah
3.	Kipas AC	22 W	0.10 A	$0.10 \times I_n$	Tidak Trip	Beban induktif kecil berjalan normal
4.	Seluruh Beban Aktif	137 W	0.62 A	$0.62 \times I_n$	Tidak Trip	Sirkuit bekerja stabil di bawah kapasitas nominal
5.	Overload Buatan I	264 W	1.20 A	$1.20 \times I_n$	> 3600 Detik	Kenaikan suhu bimetal belum cukup memicu trip
6.	Overload Buatan II	330 W	1.50 A	$1.50 \times I_n$	600-1800 Detik	Pemutusan termal mengamankan sirkuit inverter
7.	Overload Kritis	484 W	2.00 A	$2.00 \times I_n$	4-20 Detik	Pemutusan termal cepat dalam hitungan detik
8.	Hubung Singkat Beban	1320 W	> 5.00 A	$> 5.00 \times I_n$	< 0.1 Detik	Koil solenoid memutus sirkuit secara instan

Berdasarkan data tabel diatas, pengaktifan motor listrik satu fasa berdaya 100 W menarik arus kerja nominal sebesar 0.45 A. 1 Meskipun motor listrik memiliki karakteristik arus asut awal (*inrush current*) yang dapat melonjak hingga 3-5 kali lipat dari arus nominalnya, MCB AC 1 A tipe kurva C terbukti handal menoleransi lonjakan transien tersebut tanpa mengalami *nuisance tripping*.

Pada simulasi beban lebih berat (1.50 A), MCB AC berhasil memutuskan sirkuit dalam rentang waktu 10-30 Menit. Hal ini memberikan perlindungan termal yang memadai bagi inverter 1000 W dari kondisi panas berlebih akibat kelebihan beban AC.

Saat terjadi kondisi hubung singkat langsung pada kotak kontak yang menyimulasikan kegagalan isolasi beban, arus yang melonjak melebihi 5 A ($> 5.00 \times I_n$) diputus secara instan dalam waktu kurang dari 0.1 detik melalui mekanisme magnetik *trip*.

Fuse DC tipe *cartridge* kaca berkapasitas nominal 6 A diuji secara destruktif untuk mengetahui karakteristik leburnya sebagai pengaman hubung singkat cadangan pada sirkuit DC. Data hasil pengujian dicatat pada tabel ini.

No.	Kondisi Arus Sirkuit	Daya Operasional	Arus Saluran (A)	Persentase terhadap Rating	Karakteristik Waktu Lebur	Perilaku Fisik Elemen Lebur
1.	Beban Minimal	21 W	1.75 A	29%	Tidak Lebur	Elemen konduktor dalam kondisi dingin
2.	Beban Menengah	30 W	2.50 A	42%	Tidak Lebur	Keseimbangan termal konduktor terjaga
3.	Beban Maksimum Normal	50 W	4.17 A	68%	Tidak Lebur	Suhu kawat meningkat namun belum mencair
4.	Arus Batas Nominal	72 W	6.00 A	100%	Tidak Langsung Lebur	Kawat konduktor memerah perlahan (> 10 menit)
5.	Overload Arus Ringan	90 W	7.50 A	125%	1-30 Detik	Kawat konduktor mencair perlahan
6.	Overload Arus Tinggi	120 W	10.00 A	167%	< 5 Detik	Kawat langsung terputus akibat panas tinggi
7.	Hubung Singkat Ringan	360 W	30.00 A	500%	< 1 Detik	Kawat terputus instan dengan percikan kecil
8.	Hubung Singkat Parah	1500 W	> 100 A	1000%	< 0.1 Detik	Kawat terputus instan dengan percikan kecil

Data hasil pengujian lebur pada tabel tersebut, menunjukkan bahwa fuse DC 6 A bekerja murni berdasarkan prinsip disipasi panas Joule ($P = I^2 R$). Pada arus nominal 6 A, kawat logam di dalam fuse tidak langsung meleleh karena panas yang dihasilkan masih mampu didisipasikan oleh selubung kaca ke udara sekitar.

Namun, ketika arus diinjeksikan melebihi batas rating lebur, seperti pada level 100.00 A (167% dari rating), kawat konduktor meleleh hanya dalam waktu kurang dari 5 detik.

Pada simulasi hubung singkat parah dengan arus melebihi 100 A, kawat konduktor mengalami penguapan instan (< 0.1 detik), menghentikan busur api DC secara permanen. Pemasangan fuse DC secara seri setelah MCB DC ini sangat ideal berperan sebagai pengaman cadangan (*backup protection*) dengan sensitivitas tinggi untuk mengamankan sirkuit semikonduktor internal SCC MPPT.

Sistem proteksi terhadap siklus pengisian dan pengosongan baterai dikendalikan secara otomatis oleh *Solar Charge Controller* MPPT. Tabel selanjutnya menyajikan hasil pengukuran ambang batas tegangan pada saat kondisi penuh (*overcharge protection*) dan saat kondisi kosong (*overdischarge protection via Low Voltage Disconnect*) untuk kedua tipe baterai pembanding :

Tabel 3. Hasil Pengukuran Ambang Batas Tegangan pada Saat Kondisi Penuh dan Kondisi Kosong

Parameter Pengukuran Tegangan	Bank Baterai Lithium (LiFePO4) (12.8 V, 24 Ah)	Bank Baterai Lead-Acid Solana (12 V, 12 Ah)	Mekanisme Aksi Kontroler SCC
Ambang Tegangan Penuh (<i>Overcharge Cut-off</i>)	14.6 V - 14.8 V	14.4 V - 14.6 V	Memutus arus charging dari PV, masuk mode float
Ambang Tegangan Kosong (<i>Low Voltage Disconnect</i>)	11.0 V - 11.5 V	10.5 V - 11.0 V	Memutus sakelar output beban AC/DC secara otomatis

Eksperimen membuktikan keandalan algoritma kontrol pada SCC MPPT. Selama proses pengisian daya berlangsung, ketika tegangan baterai Solana terdeteksi menyentuh angka 14.4 V atau baterai LiFePO4 menyentuh 14.6 V, SCC langsung menghentikan fase pengisian arus konstan (*bulk charging*) dan beralih ke tahapan pengisian tegangan konstan (*absorption*) sebelum akhirnya menetap pada pengisian pemeliharaan (*float charging*). Langkah regulasi ini mencegah penguapan air elektrolit pada baterai *Lead-Acid* Solana serta menghindari kerusakan permanen pada sela-sela elektroda lithium.

Sebaliknya, pada proses pengosongan daya kontinu menggunakan beban Lampu DC 15 W dan Kipas DC, ketika tegangan baterai Solana turun menyentuh level kritis 10.5 V atau baterai LiFePO4 menyentuh 11.0 V, SCC secara otomatis memutus sirkuit beban (*Low Voltage Disconnect*).

Meskipun secara teoritis kapasitas energi baterai belum sepenuhnya habis (0%), tindakan pemutusan beban pada tegangan tersebut sangat krusial untuk mencegah fenomena *deep discharge*. Pencegahan ini berhasil menjaga *State of Health* (SoH) baterai Solana dari pengendapan kristal timbal sulfat permanen pada plat konduktornya.

Seluruh spesifikasi teknis dari koordinasi sistem proteksi terintegrasi pada rancangan *trainer kit* PLTS ini diringkas pada tabel berikut.

Tabel 4. Spesifikasi Teknis Sistem Proteksi *Trainer Kit* PLTS

No.	Parameter Proteksi	Spesifikasi Nilai Desain	Elemen Pengaman Utama	Tujuan Perlindungan Kelistrikan
1.	Daya Generator Modul	100 W	Modul Monocrystalline	Batas pembangkitan energi utama sirkuit
2.	Proteksi Arus Lebih DC	10 A, 250 VDC, 2-Pole	MCB DC Kurva C	Isolasi gangguan input sirkuit pengisian
3.	Proteksi Arus Lebih AC	1 A, 220 VAC, 1-Pole	MCB AC Kurva C	Proteksi sirkuit beban AC dari overload
4.	Proteksi Hubung Singkat	6 A, Cartridge Kaca	Fuse DC Cepat	Pengaman cadangan komponen sensitif SCC
5.	Pengaturan Pengisian	MPPT Automatic 12 V/24 V	Solar Charge Controller	Pencegahan overcharge dan overdischarge baterai

Tabel berikutnya menjabarkan karakteristik parameter pengujian lebih rinci untuk MCB DC 10 A dan MCB AC 1 A yang digunakan :

Tabel 5. Karakteristik Parameter Pengujian

No.	Karakteristik Teknis Pengaman	Nilai Parameter MCB DC	Nilai Parameter MCB AC	Standar Sertifikasi Industri
1.	Arus Nominal Pengenal (I_n)	10 A	1 A	IEC/EN 60947-2 (DC) & IEC 60898 (AC)
2.	Tegangan Operasional Kerja (U_e)	250 VDC	220 VAC	Batas isolasi tegangan kerja maksimum
3.	Breaking Capacity Pemutus	6 kA	6 kA	Batas arus hubung singkat maksimum tanpa merusak alat
4.	Tipe Kurva Karakteristik	Tipe C	Tipe C	Trip magnetik aktif pada rentang $5-10 \times I_n$
5.	Jumlah Kutub Pemutus (Poles)	2P	1P	Konfigurasi pengawatan sirkuit fasa-netral

Tabel selanjutnya, meringkas karakteristik teknis dari Fuse DC serta *Solar Charge Controller* yang diintegrasikan, yakni :

Tabel 6. Karakteristik Teknik dari Fuse DC serta SCC

No.	Parameter Komponen Proteksi	Spesifikasi Nilai Fuse DC	Spesifikasi Nilai SCC MPPT	Standar Sertifikasi Industri
1.	Arus Nominal Kerja	6 A (Lebur Cepat)	50 A (Arus Pengisian maks)	R. Nugroho (2021) & S. V. Patil (2024)
2.	Batas Tegangan Operasional	24 VDC	12 V / 24 V Auto-Sensing	Batas tegangan kerja sirkuit DC baterai
3.	Breaking Capacity Pemutus	10 kA	Tidak Berlaku	Kemampuan isolasi busur hubung singkat
4.	Parameter Daya Input Maksimum	Tidak Berlaku	750 W (12 V) / 1200 W (24 V)	Batas kapasitas generator PV terhubung

Koordinasi sirkuit proteksi berlapis ini menjamin keandalan pengoperasian trainer kit PLTS dalam jangka panjang. MCB DC bertindak sebagai gardu pengaman pertama di sisi hulu, diikuti oleh Fuse DC sebagai backup proteksi berkecepatan tinggi.

Di bagian tengah, *Solar Charge Controller* MPPT bertugas meregulasi kondisi operasional baterai dari bahaya degradasi elektrokimia internal akibat pengisian atau pengosongan daya ekstrem.

Di sisi hilir, MCB AC berkapasitas presisi 1 A memberikan jaminan perlindungan mutlak bagi inverter *Pure Sine Wave* dari potensi kegagalan hubung singkat atau beban lebih pada sirkuit distribusi beban konsumen.

Kehadiran modul monitoring IoT berbasis NodeMCU ESP8266 dan sensor PZEM-004T melengkapi sistem proteksi fisik ini dengan data pengawasan preventif. Pengguna dapat menganalisis parameter fluktuasi arus, tegangan, daya aktif, dan faktor daya secara *real-time* melalui dasbor monitoring, sehingga tindakan pencegahan gangguan dapat dilakukan sebelum sistem proteksi mekanis mengalami *trip* permanen.

5. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Sistem proteksi komparatif terintegrasi yang menggabungkan pengaman mekanis (MCB DC 10 A, MCB AC 1 A dan *Fuse* DC 6 A) serta regulasi cerdas berbasis SCC MPPT telah berhasil diimplementasikan dan terbukti andal melokalisasi sirkuit secara otomatis, di mana MCB AC/DC merespons trip sesuai karakteristik Tipe C menoleransi inrush current motor AC (0.45 A) sekaligus memutus hubung singkat tinggi secara instan (< 0.1 detik) sementara Fuse DC 6 A efektif memutus sirkuit dalam < 1 detik pada hubung singkat 30 A sebagai backup protection SCC, dan fitur pengisian SCC MPPT itu sendiri berhasil mencegah *overcharge* (14.6 V LiFePO₄ / 14.4 V *Lead-Acid*) serta pemutusan LVD (11.0 V LiFePO₄ / 10.5 V *Lead-Acid*) guna menjaga integritas elektrokimia baterai.

5.2. Saran

Pengembangan sistem ini direkomendasikan melalui peningkatan fungsi IoT berbasis NodeMCU ESP8266 dan sensor PZEM-004T menggunakan algoritma khusus untuk proteksi aktif secara nirkabel berkecepatan tinggi, penyediaan blok simulator gangguan terkendali yang aman untuk melatih analisis pemecahan masalah mahasiswa Teknik Listrik tanpa merusak alat praktikum, serta integrasi sensor suhu NTC thermistor eksternal pada *bank* baterai LiFePO₄ untuk memutus jalur pengisian secara otomatis saat suhu melebihi 45 °C guna mencegah bahaya *thermal runaway*.

DAFTAR PUSTAKA

- Antara, M. A. S., & Suteja, W. (2021). Analisis arus, tegangan, daya, energi, dan biaya pada sensor PZEM-004T berbasis NodeMCU ESP8266. *Patria Artha Technological Journal*, 5(1), 13–21.
- Anugerah Putra, B. (2021). Sistem proteksi arus beban lebih pada panel surya [Laporan Tugas Akhir, Politeknik Negeri Jakarta]. Repository Politeknik Negeri Jakarta.
- Djulihenanto, S., Saputra, M., Hermawan, S. L., Akbar, D. N., Gumilang, B. S., & Putri, A. W. (2025). Implementasi sistem proteksi arus dan tegangan lebih pada PLTS 10x100 Wp. *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 12(1), 49–54.
- Kustija, J., Surya, I., & Fahrizal, D. (2022). Design of automated power factor monitoring and repair tool for industry in real time based on Internet of Things. *International Journal of Science and Technology Research Archive*, 3(2), 106–115.

- Lestari, T. I., Nugroho, A., & Ningrum, A. P. (2025). Perancangan over voltage protection (OVP) pada instalasi pengisian aki. *Informatic and Elektronik Technology Journal*, 1(3), 27–36.
- Mafirli, R., & Anggraini, D. (2025). Design and analysis of a state of charge monitoring system for a solar-wind hybrid system using the Coulomb method. *Journal of Industrial Engineering & Management Research*, 6(1), 1–10.
- Purwoto, B. H., Jatmiko, J., Fadilah, M. A., & Huda, I. F. (2018). Efisiensi penggunaan panel surya sebagai sumber energi alternatif. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 18(1), 10–14.
- Yogestio, Y. (2022). Analisis karakteristik arus dan tegangan (I-V) panel surya berdasarkan suhu dan intensitas cahaya. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik Elektro*, 1(1), 1–8.
- Yuda, I. B. P. E. P. (2018). Rancang bangun solar charge controller dengan metode MPPT berbasis mikrokontroler Arduino Nano [Skripsi, Universitas Mataram]. Repository Universitas Mataram. <https://eprints.unram.ac.id/11071/>.