

Rancang Bangun Sistem Proteksi Otomatis pada Generator Turbin Gas dari Arus Berlebih dan Drop Tegangan Guna Meningkatkan Keandalan Operasional

I Made Dody Permana^{1*}, Antonius Edy Kristiyono², Achmad Dhany Fachrudin³

¹⁻³ Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal,
Politeknik Pelayaran Surabaya, Indonesia

*Penulis Korespondensi: madedodikpermana@gmail.com

Abstract. Gas turbine generators play an important role in providing electrical energy, especially in the maritime sector, but they are vulnerable to disturbances such as overcurrent and undervoltage, which can cause equipment damage. This study aims to design and test an automatic protection system based on the ESP32 microcontroller with the INA219 sensor to detect current and voltage, as well as a relay as a circuit breaker. The method used is an experimental approach including static and dynamic testing, both with and without a 5W AC lamp load as a simulation of real loading conditions. Test results show that the average sensor reading error is 2.65% for current and 1.76% for voltage, which is still within the $\pm 3\%$ tolerance limit. The system is able to disconnect the load when any parameter exceeds the protection threshold, although there are slight inconsistencies in the relay response due to sensor reading fluctuations. In conclusion, this automatic protection system is proven to be 85% accurate and responsive in maintaining the operational reliability of the gas turbine generator, making it applicable as a preventive solution against electrical disturbances in marine environments.

Keywords: Automatic Protection; ESP32; INA219 Sensor; Overcurrent; Undervoltage.

Abstrak. Generator turbin gas memiliki peran penting dalam penyediaan energi listrik, khususnya di sektor pelayaran, namun rentan terhadap gangguan seperti arus berlebih dan penurunan tegangan yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem proteksi otomatis berbasis mikrokontroler ESP32 dengan sensor INA219 untuk mendeteksi arus dan tegangan, serta relay sebagai pemutus rangkaian. Metode yang digunakan adalah pendekatan eksperimen meliputi pengujian statis dan dinamis, dengan dan tanpa beban lampu AC 5W sebagai simulasi kondisi pembebanan nyata. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata error pembacaan sensor adalah 2,65% untuk arus dan 1,76% untuk tegangan, masih dalam batas toleransi $\pm 3\%$. Sistem mampu memutus beban saat salah satu parameter melewati ambang proteksi, meskipun terdapat sedikit ketidaksesuaian pada respon relay akibat fluktuasi pembacaan sensor. Kesimpulannya, sistem proteksi otomatis ini terbukti 85% akurat dan responsif dalam menjaga keandalan operasional generator turbin gas, sehingga dapat diaplikasikan sebagai solusi preventif terhadap gangguan kelistrikan di lingkungan maritim..

Kata kunci: ESP32; Overcurrent; Proteksi Otomatis; Sensor INA219; Undervoltage.

1. LATAR BELAKANG

Generator turbin gas memegang peranan vital dalam penyediaan energi listrik pada kapal, karena mampu menghasilkan daya stabil untuk mendukung berbagai sistem kelistrikan. Meski demikian, perangkat ini rentan terhadap gangguan seperti arus berlebih (*overcurrent*) dan penurunan tegangan (*voltage drop*) yang dapat berdampak pada penurunan kualitas daya, penurunan efisiensi operasi, hingga kerusakan komponen. Standar IEC mendefinisikan overcurrent sebagai arus yang melebihi kapasitas nominal akibat beban berlebih, gangguan hubung singkat, atau kegagalan komponen, sedangkan voltage drop umumnya dipicu oleh beban berlebih dan sistem distribusi yang kurang optimal. Dalam

konteks kelistrikan kapal, kedua fenomena ini tidak hanya mengancam keandalan sistem, tetapi juga keselamatan operasional.

Permasalahan utama yang diangkat dalam penelitian ini adalah: (1) bagaimana merancang sistem proteksi otomatis pada generator turbin gas yang mampu mendeteksi dan merespons kondisi *overcurrent* serta *voltage drop* secara akurat, dan (2) bagaimana kinerja sistem tersebut jika diukur dari akurasi pembacaan arus dan tegangan serta respons relay pada kondisi pembebanan nyata.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem proteksi otomatis berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor INA219 sebagai detektor arus dan tegangan, serta relay sebagai pemutus rangkaian. Prototipe yang dihasilkan diuji melalui metode statis dan dinamis, baik pada kondisi tanpa beban maupun dengan beban lampu AC 5 W, guna mengevaluasi tingkat akurasi dan keandalan proteksi. Target akurasi ditetapkan dengan toleransi kesalahan pengukuran tidak lebih dari $\pm 3\%$ sesuai spesifikasi sensor.

Dibandingkan dengan penelitian terdahulu dalam yang fokus pada proteksi arus dan suhu, penelitian ini menawarkan kontribusi dengan penambahan deteksi tegangan secara real-time dan validasi hasil pembacaan sensor terhadap pengukuran manual. Pendekatan ini diharapkan menghasilkan sistem proteksi yang lebih komprehensif, mampu meningkatkan keandalan operasional generator turbin gas, dan memberikan referensi praktis untuk penerapan di sektor maritim maupun industri kelistrikan lain yang menggunakan generator berdaya besar.

2. KAJIAN TEORITIS

Sistem Proteksi

Sistem proteksi merupakan rangkaian peralatan yang berfungsi mendeteksi gangguan atau kondisi tidak normal pada sistem tenaga listrik, menentukan lokasinya, dan secara otomatis memutus beban untuk memisahkan bagian yang terganggu. Sistem ini juga memberikan sinyal peringatan berupa lampu, alarm, atau indikator lainnya. Salah satu jenisnya adalah proteksi arus beban lebih, yang melindungi mesin listrik dari kerusakan akibat panas berlebih ketika arus melebihi batas nominal. Berdasarkan standar dalam (A. Kiswanto et al., 2024), sistem ini bekerja dengan memutus rangkaian secara otomatis apabila arus yang mengalir melampaui batas pengaturan ($I_{\text{beban}} > I_{\text{setting}}$), dan tetap menyambungkan jika arus berada di bawah batas tersebut. Jenis lainnya adalah proteksi *voltage drop* atau *undervoltage*, yang digunakan untuk mencegah penurunan kualitas daya akibat tegangan yang turun di bawah ambang aman, biasanya disebabkan oleh sistem kabel yang buruk atau beban

berlebih. Penurunan tegangan dapat menyebabkan penurunan efisiensi, panas berlebih pada motor, dan kerusakan komponen, sehingga digunakan *voltage relay* yang secara otomatis memutus rangkaian jika tegangan berada di bawah nilai yang ditetapkan.

Generator Turbin Gas

Generator turbin gas menghasilkan listrik dengan memanfaatkan energi mekanik dari turbin gas yang digerakkan oleh gas panas. Proses ini melibatkan kompresi udara, pembakaran bahan bakar, dan penggerakan rotor generator melalui prinsip induksi elektromagnetik. Generator turbin gas memiliki efisiensi tinggi dan daya output besar, namun rentan terhadap gangguan seperti *overcurrent* dan *voltage drop*. Oleh karena itu, sistem proteksi yang efektif, seperti relay proteksi dan pemutus sirkuit, diperlukan untuk menjaga keandalan operasinya (Dwi D.S et al., 2022).

Sensor INA219

Sensor INA219 adalah alat untuk mengukur arus, tegangan, dan daya DC. Cara kerjanya dengan membaca selisih tegangan pada resistor kecil (*shunt*) untuk menghitung arus. Sensor ini terhubung ke mikrokontroler seperti Arduino melalui komunikasi I2C. INA219 mampu membaca tegangan hingga 26V dan arus sampai 3,2A dengan *error* maksimal $\pm 3\%$. Sensor ini banyak digunakan pada sistem monitoring baterai, panel surya, dan proyek IoT karena akurat dan mudah digunakan.

Relay

Relay adalah sebuah saklar otomatis yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Saat menerima sinyal kontrol bertegangan rendah dari perangkat seperti ESP32, kumparan di dalam relai akan menciptakan medan magnet untuk membuka atau menutup sirkuit daya. Mekanisme ini sangat efektif untuk mengendalikan perangkat berdaya tinggi karena mampu memberikan isolasi elektrik antara sirkuit kontrol dan sirkuit daya, sehingga dapat mengamankan mikrokontroler dari lonjakan arus atau tegangan yang berpotensi merusak.

ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler *System on a Chip* (SoC) yang sangat populer karena harganya terjangkau dan kaya fitur. Perangkat ini sudah memiliki prosesor dual-core, WiFi, dan Bluetooth terintegrasi, serta memori dan pin I/O yang melimpah (tersedia dalam versi 30/36 GPIO). Kemudahan pemrograman via Arduino IDE berkat port USB bawaan dan konektivitasnya yang andal menjadikannya sangat ideal untuk berbagai aplikasi *Internet of Things* (IoT) (A. Wagya dan Rahmad., 2021).

LCD

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan komponen penampil visual yang mampu menampilkan beragam data, mulai dari teks, angka, hingga simbol. Kelebihan ini menjadikannya solusi tampilan yang lebih rapi, menarik, dan serbaguna jika dibandingkan dengan LED tujuh segmen. Oleh karena itu LCD merupakan media keluaran yang paling sering diaplikasikan pada sistem berbasis mikrokontroler.

Keandalan Operasional

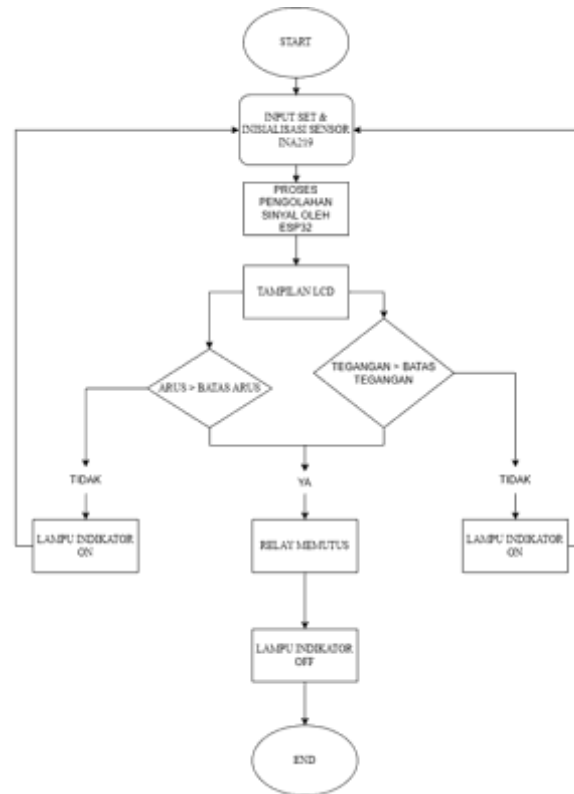
Keberhasilan sistem proteksi ini ditentukan oleh keandalan sensornya, dengan target error relatif tidak melebihi $\pm 3\%$ sesuai spesifikasi sensor INA219. Untuk menguji ini, prototipe dianalisis dengan membandingkan hasil pembacaan sensor arus dan tegangan terhadap pengukuran dari alat ukur digital. Perbedaan atau selisih data yang teramati kemudian digunakan untuk menghitung nilai error relatif menggunakan persamaan (1).

$$\%Error = (\text{Nilai Sebenarnya} - \text{Nilai Terbaca}) / (\text{Nilai Sebenarnya}) \times 100\% \quad (1)$$

Dengan Nilai Sebenarnya adalah hasil pembacaan alat ukur digital dan Nilai Terbaca adalah hasil pembacaan sensor.

3. METODE PENELITIAN

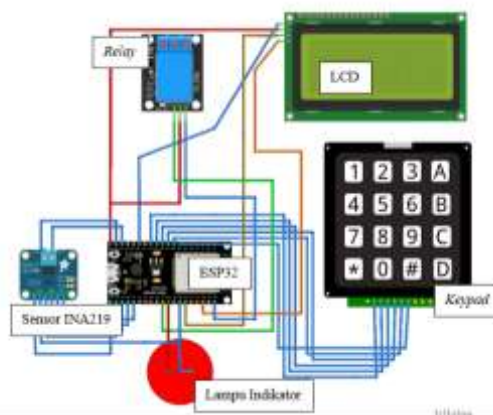
Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan metode studi kasus pada perancangan sistem proteksi otomatis untuk generator turbin gas. Objek penelitian adalah prototipe sistem proteksi berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor INA219 dan relay pemutus rangkaian. Pemilihan objek didasarkan pada kebutuhan proteksi terhadap arus berlebih (*overcurrent*) dan penurunan tegangan (*voltage drop*) secara *real-time*, khususnya pada aplikasi kelistrikan kapal. Pada perancangan, dimana program akan dimulai dengan menginisialisasi sensor, setelah menginisialisasi sistem akan aktif, input batas arus dan tegangan, apabila arus dan tegangan melebihi batas, maka Relay akan memutus aliran listrik dan lampu indikator akan mati seperti yang dapat ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan alir rancangan sistem proteksi.

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Rancangan perangkat keras sistem proteksi otomatis ini menunjukkan hubungan antar komponen utama, meliputi mikrokontroler ESP32, sensor INA219, relay pemutus rangkaian, sumber daya, dan beban uji. Sensor INA219 terhubung secara seri pada jalur keluaran generator untuk mengukur arus dan tegangan secara real-time. Data dari sensor dikirim ke ESP32 yang memprosesnya sesuai logika proteksi yang telah diprogram. Relay terhubung pada jalur beban untuk memutus aliran listrik jika parameter arus atau tegangan melampaui atau berada di bawah batas pengaturan, rancangan perangkat keras dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Rancangan perangkat keras alat.

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Data dikumpulkan melalui pengujian langsung pada prototipe dengan dua skenario utama, yaitu pengujian statis dan dinamis. Pengujian statis dilakukan untuk mengukur akurasi sensor pada kondisi tanpa perubahan beban, sedangkan pengujian dinamis dilakukan untuk mengamati respons sistem terhadap perubahan beban secara tiba-tiba. Beban uji menggunakan lampu AC 5 W, dan hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan pengukuran menggunakan multimeter digital sebagai acuan.

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif dengan membandingkan nilai arus dan tegangan dari sensor INA219 dengan hasil pengukuran manual, kemudian dihitung persentase kesalahan untuk menilai akurasi sistem. Selain itu, waktu respons relay terhadap kondisi overcurrent dan voltage drop diamati untuk mengevaluasi kecepatan kerja proteksi. Analisis ini digunakan untuk menilai keandalan sistem dalam kondisi operasional yang menyerupai lingkungan kerja nyata.

Prototipe alat monitoring dan pengendali beban ini dapat dilihat pada Gambar 3. Terlihat panel prototipe sistem proteksi otomatis generator yang terdiri dari relay sebagai pemutus arus otomatis, INA219 sebagai sensor arus dan tegangan, ESP32 sebagai pengendali utama, MPPT untuk pengaturan daya, dan MCB sebagai pemutus arus manual. Seluruh komponen dirakit dalam satu panel untuk memudahkan pengujian dan pemeliharaan.



Gambar 3. Prototipe sistem proteksi.
Sumber: Dokumentasi Pribadi

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan secara statis dan dinamis, Pengujian statis dilakukan untuk memverifikasi akurasi pembacaan sensor INA219 pada kondisi tanpa perubahan beban. Hasilnya menunjukkan bahwa perbedaan nilai arus dan tegangan antara sensor dan pengukuran manual menggunakan multimeter berada dalam rentang $\pm 3\%$. Hal ini mengindikasikan bahwa

sensor mampu memberikan data yang cukup akurat untuk digunakan sebagai basis keputusan proteksi. Akurasi ini sejalan dengan klaim spesifikasi sensor dan memastikan bahwa sistem dapat diandalkan untuk pemantauan parameter kelistrikan secara real-time dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Pengujian Sensor Arus dengan Multimeter

Tabel 1. Uji Sensor Arus dengan Multimeter.

Sensor Arus	Multimeter	Selisih	Error
0.75 A	0.78 A	0.03 A	3.84%
0.73 A	0.75 A	0.02 A	2.66%
1.06 A	1.10 A	0.04 A	3.63%
1.12 A	1.15 A	0.03 A	2.60%
1.22 A	1.25 A	0.03 A	2.40%
2.05 A	2.07 A	0.02 A	0.95%
1.19 A	1.22 A	0.04 A	2.45%
Rata-rata			2.65%

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Hasil pengujian arus disajikan dalam Tabel 1 data tersebut menunjukkan adanya perbedaan antara nilai yang dibaca oleh sensor arus dan hasil pengukuran multimeter, dengan tingkat eror rata-rata yang terhitung sebesar 2,65%.

Pengujian Sensor Tegangan dengan Multimeter

Tabel 2. Uji Sensor Tegangan dengan Multimeter.

Sensor Tegangan	Multimeter	Selisih	Error
4.4 V	4.5 V	0.1 V	2.22%
6.9 V	6.7 V	0.2 V	2.98%
8.2 V	8.3 V	0.4 V	1.20%
9.6 V	9.8 V	0.4 V	2.04%
12.7 V	12.8 V	0.1 V	0.78%
15.5 V	15.3 V	0.2 V	1.31%
Rata-rata			1.76%

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Hasil pengujian arus disajikan dalam Tabel 2 data tersebut menunjukkan adanya perbedaan antara nilai yang dibaca oleh sensor arus dan hasil pengukuran multimeter, dengan tingkat eror rata-rata yang terhitung sebesar 1,76%.

Pada pengujian dinamis, sistem diuji dengan perubahan beban mendadak menggunakan lampu AC 5 W. Sistem proteksi mampu merespons kondisi overcurrent maupun voltage drop dalam waktu singkat, memutus aliran listrik sebelum terjadi potensi kerusakan pada peralatan. Temuan ini mendukung prinsip kerja proteksi yang dijelaskan di [9], di mana waktu respons cepat sangat krusial untuk mencegah kerusakan lebih lanjut. Respons cepat ini menunjukkan bahwa kombinasi ESP32 dan INA219 efektif untuk deteksi simultan dua parameter gangguan utama. Pada Gambar 6 dapat dilihat saat pengujian sistem proteksi dengan beban lampu AC 5W.



Gambar 4. Pengujian dengan Beban Lampu.
Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pengujian sistem proteksi dengan beban lampu AC 5 W menunjukkan bahwa relay memutuskan beban secara otomatis untuk mencegah kerusakan, membuktikan mekanisme proteksi berfungsi sesuai rancangan. Batas proteksi ditentukan berdasarkan karakteristik beban menggunakan perhitungan arus normal dari rumus dasar daya listrik pada persamaan (2).

$$I = \frac{P}{V} \quad (2)$$

Dengan I adalah arus (A), P adalah daya beban (W), dan V adalah tegangan sistem (V). Jika daya lampu sebesar 5 W dan tegangan kerja sistem sebesar 20 V, maka besar arus yang dibutuhkan adalah:

$$I = \frac{5}{20} = 0,25 \text{ A}$$

Nilai arus ini merupakan kondisi kerja normal dari beban. Namun, karena pada saat start-up atau fluktuasi kecil bisa terjadi kenaikan arus sesaat, maka ditambahkan margin toleransi sekitar 30% [2]. Sehingga batas arus proteksi atau overcurrent yang disarankan adalah:

$$I_{\text{proteksi}} = 0,25 \text{ A} + (30\% \times 0,25 \text{ A}) = 0,325 \text{ A}$$

Untuk pembulatan dan keamanan tambahan, batas proteksi arus ditetapkan pada kisaran 0,35 hingga 0,4 A. Artinya, apabila arus yang mengalir ke beban melebihi nilai tersebut, maka sistem proteksi akan secara otomatis memutuskan beban untuk mencegah kerusakan. Pengujian dilakukan dengan batas proteksi untuk tegangan adalah 18,5V dan untuk arus adalah 0,35A, hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Data Pengujian 1 dengan Beban Lampu.

Tegangan	Arus	Daya	Status Relay	Status Lampu	Keterangan
18.6	0.29	5.39	OFF	Menyala	Sesuai
18.3	0.3	5.49	ON	Mati	Sesuai
18.5	0.36	6.66	ON	Mati	Sesuai
18.5	0.36	6.66	OFF	Menyala	Tidak
17.9	0.31	5.55	ON	Mati	Sesuai
18.2	0.36	6.55	OFF	Menyala	Tidak
18.5	0.28	5.18	OFF	Menyala	Sesuai
18.0	0.29	5.22	ON	Mati	Sesuai
18.6	0.36	6.7	ON	Mati	Sesuai
18.7	0.28	5.24	OFF	Menyala	Sesuai
Rata-rata Ketidaksesuaian					20%

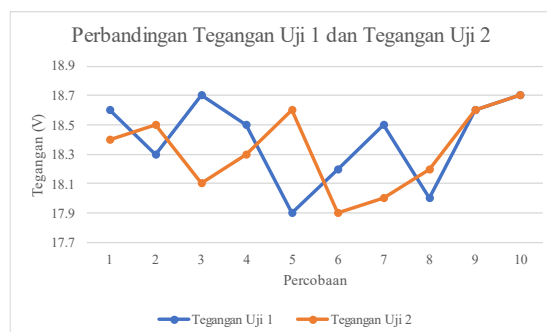
Sumber: Dokumentasi Pribadi

Tabel 4. Data Pengujian 2 dengan Beban Lampu.

Tegangan	Arus	Daya	Status Relay	Status Lampu	Keterangan
18.4	0.36	6.62	ON	Mati	Sesuai
18.5	0.29	5.37	OFF	Menyala	Sesuai
18.1	0.28	5.07	ON	Mati	Sesuai
18.3	0.36	6.59	ON	Mati	Sesuai
18.6	0.27	5.02	OFF	Menyala	Sesuai
17.9	0.31	5.55	ON	Mati	Sesuai
18.0	0.3	5.4	OFF	Menyala	Tidak
18.2	0.28	5.1	ON	Mati	Sesuai
18.3	0.34	6.2	ON	Mati	Sesuai
18.7	0.28	5.24	OFF	Menyala	Sesuai
Rata-rata Ketidaksesuaian					10%

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pengujian menunjukkan beberapa ketidaksesuaian fungsi proteksi. Pada pengujian pertama, hal ini terjadi saat arus melebihi batas proteksi pada percobaan ke-4 dan ke-6, namun relay tidak memutus beban. Pada pengujian kedua, ketidaksesuaian serupa terjadi pada percobaan ke-7, ketika tegangan berada di bawah batas proteksi namun sistem tidak merespons. Selain itu, nilai arus dan tegangan tidak konstan akibat fluktuasi sumber energi dari generator DC yang output-nya tidak sepenuhnya stabil, toleransi pengukuran sensor, serta variasi kecil pada hambatan dan kestabilan putaran mekanik. Perubahan ini wajar terjadi pada sistem uji terbuka yang tidak sepenuhnya terkontrol otomatis. Secara grafik dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.

**Gambar 5.** Grafik Perbandingan Tegangan Uji 1 dan Tegangan Uji 2.

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pada Gambar 7 adalah grafik perbandingan tegangan Uji 1 dan Uji 2 menunjukkan variasi nilai tegangan yang dihasilkan dari sepuluh kali percobaan. Secara umum, nilai tegangan berada di kisaran 17.9 V hingga 18.7 V, yang mendekati batas proteksi tegangan sistem sebesar 18.5 V. Tegangan Uji 1 cenderung memiliki fluktuasi yang lebih besar dibandingkan Uji 2, dengan nilai tertinggi mencapai sekitar 18.7 V dan titik terendah berada di kisaran 17.9 V pada percobaan ke-5 dan ke-8. Sementara itu, Tegangan Uji 2 relatif lebih stabil, meskipun juga menunjukkan penurunan pada percobaan ke-5 dan ke-6 sebelum kembali meningkat mendekati 18.5 V pada percobaan ke-10.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Arus Uji 1 dan Arus Uji 2.

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pada Gambar 8, grafik perbandingan arus Uji 1 dan Uji 2 menunjukkan fluktuasi nilai arus yang terjadi selama sepuluh kali percobaan. Secara umum, nilai arus berkisar antara 0.27 A hingga 0.36 A, dengan batas proteksi arus sistem ditetapkan pada 0.35 A. Arus Uji 1 menunjukkan pola yang cenderung lebih stabil dan mendekati batas proteksi pada beberapa titik, terutama pada percobaan ke-3, ke-4, dan ke-6 yang menyentuh angka 0.36 A. Sementara itu, Arus Uji 2 memiliki fluktuasi yang lebih tajam, dengan nilai minimum sekitar 0.27 A pada percobaan ke-3, ke-5, dan ke-10, serta nilai maksimum sebesar 0.36 A pada percobaan ke-1, ke-4, dan ke-9.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan analisis data pengujian, sistem proteksi generator DC terhadap gangguan arus dan tegangan berhasil dirancang untuk mendeteksi dan mengatasi kondisi arus berlebih serta penurunan tegangan pada generator turbin gas. Sistem ini memanfaatkan mikrokontroler dan sensor INA219 dengan logika pemutusan beban melalui

relay, sehingga mampu memberikan respons proteksi secara otomatis dan real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dari 20 kali percobaan dinamis, hanya terjadi 3 kali ketidaksesuaian, yang berarti akurasi proteksi mencapai 85%. Temuan ini membuktikan bahwa sistem yang dirancang efektif dalam meningkatkan keandalan operasional generator turbin gas karena mampu melindungi beban dari kondisi kelistrikan tidak normal secara cepat dan tepat.

Saran

Sistem proteksi generator DC yang dikembangkan dalam penelitian ini telah menunjukkan fungsionalitas yang baik, namun untuk meningkatkan potensi dan keandalan jangka panjang, diperlukan pengembangan lebih lanjut. Disarankan agar tampilan LCD dilengkapi dengan parameter tambahan seperti daya dan frekuensi agar informasi lebih komprehensif, serta sistem proteksi ditingkatkan dengan integrasi alarm auditif, misalnya buzzer bersuara keras, untuk mempercepat respons saat terjadi gangguan.

DAFTAR REFERENSI

- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *Standar nasional Indonesia: Persyaratan umum instalasi listrik (PUIL 2000)*. BSN.
- Banzi, M., & Shiloh, M. (2022). *Arduino IDE sebagai lingkungan pengembangan perangkat lunak untuk mikrokontroler Arduino*. O'Reilly Media.
- Berahim, H. (2020). *Teknik tenaga listrik dasar*. Graha Ilmu.
- Chapman, S. J. (2020). *Electric machinery and power system fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Dwi, D. S., Edy, E. K. A., & Prihastono. (2022). *Dasar-dasar sistem operasi permesinan kapal*. CV Jakad Media Publishing.
- Fikar, M., Yuana, H., & Wulansari, Z. (2022). Mikrokontroler ESP32 sebagai alat monitoring pintu berbasis web. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 6(2), 767–772. <https://doi.org/10.36040/jati.v6i2.5713>
- Hendrawan, A., Hasbi, M., & Rahman, N. (2022). Simulasi safety device overheat generator set engine berbasis Arduino. *Jurnal Intekna: Informasi Teknik dan Niaga*, 22(1), 18–24.
- Hughes, A. (2022). *Electric motors and drives: Fundamentals, types, and applications* (5th ed.). Elsevier.
- Kadir, A. (2020). *Pembangkit tenaga listrik*. Universitas Indonesia.
- Kiswantono, A., Afianti, H., & Purwahyudi, B. (2024). Proteksi tegangan berbasis IoT: Sistem monitoring cerdas dan responsif. *SinarFe7*, 6(1), 43–47. <https://doi.org/10.30996/elsains.v6i2.11568>

- Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2022). *Analysis of electric machinery and drive systems* (4th ed.). Wiley-IEEE Press.
- Marsudi, D. (2020). *Pembangkitan energi listrik*. PT Gelora Aksara Pratama.
- Muslim, S., Joko, & Wanarti, P. R. (2020). *Teknik pembangkit tenaga listrik*. PT Macanan Jaya Cemerlang.
- Nasar, S. (2021). *Motor DC dan aplikasinya dalam sistem penggerak*. Penerbit Teknologi.
- Pratama, A. Y., Kurniawan, E., & Dahri, M. (2024). Prototipe sistem monitoring, proteksi, dan kontrol putaran pada mesin emergency generator menggunakan LoRa untuk mencegah kerusakan pada sistem di kapal. *Globe: Publikasi Ilmu Teknik, Teknologi Kebumihan, Ilmu Perkapalan*, 2(4), 125–138. <https://doi.org/10.61132/globe.v2i4.571>
- Saefulloh, B. B., & Herlambang, S. M. (2024). Rancang bangun sistem proteksi pada motor DC dari gangguan arus dan suhu berlebih berbasis internet of things. *Jurnal 7 Samudra*, 9(1), 17–26. <https://doi.org/10.54992/7samudra.v9i1.168>
- Wagyaana, A., & Rahmad. (2021). ESP32: Mikrokontroler SoC terpadu dengan WiFi dan Bluetooth. *Jurnal Teknologi Mikrokontroler*, 240.
- Widiarto, H. (2023). Rancangan mock up sistem monitoring panel tegangan rendah berbasis transmission control protocol/internet protocol (TCP/IP). *Knowledge: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan*, 3(1), 42–50. <https://doi.org/10.51878/knowledge.v3i1.2136>
- Widoyoko, E. P. (2020). *Evaluasi program pembelajaran: Panduan praktis bagi pendidik dan calon pendidik*. Pustaka Pelajar.