

Desain Sistem Perlindungan Motor Tiga Fasa dari Tegangan Lebih Berbasis Mikrokontroler Arduino Mega 2560

Tabri Maulidan

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang
Email: tabrimaulidan@gmail.com

Subairi, Basitha Febrinda Hidayutalil

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang
Email: subairi@unmer.ac.id, basitha@unmer.ac.id

Abstrak

Motor listrik tiga fase penting untuk industri karena keandalan dan efisiensinya, namun tegangan berlebih dapat merusak isolasi dan umur motor. Penelitian ini mengembangkan sistem proteksi terjangkau menggunakan Arduino Mega 2560, sensor PZEM-004T, relai 5V, dan kontaktor magnetik. Sistem memantau tegangan, membandingkannya dengan ambang batas aman, dan merespons dalam 2070-2114 milidetik dengan tunda 2 detik, memutus sirkuit saat tegangan berlebih. Hasil uji menunjukkan kesalahan pengukuran 1,0% (tegangan) dan 1,3% (arus), masih dalam toleransi 2% dan 3%. Sistem ini efektif, ekonomis, dan cocok untuk industri kecil-menengah, menjaga keandalan dan umur motor.

Kata Kunci: Tegangan Berlebih, Motor Tiga Fasa, Arduino Mega 2560, PZEM-004T.

Abstract

Three-phase electric motors are important to industry due to their reliability and efficiency, however, over-voltage can damage the insulation and life of the motor. This research developed an affordable protection system using an Arduino Mega 2560, PZEM-004T sensor, 5V relay, and magnetic contactor. The system monitors voltage, compares it to a safe threshold, and responds within 2070-2114 milliseconds with a 2-second delay, breaking the circuit when over-voltage. Test results show measurement errors of 1.0% (voltage) and 1.3% (current), well within the 2% and 3% tolerances. The system is effective, economical, and suitable for small-medium industries, maintaining motor reliability and life.

Keywords: Overvoltage, Three-Phase Motor, Arduino Mega 2560, PZEM-004T

PENDAHULUAN

Motor listrik tiga fasa merupakan komponen penting dalam sistem industri karena keandalan dan efisiensinya dalam menangani beban besar (Diantoro et al., 2024). Namun, gangguan seperti overvoltage dapat menyebabkan kerusakan serius, seperti kegagalan isolasi dan penurunan umur pakai motor. Overvoltage dapat meningkatkan risiko kerusakan motor tanpa sistem proteksi yang memadai (Tjandi., 2024). Oleh karena itu, pengembangan sistem proteksi yang efektif dan terjangkau menjadi salah satu upaya strategis untuk menjaga keandalan operasional motor tiga fasa secara berkelanjutan.

Perkembangan teknologi mikrokontroler, seperti Arduino Mega 2560, membuka peluang untuk menghadirkan solusi sistem proteksi yang lebih efisien dan terjangkau dibandingkan dengan sistem konvensional yang umumnya memiliki biaya tinggi serta struktur yang kompleks. Mikrokontroler memiliki kemampuan untuk memantau parameter kelistrikan

secara langsung dengan tingkat ketelitian yang tinggi, sehingga memungkinkan pendeteksian gangguan seperti tegangan lebih (overvoltage) secara cepat. Arduino Mega 2560, dengan kapasitas pemrosesan yang memadai serta antarmuka yang fleksibel, menjadi platform yang sesuai untuk merancang sistem proteksi yang dapat diterapkan secara luas pada berbagai aplikasi di lingkungan industri (Rahman et al., 2021).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem proteksi terhadap gangguan tegangan lebih pada motor tiga fasa berbasis mikrokontroler Arduino Mega 2560. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi kondisi tegangan berlebih secara langsung dan mengaktifkan mekanisme proteksi melalui pemutusan aliran listrik. Komponen utama yang digunakan meliputi sensor PZEM-004T sebagai pemantau parameter kelistrikan, modul relay sebagai aktuatur pemutus tegangan, dan algoritma pemrograman untuk proses pengambilan keputusan (Wicaksono & Haryudo., 2023). Pendekatan ini telah banyak diterapkan

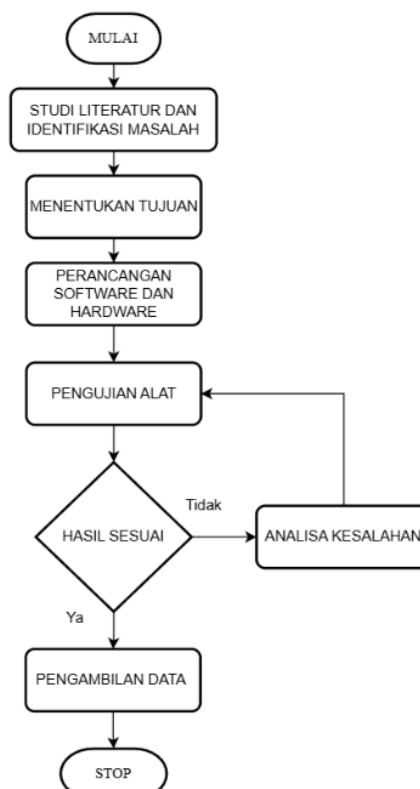
dalam pengembangan sistem otomasi sederhana karena fleksibilitas dan efisiensinya dalam proses implementasi (Ridwan and Fajar 2021).

Fokus utama dari penelitian ini adalah mengembangkan sistem proteksi yang bersifat ekonomis dan mudah diimplementasikan, khususnya bagi sektor industri kecil dan menengah yang memiliki keterbatasan sumber daya. Selain sebagai solusi teknis, sistem ini juga diarahkan untuk menjadi sarana pembelajaran yang aplikatif dalam bidang teknik elektro, karena mampu merepresentasikan prinsip kerja sistem proteksi motor tiga fasa secara nyata dan interaktif (Arin et al., 2024). Sistem dirancang agar dapat diintegrasikan secara sederhana serta dikonfigurasi sesuai dengan kebutuhan pengguna. Penelitian ini juga mengevaluasi kinerja sistem dalam mendeteksi dan merespons gangguan tegangan lebih secara akurat dan dapat diandalkan. Dengan memanfaatkan Arduino Mega 2560 sebagai platform utama, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam peningkatan keandalan sistem kelistrikan melalui pendekatan teknologi yang inovatif, adaptif, dan edukatif.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D), yang mengacu pada model pengembangan sistematis, serta dimodifikasi sesuai kebutuhan teknis dalam bidang rekayasa sistem. Tahapan dalam metode ini meliputi identifikasi permasalahan, kajian literatur, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, pengujian serta kalibrasi alat, analisis data, evaluasi sistem, dan penyusunan simpulan. Pendekatan ini dipilih karena dinilai sesuai untuk mengembangkan prototipe sistem proteksi yang aplikatif dan dapat diuji performanya secara terstruktur, sebagaimana dibuktikan oleh (Sirait & Aulia., 2021) dalam pengembangan sistem proteksi kebocoran berbasis mikrokontroler, yang meliputi fase desain, pengujian, dan validasi secara sistematis. Diagram alur dari keseluruhan proses penelitian ditampilkan pada Gambar 1.

Pada Gambar 1 disajikan tahapan-tahapan penelitian secara sistematis, yang meliputi proses awal hingga akhir dalam perancangan dan pengembangan alat, sehingga memberikan gambaran yang komprehensif mengenai alur kerja yang ditempuh selama pelaksanaan penelitian ini.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

1. Start

Penelitian ini diawali dengan tahapan awal yang ditandai dengan langkah 'start', yang berfungsi sebagai penanda dimulainya keseluruhan proses penelitian, di mana pada tahap ini dilakukan identifikasi masalah serta penetapan tujuan dan ruang lingkup penelitian yang akan dilaksanakan.

2. Studi Literatur dan Identifikasi Masalah

Peneliti melakukan kajian terhadap literatur yang relevan dan mengidentifikasi permasalahan yang akan diteliti. Langkah ini sangat penting untuk memperoleh pemahaman yang mendalam dan menentukan arah penelitian.

3. Menentukan Tujuan

Setelah masalah teridentifikasi, peneliti menetapkan tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian tersebut.

4. Perancangan Software dan Hardware

Pada tahap ini, peneliti mulai merancang perangkat lunak (software) dan perangkat keras (hardware) yang akan digunakan untuk mendukung penelitian.

5. Pengujian Alat

Peralatan yang telah dirancang diuji untuk memastikan bahwa alat berfungsi sesuai dengan yang diharapkan.

6. Hasil Sesuai

Tahap ini merupakan pengambilan keputusan. Jika

hasil pengujian tidak sesuai, maka dilakukan analisis kesalahan, kemudian kembali ke tahap pengujian alat setelah perbaikan dilakukan. Jika hasil sesuai, proses dilanjutkan ke tahap berikutnya

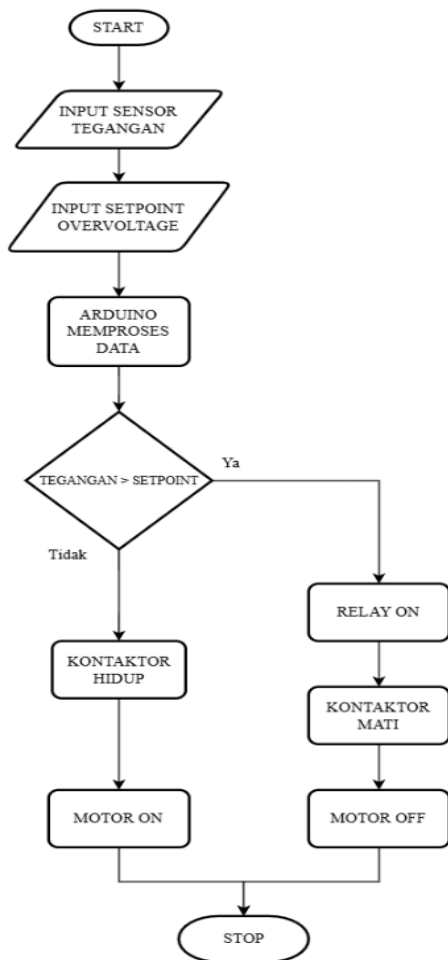
7. Pengambilan Data

Setelah alat berfungsi dengan baik, peneliti melakukan proses pengumpulan data yang akan digunakan untuk dianalisis.

8. Stop

Proses penelitian dihentikan setelah seluruh tahapan selesai dilaksanakan dan data yang dibutuhkan telah terkumpul. Tahap akhir ini menandai selesainya kegiatan penelitian dan dilanjutkan dengan analisis hasil.

Gambar 2 merupakan *flowchart* alat sistem proteksi *overvoltage*



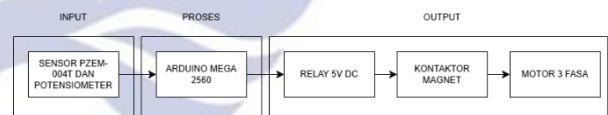
Gambar 2. Flowchart

Gambar 2, tersebut menggambarkan *flowchart* sistem kontrol otomatis untuk pengendalian motor berdasarkan kondisi tegangan dan setpoint yang telah ditentukan. Sistem ini dirancang untuk memantau dan merespons perubahan tegangan secara real-time guna memastikan operasi motor yang optimal dan aman.

Proses dimulai dengan inialisasi sistem melalui START, diikuti dengan pembacaan data dari dua sensor utama yaitu sensor PZEM-004T dan potensiometer. Sensor PZEM-004T berfungsi untuk memantau kondisi tegangan aktual dalam sistem, sedangkan potensiometer mengatur setpoint overvoltage sebagai referensi batas aman tegangan operasi. Data dari kedua sensor ini kemudian diproses oleh unit mikroprosesor Arduino yang bertindak sebagai pengendali utama sistem.

Arduino melakukan evaluasi terhadap data yang diterima dengan membandingkan nilai tegangan aktual terhadap setpoint yang telah ditetapkan. Proses pengambilan keputusan dilakukan melalui kondisi logika "TEGANGAN > SETPOINT" yang menentukan jalur eksekusi selanjutnya. Apabila kondisi ini bernilai benar (Ya), sistem akan mengaktifkan relay yang selanjutnya akan mematikan kontaktor untuk mematikan motor. Sebaliknya, jika kondisi bernilai salah (Tidak), sistem akan menonaktifkan relay dan kontaktor akan hidup sehingga motor tetap dalam kondisi on.

Motor beroperasi ketika tegangan normal, dan dimatikan ketika tegangan melebihi batas setpoint untuk mencegah kerusakan akibat overvoltage. Mekanisme kontrol ini memberikan perlindungan terhadap kerusakan peralatan yang dapat disebabkan oleh kondisi tegangan yang tidak sesuai. Setelah eksekusi perintah kontrol motor selesai, sistem akan mengakhiri siklus operasi pada node STOP, menunjukkan bahwa satu siklus pemantauan dan kontrol telah diselesaikan.



Gambar 3. Blok Diagram

Gambar 3, menunjukkan diagram alur sistem kendali motor tiga fasa berbasis mikrokontroler Arduino Mega 2560. Rangkaian ini dirancang untuk memungkinkan pengoperasian motor secara otomatis dengan memanfaatkan pengukuran parameter kelistrikan dan kontrol digital terhadap aktuatur elektromagnetik. Setiap komponen dalam alur tersebut memiliki peran yang terintegrasi untuk mendukung fungsi pengaktifan dan pemutusan arus listrik menuju motor sesuai kondisi yang ditentukan.

Sistem dimulai dari penggunaan sensor PZEM-004T yang berfungsi untuk membaca parameter listrik seperti tegangan, arus, frekuensi, dan daya aktif pada rangkaian. Bersama dengan sensor tersebut, digunakan pula potensiometer sebagai komponen input analog yang berfungsi untuk mengatur batas nilai tertentu, misalnya sebagai penentu ambang batas tegangan atau arus yang diizinkan. Kedua komponen ini mengirimkan data ke unit

pengendali pusat berupa mikrokontroler Arduino Mega 2560, yang akan memproses sinyal input tersebut berdasarkan logika program yang telah ditanamkan.

Mikrokontroler selanjutnya memberikan sinyal kendali digital kepada modul relay 5V DC. Relay berfungsi sebagai saklar elektronik yang akan aktif ketika menerima sinyal tegangan dari mikrokontroler. Ketika relay aktif, maka rangkaian arus menuju kontaktor magnet akan tertutup, sehingga kontaktor magnet dapat bekerja. Kontaktor merupakan saklar elektromagnetik yang mampu menangani arus besar, dan dalam sistem ini digunakan untuk menyambungkan sumber daya listrik tiga fasa ke beban motor.

Tahap akhir dari rangkaian ini adalah pengoperasian motor tiga fasa. Motor akan aktif apabila kontaktor menerima arus kerja akibat aktifnya relay. Dengan demikian, keseluruhan sistem memungkinkan kontrol otomatis terhadap motor tiga fasa berdasarkan pembacaan sensor dan pengaturan nilai ambang menggunakan potensiometer. Integrasi ini sangat bermanfaat dalam sistem industri, karena memungkinkan pemantauan dan pengendalian beban secara lebih akurat, efisien, dan berbasis mikrokontroler.

Tahapan Pengujian Sensor PZEM-004T

Penelitian ini menguji akurasi sensor PZEM-004T dalam sistem proteksi terhadap kondisi *overvoltage* pada motor induksi tiga fasa. Pengujian dilakukan dengan beban *magic com* 300 W pada tegangan 220 V, lalu membandingkan nilai tegangan dan arus yang terbaca oleh sensor dengan alat ukur standar. Sensor PZEM-004T sebelumnya telah diuji dalam sistem monitoring daya listrik rumah tangga, menghasilkan nilai *error percentage* rata-rata sebesar 0,34 % untuk tegangan dan 0,23 % untuk daya (Pradana et al., 2024). Hasil ini menunjukkan bahwa sensor tersebut memiliki tingkat akurasi tinggi dan cocok digunakan sebagai bagian dari mekanisme proteksi otomatis terhadap lonjakan tegangan pada motor tiga fasa.

Tahapan Pengujian Potensiometer

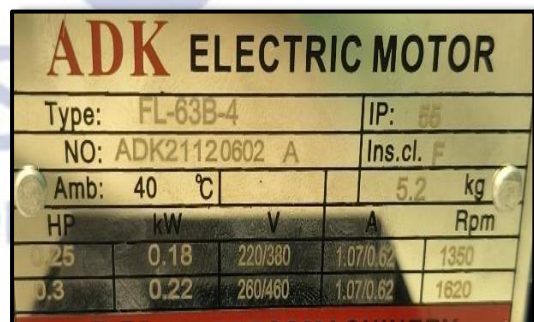
Pengujian potensiometer bertujuan untuk menetapkan nilai *set point* pada kondisi *overvoltage* dalam sistem proteksi motor induksi tiga fasa. Parameter yang diamati meliputi nilai ADC (Analog-to-Digital Converter), tegangan keluaran potensiometer, dan derajat sudut putar, yang dievaluasi untuk menilai kestabilan dan sensitivitas komponen dalam mengatur ambang batas proteksi secara presisi dan konsisten. Metode ini diimplementasikan dalam rangka verifikasi bahwa potensiometer mampu berfungsi sebagai antarmuka penetapan batas proteksi yang akurat dalam sistem berbasis mikrokontroler (Darmawansyah et al., 2020).

Tahapan Pengujian Relay 5V

Pengujian relay 5 V dilakukan untuk memverifikasi kemampuannya dalam mengatur arus listrik menggunakan sinyal kendali bertegangan rendah pada sistem perlindungan motor induksi tiga fasa. Relay mengoperasikan saklar internal berbasis elektromagnetik, sehingga dapat menyambungkan atau memutus sirkuit dengan beban arus tinggi meskipun dikendalikan oleh tegangan rendah. Tujuan pengujian ini adalah memastikan bahwa relay berfungsi secara optimal dengan respons cepat dan stabil di bawah kondisi beban aktif, serta layak diimplementasikan sebagai aktuator dalam sistem proteksi otomatis berbasis mikrokontroler (Nazhrullah & Aria Kharisma., 2023).

Tahapan Pengujian Gangguan Overvoltage

Pengujian perangkat proteksi terhadap kondisi *overvoltage* dilakukan untuk memastikan sistem dapat secara otomatis memutus aliran listrik ke motor induksi tiga fasa melalui kontaktor magnet saat tegangan melebihi *set point* yang telah ditentukan. Mikrokontroler mendeteksi nilai tegangan melalui sensor PZEM-004T dan menginstruksikan relay 5 V untuk memutus sirkuit sehingga motor berhenti beroperasi. Gangguan dirangsang dengan menaikkan tegangan pada salah satu fasa masuk menggunakan regulator tegangan satu fasa, hingga melebihi ambang batas yang telah diatur melalui potensiometer. Evaluasi sistem mencakup kecepatan respons, akurasi pemutusan, serta kemampuan perangkat untuk beroperasi secara konsisten dan andal dalam menghadapi fluktuasi tegangan berlebih secara berulang (Hartono et al., 2021).



Gambar 4. Nameplate Motor Pengujian

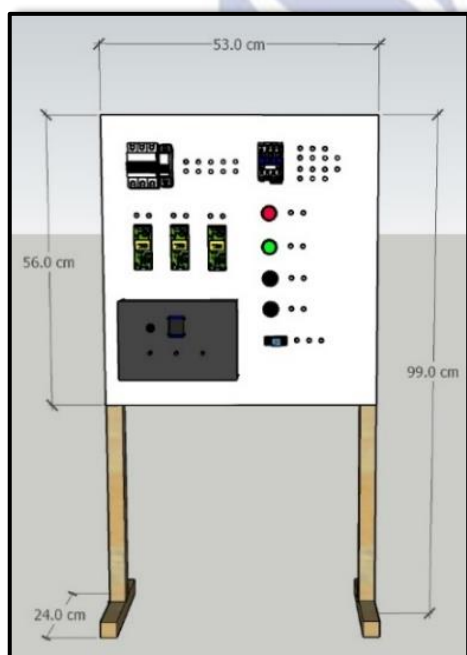
Gambar 4, menunjukkan spesifikasi teknis motor listrik merek ADK dengan tipe FL-63B-4, yang digunakan dalam rangka pengujian terhadap gangguan *overvoltage*. Motor ini memiliki daya 0,18 kW pada tegangan 220/380 V dan 0,22 kW pada tegangan 260/460 V, dengan kecepatan putar 1620 RPM serta berat total sebesar 5,2 kg.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem proteksi overvoltage berbasis Arduino Mega 2560 dalam mendeteksi dan merespons tegangan berlebih pada motor induksi tiga fasa secara cepat, akurat, dan andal. Evaluasi difokuskan pada kecepatan sistem dalam mengambil tindakan pemutusan, ketepatan dalam mendeteksi nilai tegangan melebihi ambang batas, serta konsistensi sistem dalam menjalankan fungsi proteksi tanpa gangguan operasional.

Desain Mekanik Alat

Perancangan mekanik merupakan suatu proses sistematis yang bertujuan untuk menciptakan dan mengembangkan sistem mekanis yang terdiri atas berbagai komponen yang saling berinteraksi. Proses ini mencakup analisis teknis, pemilihan material yang sesuai, perhitungan dimensi komponen, serta pertimbangan terhadap gerak dan hubungan fungsional antarbagian, guna memastikan sistem dapat beroperasi secara optimal sesuai dengan fungsi yang dirancang.



Gambar 5. Desain Mekanik

Gambar 5, menggambarkan rancangan desain mekanik sistem proteksi motor induksi tiga fasa, yang terdiri atas sejumlah komponen utama yang disusun secara terintegrasi. Rangkaian ini mencakup satu unit MCB tiga fasa, satu unit MCB satu fasa, tiga buah sensor PZEM-004T untuk memantau setiap fasa secara terpisah, sebuah kontaktor magnet sebagai aktuator, dua buah lampu indikator, serta dua buah *push button* sebagai saklar input manual. Selain itu, terdapat sebuah unit

kontrol berupa boks hitam yang berisi mikrokontroler Arduino Mega 2560, layar OLED LCD sebagai tampilan keluaran, potensiometer untuk pengaturan nilai ambang batas, serta tombol reset untuk pengaturan ulang sistem. Seluruh komponen tersebut dirancang untuk bekerja secara sinergis dalam mendeteksi dan merespons gangguan tegangan berlebih secara real-time.

Hasil Pengujian Sensor PZEM-004T

Tabel 1. Hasil Pengujian Tegangan Sensor PZEM-004T

No	Multimeter (V)	\bar{x}	Error (%)
1	179	180.7	0.9
2	179	180.57	0.9
3	179	180.83	1.0
4	179	180.93	1.1
5	179	180.9	1.1
6	179	181.2	1.2
7	179	180.7	0.9
8	179	181.2	1.2
9	179	180.57	0.9
10	179	181.07	1.2
Rata-rata error			1.3

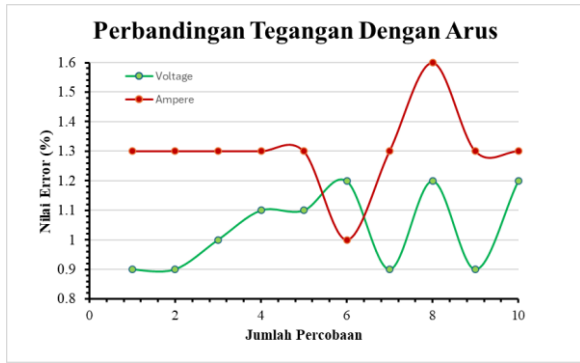
Berdasarkan Tabel 1, hasil pengujian terhadap pembacaan tegangan pada sensor PZEM-004T menunjukkan rata-rata tingkat kesalahan sebesar 1%, yang masih berada dalam batas toleransi akurasi sebesar 2%. Dengan demikian, sensor dapat dikategorikan berfungsi secara baik dan layak digunakan dalam sistem pemantauan tegangan. Selanjutnya, pengujian akan dilanjutkan pada parameter arus untuk mengevaluasi akurasi sensor dalam mengukur besaran listrik lainnya yang relevan dengan sistem proteksi.

Tabel 2. Hasil Pengujian Arus Sensor PZEM-004T

No	Tang Ampere (A)	\bar{x}	Error (%)
1	1.02	1.03	1.3
2	1.02	1.03	1.3
3	1.02	1.03	1.3
4	1.02	1.03	1.3
5	1.02	1.03	1.3
6	1.02	1.03	1.0
7	1.02	1.03	1.3
8	1.02	1.04	1.6
9	1.02	1.03	1.3
10	1.02	1.03	1.3
Rata-rata error			1.3

Merujuk pada Tabel 2, hasil pengujian arus menggunakan sensor PZEM-004T menunjukkan rata-rata tingkat kesalahan sebesar 1,3%, yang masih berada dalam batas toleransi sebesar 3%. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa sensor mampu mendeteksi arus listrik secara akurat dan konsisten, sehingga dapat

diandalkan sebagai perangkat pemantauan arus dalam sistem proteksi motor induksi tiga fasa. Dengan performa yang stabil, sensor ini dinilai layak untuk diintegrasikan ke dalam sistem berbasis mikrokontroler guna mendukung deteksi gangguan kelistrikan secara real-time.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Tegangan Dengan Arus

Gambar 6, menunjukkan perbandingan grafik nilai *error* antara pengukuran tegangan dan arus menggunakan sensor PZEM-004T. Berdasarkan sepuluh kali percobaan pada masing-masing parameter, seluruh nilai *error* tercatat berada di bawah ambang batas 2%. Hasil ini mengindikasikan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang konsisten dalam melakukan pengukuran baik pada tegangan maupun arus, sehingga layak digunakan dalam sistem monitoring kelistrikan yang membutuhkan keandalan data secara *real-time*.

Hasil Pengujian Potensiometer

Tabel 3. Hasil Pengujian Potensiometer

No	Nilai ADC (0-1023)	Tegangan Potensio (V)	Derajat Potensio (°)
1	0	0	0
2	1023	5	270
3	266	1.3	70.21
4	462	2.26	121.94
5	558	2.73	147.27

Tabel 3, menyajikan hasil pengujian sensor potensiometer berdasarkan variasi putaran yang diberikan. Hasil pengujian menunjukkan adanya korelasi yang konsisten antara derajat putaran dengan perubahan nilai tegangan yang terbaca, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor potensiometer berfungsi dengan baik dan responsif dalam menetapkan nilai *set point* pada sistem. Kinerja yang stabil ini mendukung keandalan potensiometer sebagai antarmuka input dalam pengaturan ambang batas tegangan atau arus pada sistem proteksi.

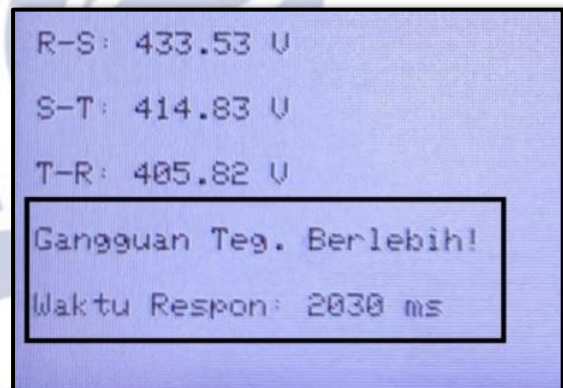
Hasil Pengujian Relay 5V

Tabel 4. Hasil Pengujian Relay 5V

No	Kontak (ON/OFF)	Kontak Normally Close (NC) (Terhubung/Terputus)	Waktu Respons ON (ms)	Waktu Respons OFF (ms)
1	ON	Terputus	1999	-
2	OFF	Terhubung	-	2031
3	ON	Terputus	2000	-
4	OFF	Terhubung	-	2031
5	ON	Terputus	2000	-

Tabel 4, menyajikan data hasil pengujian modul relay 5 V yang dilakukan sebanyak lima kali percobaan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa relay mampu merespons sinyal kendali dari mikrokontroler secara konsisten, dengan pemutusan dan penyambungan arus berjalan sesuai dengan logika yang telah diprogramkan. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa relay 5 V berfungsi dengan baik dan dapat diandalkan sebagai aktuator dalam sistem proteksi berbasis mikrokontroler.

Hasil Pengujian Gangguan Overvoltage



Gambar 7. Tampilan LCD Gangguan

Gambar 7, memperlihatkan kondisi di mana sistem mendeteksi gangguan berupa tegangan berlebih (*overvoltage*). Gangguan tersebut ditampilkan secara real-time pada layar LCD, yang menampilkan pesan peringatan "Gangguan Tegangan Berlebih" disertai dengan waktu respons sistem sebesar 2030 milidetik. Waktu respons ini mencerminkan interval antara deteksi gangguan oleh sensor dan aktivasi pemutusan tegangan oleh sistem proteksi, yang menunjukkan kemampuan sistem untuk merespons dengan cepat terhadap perubahan kondisi kelistrikan yang melebihi ambang batas yang ditentukan.

Tabel 5. Hasil Pengujian Gangguan Overvoltage

No	Tegangan (V)	set point (v)	waktu respon (ms)	kondisi relay (ON/OFF)
1	414	384	2109	ON
2	414	385	2089	ON
3	414	387	2070	ON
4	414	385	2095	ON
5	414	385	2114	ON

Tabel 5, menunjukkan hasil pengujian sistem proteksi terhadap gangguan overvoltage yang dilakukan dengan lima percobaan, di mana sistem berhasil mendeteksi dan mengaktifkan relay secara konsisten ketika tegangan melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Rentang waktu respon sistem tercatat antara 2070 ms hingga 2114 ms, dengan rata-rata waktu respon 2095,4 ms, yang mengindikasikan bahwa sistem merespons dengan tepat waktu sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan. Untuk memperkuat klaim mengenai keandalan dan konsistensi sistem, dilakukan analisis statistik terhadap data waktu respon yang diperoleh. Berikut adalah hasil analisis statistik yang lebih rinci:

1. Rata-rata (Mean)

Rata-rata waktu respon sistem terhadap gangguan overvoltage adalah 2095,4 ms, yang menunjukkan bahwa sistem secara konsisten merespons dalam jangka waktu yang sesuai dengan desain tunda waktu ± 2000 ms yang telah ditetapkan. Rata-rata ini menegaskan bahwa kinerja sistem sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan.

2. Simpangan Baku (Standard Deviation)

Nilai simpangan baku waktu respon tercatat sebesar $\pm 17,44$ ms, yang menunjukkan bahwa sistem beroperasi dengan stabil dan konsisten tanpa adanya variasi yang signifikan antara percobaan satu dengan lainnya. Simpangan baku yang kecil ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki ketepatan yang tinggi dalam merespons gangguan, tanpa adanya penyimpangan waktu yang mencolok.

3. Confidence Interval (95%)

Berdasarkan perhitungan statistik, interval kepercayaan 95% untuk rata-rata waktu respon sistem adalah antara 2073,74 ms hingga 2117,06 ms. Hal ini mengindikasikan bahwa dengan tingkat kepercayaan 95%, rata-rata waktu respon sistem akan berada dalam rentang ini jika percobaan diulang berulang kali. Interval kepercayaan ini memberikan keyakinan lebih lanjut mengenai ketepatan dan konsistensi sistem dalam mendeteksi gangguan overvoltage.

Pengaturan waktu tunda selama dua detik dalam sistem proteksi *overvoltage* bertujuan memverifikasi kestabilan kondisi gangguan sebelum sistem memutus sirkuit. Strategi ini dirancang agar sistem tidak

merespons fluktuasi tegangan bersifat sementara, dan hanya melakukan pemutusan apabila *overvoltage* berlangsung signifikan dan persistens. Pendekatan serupa diterapkan dalam desain *over/under voltage relay* berbasis mikrokontroler pada tegangan satu fasa 220 VAC, di mana penggunaan *time delay* ± 3 detik terbukti efektif mengurangi risiko pemutusan palsu akibat gangguan singkat (Gali Siringoringo et al., 2019).

Perbandingan dengan Sistem Proteksi Konvensional

Sistem proteksi seperti EOCR (Electronic Over Current Relay) telah lama digunakan dalam industri kelistrikan untuk menjaga kestabilan dan keamanan sistem. Meskipun efektif, sistem-sistem tersebut memiliki beberapa keterbatasan, terutama dalam hal biaya dan penyesuaian yang terbatas terhadap kebutuhan spesifik aplikasi. Di sisi lain, sistem berbasis Arduino dapat menawarkan solusi dengan biaya yang lebih rendah, sementara masih mampu memberikan fungsionalitas serupa dalam hal pengukuran dan proteksi. Dalam perbandingan ini, beberapa aspek utama seperti biaya, akurasi, fleksibilitas konfigurasi, dan kemampuan monitoring real-time akan dianalisis untuk menggambarkan kelebihan sistem berbasis Arduino dibandingkan dengan EOCR.

Tabel 6. Perbandingan Arduino Dengan EOCR

Kriteria	Arduino	EOCR
Harga	Rendah	Sedang-Tinggi
Akurasi	Tinggi ($\pm 1\%$)	Sangat tinggi ($\pm 0,5\%$)- ($\pm 1\%$)
Fleksibilitas Konfigurasi	Sangat fleksibel	Terbatas
Monitoring Real-Time	Ya	Ya

Berdasarkan hasil analisis yang disajikan pada Tabel 6, sistem berbasis Arduino memiliki harga yang lebih rendah dibandingkan dengan EOCR, yang memiliki harga sedang hingga tinggi. Dalam hal akurasi, Arduino memiliki tingkat akurasi yang tinggi, yaitu sekitar $\pm 1\%$, sedangkan EOCR menawarkan akurasi yang lebih tinggi lagi dengan rentang antara $\pm 0,5\%$ hingga $\pm 1\%$. Untuk fleksibilitas konfigurasi, Arduino lebih unggul karena sangat fleksibel dan dapat diprogram ulang sesuai dengan kebutuhan spesifik pengguna, sedangkan EOCR memiliki fleksibilitas yang terbatas. Kedua sistem ini mendukung monitoring real-time, yang memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi secara langsung tanpa keterlambatan.

Meskipun Arduino menawarkan biaya rendah dan fleksibilitas, sistem EOCR lebih cocok untuk aplikasi yang memerlukan akurasi tinggi. EOCR memiliki

akurasi hingga $\pm 0,5\%$, ideal untuk proteksi arus lebih dengan ketelitian tinggi. Namun, Arduino tetap menjadi pilihan menarik untuk aplikasi dengan anggaran terbatas dan kebutuhan konfigurasi yang fleksibel. Selain itu, Arduino juga berfungsi sebagai sarana pembelajaran yang efektif, memungkinkan pengguna untuk memahami dan mengimplementasikan konsep-konsep industri secara praktis.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, perancangan sistem proteksi *overvoltage* pada motor induksi tiga fasa berbasis Arduino Mega 2560 berhasil direalisasikan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Sistem mampu mendeteksi kondisi tegangan berlebih secara akurat menggunakan sensor PZEM-004T, dengan tingkat kesalahan rata-rata sebesar 1,0% untuk parameter tegangan dan 1,3% untuk arus. Nilai tersebut masih berada dalam batas toleransi masing-masing sebesar 2% dan 3%, yang menunjukkan bahwa sensor bekerja dengan presisi tinggi. Integrasi antara Arduino Mega 2560, sensor PZEM-004T, potensiometer, relay 5 V, dan kontaktor magnet membentuk sistem proteksi yang sinergis, responsif, dan andal. Waktu respons sistem tercatat antara 2070 hingga 2114 milidetik setelah penundaan waktu selama dua detik, yang mencerminkan kemampuannya dalam memberikan perlindungan secara tepat waktu tanpa mengganggu stabilitas operasional. Selain itu, sistem mampu membedakan antara fluktuasi tegangan sesaat dan kondisi *overvoltage* yang nyata, sehingga fungsi proteksi hanya diaktifkan saat kondisi benar-benar berisiko. Hasil ini menunjukkan bahwa desain sistem berhasil meningkatkan aspek keandalan dan keamanan sistem kelistrikan pada aplikasi motor tiga fasa di lingkungan industri.

Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut, sistem proteksi sebaiknya tidak hanya difokuskan pada pendeteksian gangguan *overvoltage*, tetapi juga diperluas untuk mencakup jenis gangguan lainnya seperti *undervoltage*, *phase loss*, dan *overcurrent*. Penambahan fitur pendeteksian terhadap berbagai jenis gangguan ini bertujuan untuk meningkatkan cakupan proteksi sistem secara menyeluruh, sehingga dapat memberikan respons yang lebih efektif dan andal terhadap kondisi kelistrikan yang abnormal dan berisiko. Pengembangan ini juga akan memperluas fleksibilitas serta kemampuan adaptasi sistem dalam menghadapi dinamika jaringan listrik, terutama pada lingkungan industri yang umumnya memiliki kompleksitas gangguan kelistrikan yang lebih tinggi. Dengan cakupan proteksi yang lebih luas, sistem

diharapkan mampu meningkatkan keandalan operasional peralatan dan meminimalkan potensi kerusakan akibat gangguan listrik yang tidak terdeteksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Arin, R. M. P., L. E. C. Ningrum, P. W. Rusimamto, and M. S. Zuhrie. 2024. Pengembangan Perangkat Pembelajaran Sistem Kendali On/Off Menggunakan Mikrokontroler Berbasis IoT (Internet Of Things) Pada Elemen Sistem Kendali Elektronik Di SMKN 1 Jabon.
- Darmawansyah, M. Khairul Amri Rosa, and Ika Novia Anggraini. 2020. "Sistem Proteksi Motor Induksi 3 Fasa Terhadap Berbagai Gangguan Menggunakan Mikrokontroler." *Jurnal Amplifier Mei* 10(1).
- Diantoro, Sulis, Dedi Nugroho, and Agus Adhi Nugroho. 2024. "Analisa Pengaruh Perubahan Frekuensi Dan Tegangan Terhadap Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Matlab Simulink." *Elektrika* 16(2):127. doi:10.26623/elektrika.v16i2.8852.
- Gali Siringoringo, Fajar, Agus Sofwan, and Agung Nugroho. 2019. Over/Under Voltage Relay Menggunakan Mikrokontroler Pada Tegangan 1 Fasa 220VAC. Vol. 8. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>.
- Hartono, Zulfian, and Suardi. 2021. "Sistem Monitoring Overload Tegangan Pada Instalasi Listrik Berbasis Internet Of Things (IoT) Menggunakan Teknik Pulse Width Modulation (PWM)." *Jurnal CyberTech x*. No.x:1–11. www.trigunadharma.ac.id.
- Nazhrullah, Galang, and Aria Kharisma. 2023. "Relay Proteksi Arus Lebih Berbasis Mikrokontroler Arduino." *PoliGrid* 4(1). doi:10.46964/poligrd.v4i1.9.
- Pradana, Aprilianto Agung, Prasetyo Yuliantoro, and Slamet Indriyanto. 2024. "Perancangan Sistem Monitoring Daya Listrik 1 Fasa Pada Rumah Tangga Berbasis Internet Of Things." *Jurnal SINTA: Sistem Informasi Dan Teknologi Komputasi* 1(1):1–9. doi:10.61124/sinta.v1i1.13.
- Rahman, Muh Aditya, Joessianto Eko Poetro, and Anggara Trisna Nugraha. 2021. "Rancang Bangun Sistem Monitoring Dan Proteksi Motor 1 Fasa Terhadap Gangguan Over Voltage Dan Under Voltage." 11:59–66.
- Ridwan, Taufik, and Muhammad Fajar. 2021. Rancang Bangun Otomasi Rumah Berbasis Arduino Uno dan Smartphone Android. www.sparkfun.com.
- Sirait, R. S. R., and M. Aulia. 2021. Rancang Bangun Sistem Proteksi Kebocoran Pada Prototipe Mesin Reverse Osmosis Berbasis Mikrokontroler. Vol. 20.
- Tjandi, Yunus. 2024. Diagnosa Pengaruh Over Voltage Dan Over Heating Pada Mesin Induksi Berbasis Logika Samar. Vol. 7.
- Wicaksono, Emanuel Purwadi, and Subuh Isnur Haryudo. 2023. "Prototipe Sistem Monitoring Gangguan Motor Tiga Fasa Berbasis IoT." *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali Dan Elektronika Terapan* 11(2):105–14. doi:10.34010/telekontran.v11i2.11154.