

Design and Implementation of a Microcontroller-Based Monitoring System for Early Fault Detection in Three-Phase Induction Motors

Doni Tri Putra Yanto^{1*}, Navy Sandra¹

¹ Professional Engineer Study Program, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

*Corresponding Author: donitriputra@ft.unp.ac.id

Abstract

Three-phase induction motors play a critical role in industrial systems, where unexpected failures can significantly disrupt operations and increase maintenance costs. Among various fault conditions, voltage imbalance, overcurrent, and overheating are the most common factors that accelerate motor degradation. However, existing monitoring systems are often limited to single-parameter detection or lack integrated protection mechanisms, reducing their effectiveness in early fault mitigation. This study proposes the design and implementation of a microcontroller-based monitoring and protection system for early fault detection in three-phase induction motors. The system integrates a PZEM-004T sensor for real-time measurement of voltage and current, and a MAX6675 sensor for temperature monitoring. All data are processed using an Arduino Mega microcontroller and displayed via a TFT LCD, while a buzzer and relay provide a two-level response mechanism, consisting of early warning and automatic protection. Experimental results demonstrate that the system achieves accurate parameter measurement and effectively distinguishes between normal and fault conditions. The system successfully detects voltage imbalance, overcurrent, and overheating, and responds with timely warning and protective actions. The proposed system offers a low-cost, reliable, and real-time solution for multi-parameter monitoring and condition-based maintenance of induction motors, with strong potential for industrial applications.

Keywords: Three-Phase Induction Motor; Condition Monitoring; Early Fault Detection; Voltage Unbalance; Overcurrent Protection.

1. Introduction

Motor induksi tiga fasa merupakan salah satu komponen paling krusial dalam sistem industri modern karena berfungsi sebagai penggerak utama berbagai peralatan produksi. Keunggulan seperti konstruksi yang sederhana, efisiensi yang tinggi, serta keandalan operasional menjadikan motor ini digunakan dalam berbagai sektor industri, termasuk manufaktur, energi, dan proses industri [1], [2]. Namun, di balik keunggulan tersebut, motor induksi memiliki kerentanan terhadap berbagai gangguan operasional yang dapat menyebabkan penurunan kinerja hingga kerusakan permanen. Gangguan seperti ketidakseimbangan tegangan (*voltage unbalance*), arus lebih (*overcurrent*), dan kenaikan suhu berlebih (*overheating*) merupakan faktor dominan yang mempercepat degradasi komponen motor dan berkontribusi terhadap peningkatan biaya perawatan serta risiko *downtime* system [2], [3].

Secara teoritis, ketidakseimbangan tegangan pada sistem tiga fasa dapat menyebabkan ketidakseimbangan arus yang jauh lebih besar, bahkan mencapai beberapa kali lipat dari deviasi tegangan, yang pada akhirnya meningkatkan rugi-rugi daya dan mempercepat

kenaikan suhu pada lilitan stator [1], [4]. Kondisi ini tidak hanya menurunkan efisiensi motor, tetapi juga memperpendek umur isolasi dan meningkatkan potensi kegagalan sistem. Demikian pula, arus lebih yang terjadi akibat beban berlebih atau gangguan sistem dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada kumparan, sementara overheating merupakan indikator lanjutan dari akumulasi gangguan listrik dan mekanik yang tidak terdeteksi secara dini [5], [6]. Oleh karena itu, pemantauan parameter operasional motor secara kontinu menjadi aspek penting dalam menjaga keandalan dan keberlanjutan operasi sistem industri.

Seiring dengan berkembangnya konsep *condition-based maintenance* dan *predictive maintenance*, sistem monitoring berbasis sensor dan mikrokontroler menjadi solusi yang semakin banyak digunakan untuk mendeteksi gangguan secara dini. Berbagai penelitian telah mengembangkan sistem monitoring motor induksi dengan pendekatan yang beragam, seperti pemantauan berbasis arus, tegangan, atau suhu secara individual [4], [7], [8]. Namun demikian, sebagian besar pendekatan tersebut masih bersifat parsial, karena hanya berfokus pada satu atau dua parameter saja, sehingga belum mampu merepresentasikan kondisi motor secara menyeluruh. Selain itu, banyak sistem yang dikembangkan masih terbatas pada fungsi monitoring tanpa integrasi dengan mekanisme proteksi otomatis, sehingga respon terhadap gangguan masih bergantung pada intervensi manual [4], [8].

Di sisi lain, perkembangan teknologi *embedded system* memungkinkan integrasi berbagai sensor dalam satu sistem monitoring yang lebih komprehensif dan real-time. Penggunaan mikrokontroler seperti Arduino memberikan fleksibilitas dalam pengolahan data multiparameter dengan biaya yang relatif rendah [9], [10], [11]. Namun, tantangan yang masih dihadapi adalah bagaimana mengintegrasikan pemantauan multiparameter dengan sistem pengambilan keputusan yang mampu memberikan respon bertahap, tidak hanya dalam bentuk peringatan, tetapi juga tindakan proteksi otomatis yang adaptif terhadap tingkat keparahan gangguan [12], [13].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan suatu sistem monitoring dan proteksi gangguan pada motor induksi tiga fasa berbasis mikrokontroler yang mengintegrasikan pemantauan tegangan, arus, dan suhu secara simultan. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan sensor PZEM-004T untuk pengukuran parameter listrik dan sensor MAX6675 untuk pengukuran suhu, yang kemudian diolah menggunakan Arduino Mega sebagai pusat kendali. Sistem ini dirancang untuk memberikan dua level respon, yaitu peringatan dini melalui buzzer dan proteksi otomatis melalui relay, sehingga memungkinkan deteksi dan penanganan gangguan secara lebih efektif.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengembangan sistem monitoring berbasis multi-parameter yang terintegrasi dengan mekanisme proteksi bertahap dalam satu platform *embedded* yang sederhana dan ekonomis. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang cenderung bersifat parsial atau hanya berfungsi sebagai sistem monitoring, sistem yang diusulkan dalam penelitian ini mampu melakukan deteksi dini terhadap beberapa jenis gangguan utama secara simultan, sekaligus memberikan respon proteksi secara otomatis. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi dalam aspek teknis pengembangan sistem, tetapi juga dalam mendukung implementasi strategi pemeliharaan berbasis kondisi pada sistem industri modern.

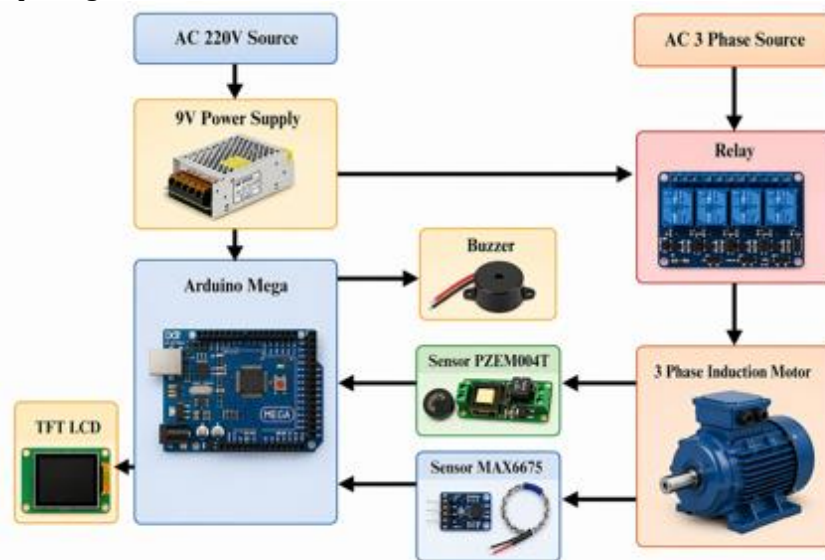
2. Material and methods

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa (*engineering approach*) yang meliputi tahap perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring dan proteksi pada

motor induksi tiga fasa berbasis mikrokontroler [14], [15]. Sistem yang dikembangkan dirancang untuk memantau parameter operasional utama motor, yaitu tegangan, arus, dan suhu, serta memberikan respon berupa peringatan dan proteksi secara otomatis ketika terjadi kondisi abnormal.

2.1 Diagram Blok

Blok diagram sistem menggambarkan hubungan antar komponen utama dalam sistem monitoring dan proteksi yang dikembangkan. Sistem terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu unit input, unit pemrosesan, dan unit output. Motor induksi tiga fasa berfungsi sebagai objek yang dimonitor. Parameter operasional motor diukur menggunakan sensor PZEM-004T untuk mendeteksi tegangan dan arus pada masing-masing fasa, serta sensor MAX6675 untuk mendeteksi suhu motor. Data hasil pembacaan sensor dikirimkan ke mikrokontroler Arduino Mega sebagai pusat pengendali sistem. Mikrokontroler memproses data berdasarkan batas parameter yang telah ditentukan untuk mendeteksi kondisi gangguan seperti voltage unbalance, overcurrent, dan overheating. Hasil pengolahan data kemudian ditampilkan melalui TFT LCD sebagai media monitoring. Selain itu, sistem dilengkapi dengan buzzer sebagai indikator peringatan dini dan relay sebagai aktuator proteksi yang berfungsi memutus suplai daya ketika terjadi gangguan. Power supply digunakan untuk menyuplai kebutuhan tegangan seluruh komponen agar sistem dapat bekerja secara stabil. Blok diagram peralatan ini disajikan pada gambar 1.



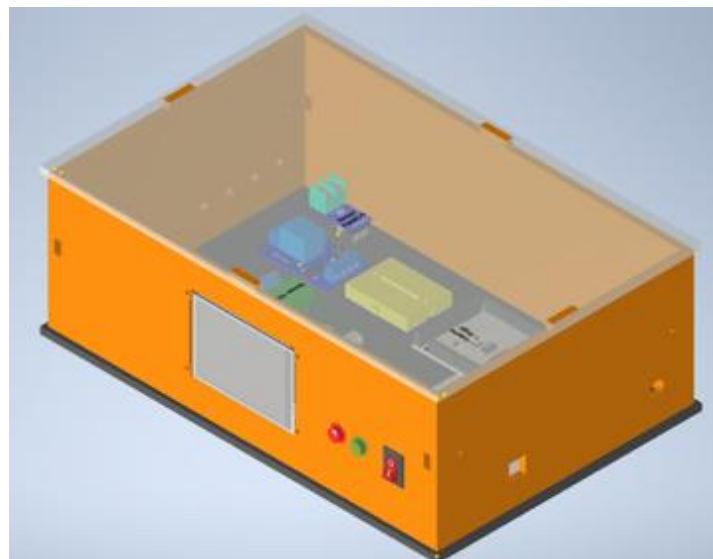
Gambar 1: Diagram Blok Sistem Monitoring dan Proteksi Motor Induksi Tiga Fasa

2.2 Perancangan Hardware

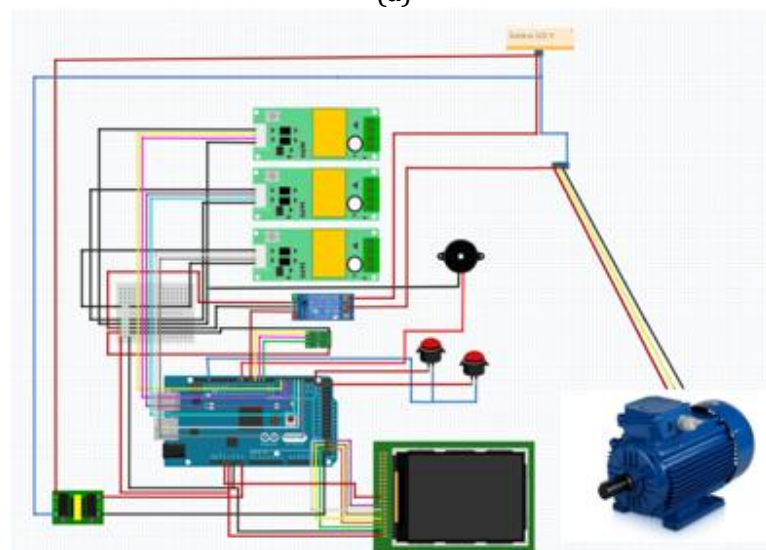
Perancangan perangkat keras dilakukan dengan mengintegrasikan seluruh komponen sistem dalam satu rangkaian yang terstruktur dan fungsional. Sistem menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560 sebagai pusat kendali yang memiliki kapasitas input-output yang memadai untuk mengelola beberapa sensor secara simultan. Sensor PZEM-004T digunakan untuk mengukur tegangan dan arus pada masing-masing fasa motor, yang dihubungkan ke mikrokontroler melalui komunikasi serial. Sensor MAX6675 digunakan untuk mengukur suhu motor dengan metode termokopel yang memiliki tingkat akurasi dan kestabilan yang baik.

TFT LCD digunakan sebagai media output untuk menampilkan nilai parameter secara real-time, sedangkan buzzer berfungsi sebagai indikator peringatan ketika terjadi gangguan awal. Relay digunakan sebagai komponen proteksi yang akan memutus suplai daya motor secara otomatis ketika parameter melebihi batas aman.

Seluruh komponen disusun dalam sebuah konstruksi berbahan akrilik yang dirancang dengan mempertimbangkan aspek keamanan, kerapian, dan kemudahan penggunaan. Power supply digunakan untuk mengkonversi tegangan AC menjadi DC sebesar 5V yang dibutuhkan oleh mikrokontroler dan sensor. Rangkaian kontrol sistem disusun berdasarkan diagram wiring yang menghubungkan seluruh komponen ke mikrokontroler sesuai dengan fungsi masing-masing, sehingga sistem dapat bekerja secara terintegrasi. Desain peralatan ini disajikan pada gambar 2.



(a)



(b)

Gambar 2: Design Alat: (a) Desain *Hardware*; (b) *Wiring Diagram*

2.3 Perancangan *Software*

Perancangan perangkat lunak pada sistem monitoring dan proteksi motor induksi tiga fasa dilakukan menggunakan platform Arduino IDE dengan bahasa pemrograman

berbasis C/C++. Perangkat lunak ini berperan sebagai inti dari sistem kontrol yang mengatur proses akuisisi data, pengolahan parameter, pengambilan keputusan, serta pengendalian output secara real-time.

Secara umum, arsitektur perangkat lunak dirancang dalam beberapa modul utama, yaitu modul inisialisasi sistem, modul akuisisi data sensor, modul pengolahan data dan deteksi gangguan, serta modul kontrol output dan antarmuka pengguna. Pendekatan modular ini bertujuan untuk meningkatkan keterbacaan program, kemudahan pengembangan, serta fleksibilitas dalam integrasi fitur tambahan di masa mendatang.

2.3.1 Inisialisasi Sistem

Pada tahap awal, sistem melakukan inisialisasi seluruh komponen perangkat keras yang terhubung dengan mikrokontroler. Proses ini meliputi konfigurasi pin input-output, inisialisasi komunikasi serial untuk sensor PZEM-004T, serta pemanggilan library yang diperlukan, seperti library PZEM004T untuk pengukuran arus dan tegangan, library MAX6675 untuk pengukuran suhu, dan library TFT LCD (Adafruit_ILI9341) untuk tampilan data.

Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan pengaturan parameter awal sistem, termasuk nilai batas (*threshold*) untuk masing-masing kondisi gangguan, yaitu batas ketidakseimbangan tegangan, batas arus maksimum, dan batas suhu operasi. Parameter ini menjadi acuan utama dalam proses pengambilan keputusan pada sistem.

2.3.2 Akuisisi data sensor

Proses akuisisi data dilakukan secara kontinu dalam siklus program utama (*looping*). Sensor PZEM-004T digunakan untuk membaca parameter tegangan dan arus pada masing-masing fasa (R, S, dan T) melalui komunikasi serial yang terpisah, sehingga memungkinkan pembacaan multi-fasa secara simultan.

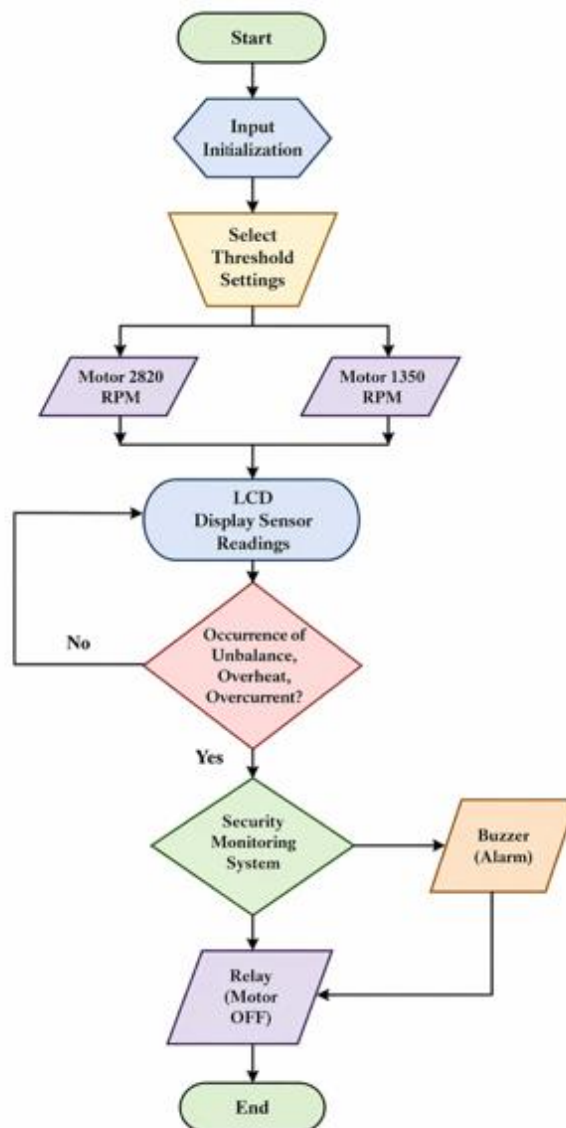
Sementara itu, sensor MAX6675 digunakan untuk membaca suhu motor dengan memanfaatkan komunikasi berbasis SPI. Data suhu yang diperoleh merupakan representasi kondisi termal permukaan motor yang menjadi indikator penting dalam mendeteksi *overheating*. Data yang diperoleh dari masing-masing sensor disimpan dalam variabel terstruktur dan selanjutnya digunakan sebagai input dalam proses analisis kondisi sistem.

2.4 Flowchart

Flowchart digunakan untuk menggambarkan alur kerja sistem secara sistematis mulai dari proses awal hingga sistem menghasilkan output berupa monitoring dan proteksi.

Proses diawali dengan inisialisasi sistem, yaitu aktivasi mikrokontroler dan seluruh komponen pendukung. Selanjutnya, sistem melakukan pembacaan data dari sensor PZEM-004T dan MAX6675 secara kontinu untuk memperoleh nilai tegangan, arus, dan suhu motor. Data yang diperoleh kemudian ditampilkan pada TFT LCD sebagai bagian dari proses monitoring. Selanjutnya, sistem melakukan evaluasi terhadap nilai parameter yang terukur dengan membandingkannya terhadap batas yang telah ditentukan.

Apabila parameter masih berada dalam kondisi normal, sistem akan terus melakukan monitoring secara berulang. Namun, jika terdeteksi kondisi gangguan, sistem akan mengaktifkan buzzer sebagai peringatan dini. Jika kondisi gangguan terus berlanjut atau mencapai batas kritis, sistem akan mengaktifkan relay untuk memutus suplai daya ke motor sebagai bentuk proteksi. Proses ini berlangsung secara terus-menerus (*real-time loop*) sehingga memungkinkan sistem untuk merespon perubahan kondisi motor secara cepat dan akurat. Flowchart sistem pada penelitian ini disajikan pada gambar 3.



Gambar 3: Flowchart Sistem

3. Results and discussion

Pengujian sistem dilakukan setelah seluruh tahapan perancangan dan perakitan selesai, dengan mengintegrasikan komponen utama seperti sensor PZEM004T untuk pengukuran arus dan tegangan, sensor MAX6675 untuk pengukuran suhu, buzzer sebagai indikator peringatan, serta relay sebagai perangkat proteksi dalam satu sistem yang ditempatkan pada kotak akrilik berukuran 25 × 20 × 10 cm dan diujikan langsung pada motor induksi tiga fasa agar merepresentasikan kondisi operasional nyata. Pengujian dilakukan secara menyeluruh maupun parsial pada setiap komponen dan program untuk memastikan kesesuaian fungsi dengan spesifikasi dan dasar teori, sekaligus mengidentifikasi potensi kesalahan selama implementasi. Data yang diperoleh dari pengujian sistematis ini kemudian dianalisis untuk mengevaluasi kinerja alat, meliputi akurasi pembacaan sensor, kecepatan respon terhadap gangguan, serta kesesuaian hasil dengan parameter yang ditetapkan, sehingga dapat ditentukan apakah sistem monitoring dan proteksi yang dikembangkan telah bekerja optimal sesuai tujuan penelitian.

3.1 Hasil dan Analisis Pengujian Sensor Arus dan Tegangan PZEM004T

Pada sistem monitoring motor yang dikembangkan, sensor PZEM004T digunakan sebagai perangkat utama untuk mengukur parameter kelistrikan berupa arus dan tegangan pada motor induksi tiga fasa, di mana data hasil pembacaan tidak hanya ditampilkan pada layar LCD sebagai bagian dari proses monitoring, tetapi juga dimanfaatkan sebagai parameter utama dalam mendeteksi kondisi operasional motor, sehingga pengujian sensor ini menjadi tahap penting untuk memastikan keakuratan dan keandalan data yang dihasilkan. Proses pengujian dilakukan dengan menghubungkan sensor secara langsung pada rangkaian motor sebagai beban uji, dengan konfigurasi paralel antara netral dan masing-masing fasa (R, S, dan T) untuk pengukuran tegangan, serta konfigurasi seri pada setiap jalur fasa untuk pengukuran arus, sehingga sensor dapat membaca nilai sesuai kondisi aktual sistem. Nilai arus dan tegangan yang terbaca kemudian ditampilkan pada layar LCD dan dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan multimeter sebagai alat ukur standar untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor. Hasil pengujian ini memberikan informasi mengenai kinerja sensor PZEM004T dalam membaca parameter kelistrikan secara tepat, yang selanjutnya dianalisis untuk menentukan kelayakannya dalam sistem monitoring dan proteksi motor induksi tiga fasa. Gambar pengujian disajikan pada gambar 4.



Gambar 4: Pengujian Sensor PZEM004T dengan Alat Ukur

Gambar 4 menunjukkan proses perbandingan pembacaan sensor dengan alat ukur secara langsung, sebagaimana juga diperjelas pada lampiran terkait, sementara pada **Tabel 1** terlihat bahwa hasil pengukuran sensor memiliki tingkat akurasi yang baik dengan selisih pembacaan relatif kecil, yaitu sebesar 0,2 V pada fasa S dan 0,5 V pada fasa R, sehingga dapat disimpulkan bahwa data yang ditampilkan pada LCD masih akurat dan sensor layak digunakan dalam sistem yang dikembangkan.

Tabel 1: Perbandingan Pengujian Sensor PZEM004T dengan Multimeter

Fasa	Pengujian dengan Sensor		Pengujian dengan Alat Ukur	
	Arus	Tegangan	Arus	Arus
R	0.75A	233.7V	0.76A	0.75A
S	0.76A	233.3V	0.77A	0.76A
T	0.76A	233.4V	0.75A	0.76A

3.2 Hasil dan Analisis Pengujian Sensor Suhu MAXX6675

Pada sistem monitoring yang dirancang, sensor MAX6675 digunakan untuk mengukur suhu motor sebagai salah satu parameter penting dalam mendeteksi kondisi operasional, khususnya terkait potensi terjadinya *overheating*. Data suhu yang diperoleh dari sensor ini ditampilkan pada layar LCD sebagai bagian dari proses monitoring,

sekaligus digunakan sebagai dasar dalam sistem deteksi dan proteksi. Oleh karena itu, pengujian terhadap sensor suhu menjadi langkah penting untuk memastikan tingkat keakuratan dan kestabilan pembacaan yang dihasilkan dalam merepresentasikan kondisi termal motor.

Proses pengujian dilakukan dengan menempatkan sensor MAX6675 pada permukaan casing motor, sehingga sensor dapat mendeteksi perubahan suhu selama motor beroperasi. Nilai suhu yang terbaca kemudian ditampilkan pada layar LCD untuk memudahkan proses pengamatan, dan selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan alat ukur standar berupa termometer. Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara data yang dihasilkan sensor dengan nilai referensi. Gambar 5 menunjukkan proses perbandingan pembacaan sensor dengan alat ukur secara langsung.



Gambar 5: Pengujian Sensor Suhu MAX6675 dengan Alat Ukur

Pengujian sensor dilakukan sebanyak tiga kali percobaan untuk memperoleh data yang lebih representatif serta memastikan konsistensi hasil pembacaan. Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 2, terlihat bahwa terdapat perbedaan pembacaan sebesar 0,25 °C pada percobaan pertama dan kedua, serta 0,5 °C pada percobaan ketiga. Meskipun demikian, selisih tersebut masih dalam batas yang dapat diterima, sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil pembacaan sensor pada LCD cukup akurat dan layak digunakan dalam sistem monitoring dan proteksi motor induksi tiga fasa yang telah dikembangkan.

Tabel 2: Pengujian Sensor MAX6675 dengan Alat Ukur

Percobaan	Pengujian dengan Sensor	Pengujian dengan Alat ukur
1	31.25°C	31.5°C
2	31.75°C	31.5°C
3	31.00°C	31.5°C

3.3 Hasil dan Analisis Pengujian Relay dan Buzzer

Pada sistem monitoring dan proteksi yang dikembangkan, relay dan buzzer berperan sebagai komponen output utama yang berfungsi dalam mekanisme proteksi dan peringatan dini terhadap gangguan motor induksi tiga fasa. Relay digunakan sebagai aktuator untuk memutus suplai tegangan ke motor ketika terdeteksi kondisi gangguan yang melebihi batas aman, sedangkan buzzer berfungsi sebagai indikator peringatan awal sebelum gangguan mencapai kondisi kritis. Pengujian kedua komponen ini dilakukan dengan mengintegrasikannya ke dalam sistem yang dikendalikan oleh

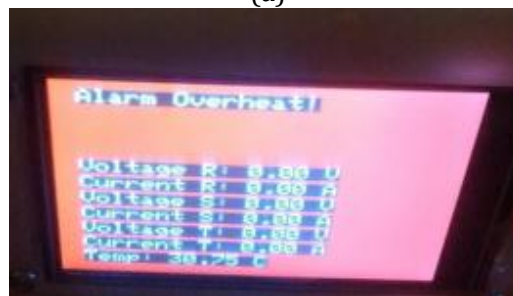
mikrokontroler, menggunakan sensor suhu MAX6675 sebagai parameter pemicu untuk mensimulasikan kondisi overheating.

Proses pengujian dilakukan dengan memanaskan sensor suhu secara bertahap hingga mencapai nilai ambang yang telah ditentukan. Pada pengujian relay, salah satu fasa dihubungkan pada terminal A1 kontaktor motor, sehingga ketika suhu mencapai batas sekitar 35°C, relay akan aktif dan memutus suplai daya ke motor sebagai bentuk proteksi. Sementara itu, pada pengujian buzzer, sistem dirancang untuk memberikan respon lebih awal, di mana buzzer akan aktif ketika suhu mencapai sekitar 30°C, disertai dengan tampilan pesan “Alarm Overheat” pada layar LCD. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respon bertahap, dimulai dari peringatan hingga tindakan proteksi. Berdasarkan hasil pengujian, baik relay maupun buzzer menunjukkan kinerja yang sesuai dengan logika sistem yang telah dirancang. Relay mampu merespon sinyal kontrol dengan baik dan menjalankan fungsi pemutusan daya secara efektif, sedangkan buzzer mampu memberikan peringatan dini kepada pengguna sebelum kondisi gangguan menjadi lebih serius. Gambar 6 memperlihatkan bahwa kedua komponen bekerja secara optimal dalam mendukung sistem monitoring dan proteksi motor induksi tiga fasa.

```

16:29:58.719 -> Voltage R: 234.50 V
16:29:58.719 -> Current R: 0.77 A
16:29:58.752 -> Voltage S: 233.10 V
16:29:58.752 -> Current S: 0.78 A
16:29:58.815 -> Voltage T: 230.20 V
16:29:58.861 -> Current T: 0.66 A
16:29:58.861 -> Temperature: 35.50 C
16:30:00.013 -> Relay activated! High imbalance or overheat detected.
  
```

(a)

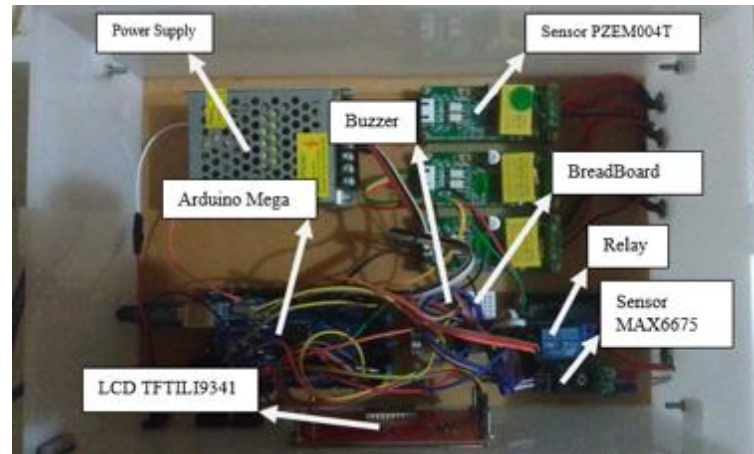


(b)

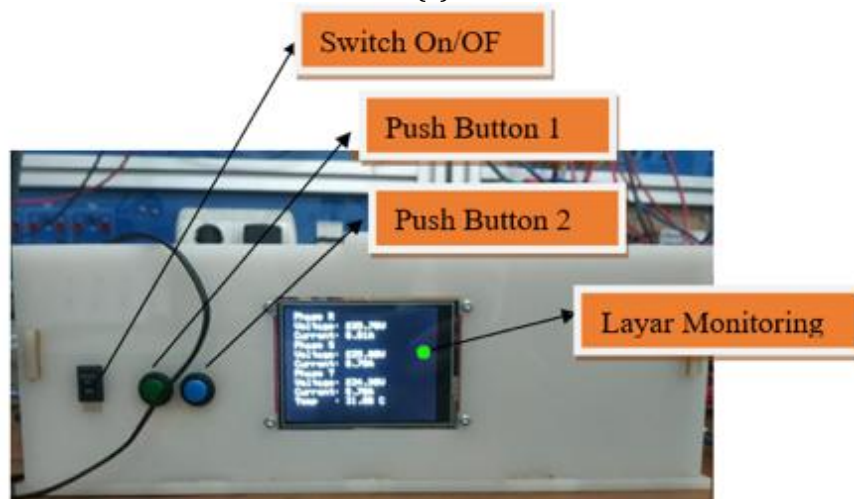
Gambar 6: Pengujian Relay

3.4 Hasil dan Analisis Pengujian Perangkat

Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan setelah seluruh komponen, meliputi mikrokontroler, TFT LCD, sensor PZEM004T dan MAX6675, relay, buzzer, serta catu daya, terintegrasi dalam satu sistem yang ditempatkan pada kotak akrilik. Tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh komponen dapat bekerja secara terpadu sesuai dengan fungsi yang dirancang. Implementasi fisik sistem dapat dilihat pada gambar 7 alat tampak atas dan alat tampak depan.



(a)



(b)

Gambar 7: Fisik alat: (a) tampak atas; (b) tampak depan

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan sistem ke motor induksi tiga fasa, kemudian sistem diaktifkan melalui sakelar. Setelah aktif, pengguna memilih parameter batas melalui push button, dan sistem mulai menampilkan data tegangan, arus, dan suhu secara real-time pada layar LCD. Ketika terdeteksi kondisi gangguan, sistem secara otomatis memberikan notifikasi serta mengaktifkan mekanisme peringatan dan proteksi sesuai logika yang telah diprogram. Pengujian dilakukan menggunakan dua motor dengan spesifikasi berbeda, yaitu motor 0,75 KW untuk kondisi normal dan motor 0,35 kW untuk skenario gangguan, sehingga kinerja sistem dapat dievaluasi pada berbagai kondisi operasional.

3.4.1 Pengujian Motor Induksi Tiga Fasa 0,75 KW (Kondisi Normal)

Hasil pengujian motor induksi tiga fasa 0,75 kW pada skenario operasi normal tanpa gangguan ditampilkan pada Tabel 3. Pengujian dilakukan dengan mengaktifkan *push button* pertama, di mana motor dioperasikan dalam kondisi tanpa beban tambahan dan sistem monitoring mencatat parameter tegangan, arus, suhu, serta status operasi motor setiap 5 detik.

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 3, motor induksi 0,75 kW beroperasi secara stabil selama interval pengamatan 0–45 detik dengan status sistem selalu berada pada kondisi *Running*, yang menunjukkan bahwa sistem kontrol dan monitoring mampu memantau kondisi kerja motor secara kontinu tanpa mendeteksi gangguan maupun mengaktifkan sistem proteksi. Tegangan pada ketiga fasa juga relatif stabil, yaitu fasa R

sebesar 233,4–233,9 V, fasa S sebesar 233,2–233,6 V, dan fasa T sebesar 233,2–233,5 V, dengan rata-rata sekitar 233,43 V serta fluktuasi kurang dari 1 V. Kondisi ini menunjukkan bahwa sumber tegangan berada dalam keadaan normal dan seimbang selama pengujian berlangsung.

Tabel 3: Pengujian tegangan, arus dan suhu terhadap motor 0,75 KW

Waktu (detik)	Tegangan (V)			Arus (A)			Suhu °C	Kondisi
	R	S	T	R	S	T		
0	233.7	233.3	233.2	0.76	0.77	0.75	30.00	Running
5	233.7	233.3	233.2	0.76	0.77	0.75	30.25	Running
10	233.8	233.2	233.2	0.76	0.77	0.75	29.75	Running
15	233.5	233.6	233.2	0.75	0.77	0.76	30.00	Running
20	233.6	233.2	233.5	0.75	0.75	0.77	30.00	Running
25	233.6	233.2	233.5	0.76	0.78	0.77	30.75	Running
30	233.9	233.3	233.5	0.76	0.77	0.76	29.75	Running
35	233.9	233.3	233.3	0.74	0.76	0.74	30.25	Running
40	233.4	233.3	233.2	0.74	0.75	0.76	30.75	Running
45	233.4	233.6	233.2	0.77	0.78	0.75	30.25	Running

Parameter arus dan suhu juga menunjukkan kondisi operasi yang stabil. Arus pada masing-masing fasa berada pada rentang 0,74–0,78 A dengan rata-rata sekitar 0,759 A atau sekitar 46,3% dari arus nominal motor (1,64 A), sehingga masih berada dalam kisaran normal untuk operasi tanpa beban. Suhu motor berada pada rentang 29,75–30,75°C dengan rata-rata sekitar 30,18°C, yang mengindikasikan tidak terjadi pemanasan berlebih karena arus yang mengalir relatif kecil. Secara keseluruhan, hasil pengujian membuktikan bahwa sistem monitoring mampu membaca parameter tegangan, arus, dan suhu secara akurat dan stabil, sementara motor tetap beroperasi dalam kondisi aman sepanjang pengujian.

3.4.2 Pengujian Motor Induksi Tiga Fasa 0,35 kW (Kondisi Gangguan)

Hasil pengujian sistem proteksi terhadap kondisi *voltage unbalance* pada motor induksi tiga fasa 0,35 kW ditampilkan pada Tabel 13. Pada skenario ini, motor dioperasikan dengan simulasi gangguan ketidakseimbangan tegangan melalui penurunan salah satu tegangan fasa, yaitu fasa R, secara bertahap sebesar sekitar 1 V setiap 10 detik. Parameter yang diamati meliputi tegangan fasa-netral R, S, dan T, tegangan antar-fasa V_{RS} , V_{ST} , dan V_{TR} , persentase *voltage unbalance* (%UV), serta respons sistem proteksi terhadap kondisi motor.

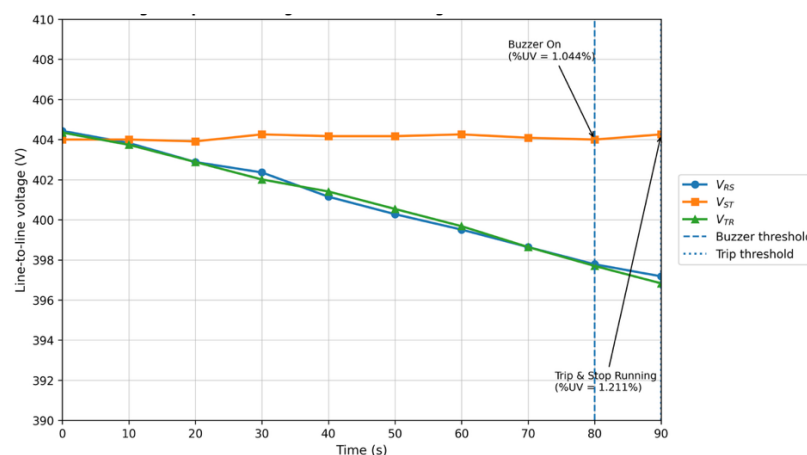
Tabel 4: Pengujian terhadap Voltage Unbalance Motor 0,35 kW

Waktu (detik)	R (V)	S (V)	T (V)	V_{RS} (V)	V_{ST} (V)	V_{TR} (V)	%UV	Keterangan
0	233.7	233.3	233.2	404.43	404.00	404.35	0.064%	Running
10	233.0	233.3	233.2	403.83	404.00	403.74	0.036%	Running
20	232.0	233.2	233.2	402.88	403.91	402.88	0.172%	Running
30	231.0	233.6	233.2	402.36	404.26	402.01	0.344%	Running
40	230.0	233.2	233.5	401.15	404.17	401.41	0.480%	Running
50	229.0	233.2	233.5	400.28	404.17	400.54	0.624%	Running
60	228.0	233.3	233.5	399.51	404.26	399.68	0.776%	Running
70	227.0	233.3	233.3	398.64	404.09	398.64	0.906%	Running
80	226.0	233.3	233.2	397.78	404.00	397.70	1.044%	Buzzer On
90	225.0	233.6	233.2	397.18	404.26	396.83	1.211%	Trip & Stop Running

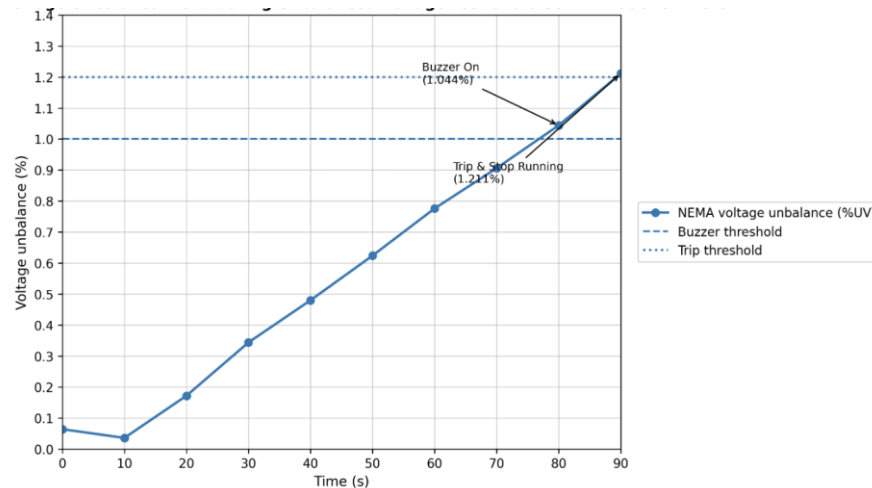
Berdasarkan Tabel 4, pada kondisi awal pengujian tegangan fasa-netral berada dalam kondisi relatif seimbang, yaitu 233,7 V (R), 233,3 V (S), dan 233,2 V (T), sehingga menghasilkan tegangan antar-fasa V_{RS} , V_{ST} , dan V_{TR} masing-masing sebesar 404,43 V, 404,00 V, dan 404,35 V dengan nilai *voltage unbalance* sebesar 0,064%. Pada kondisi ini motor terdeteksi beroperasi normal dengan status *Running*. Selanjutnya, tegangan fasa R diturunkan secara bertahap hingga 225,0 V, sedangkan tegangan fasa S dan T dipertahankan relatif stabil. Penurunan ini menyebabkan tegangan antar-fasa yang melibatkan fasa R (V_{RS} dan V_{TR}) ikut menurun, sementara V_{ST} tetap relatif konstan, sehingga simulasi *voltage unbalance* berhasil dibentuk secara bertahap dan terkontrol. Seiring penurunan tegangan fasa R, nilai *voltage unbalance* meningkat secara bertahap dari 0,036% pada 10 detik menjadi 0,906% pada 70 detik. Meskipun terjadi peningkatan ketidakseimbangan tegangan, sistem tetap mempertahankan status motor pada kondisi *Running* karena nilai *voltage unbalance* masih berada di bawah batas peringatan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu membedakan kondisi ketidakseimbangan ringan yang masih aman dengan kondisi gangguan yang memerlukan tindakan proteksi.

Respons proteksi mulai aktif pada waktu 80 detik ketika tegangan fasa R mencapai 226,0 V dan nilai *voltage unbalance* meningkat menjadi 1,044%, sehingga sistem mengaktifkan buzzer sebagai peringatan dini bahwa motor telah memasuki kondisi operasi yang tidak ideal. Ketika tegangan fasa R kembali turun menjadi 225,0 V pada 90 detik, nilai *voltage unbalance* meningkat menjadi 1,211%, sehingga sistem melakukan *Trip* dan menghentikan operasi motor. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem proteksi mampu memberikan respons bertahap sesuai tingkat keparahan gangguan, mulai dari peringatan hingga penghentian operasi motor.

Visualisasi pada Gambar 8 memperkuat hasil pengujian tersebut. Gambar 8(a) memperlihatkan penurunan tegangan antar-fasa V_{RS} dan V_{TR} dengan V_{ST} yang tetap relatif stabil. Sedangkan Gambar 8(b) menunjukkan peningkatan persentase *voltage unbalance* berdasarkan standar NEMA seiring penurunan tegangan fasa R, hingga sistem mengaktifkan *buzzer* pada sekitar 1% dan melakukan *trip* pada sekitar 1,2%. Secara keseluruhan, hasil pengujian membuktikan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mendeteksi, memberikan peringatan, dan melakukan proteksi terhadap gangguan *unbalanced voltage* pada motor induksi tiga fasa secara efektif.



(a)



(b)

Gambar 8: Grafik pengujian *unbalanced voltage*: (a) Tegangan V_{RS} , V_{ST} , V_{TR} ; (b) Tren persentase *voltage unbalance*

Hasil pengujian sistem terhadap kondisi overcurrent pada motor induksi tiga fasa 0,35 kW ditampilkan pada Tabel 5. Pada skenario ini, motor induksi dihubungkan dengan beban, kemudian beban dinaikkan secara bertahap untuk menghasilkan peningkatan arus motor. Pengaturan kenaikan arus dilakukan dengan mengacu pada arus fasa R, di mana arus dinaikkan sekitar 0,20 A setiap 10 detik. Parameter yang diamati meliputi arus pada fasa R, S, dan T, serta respons sistem proteksi terhadap peningkatan arus motor.

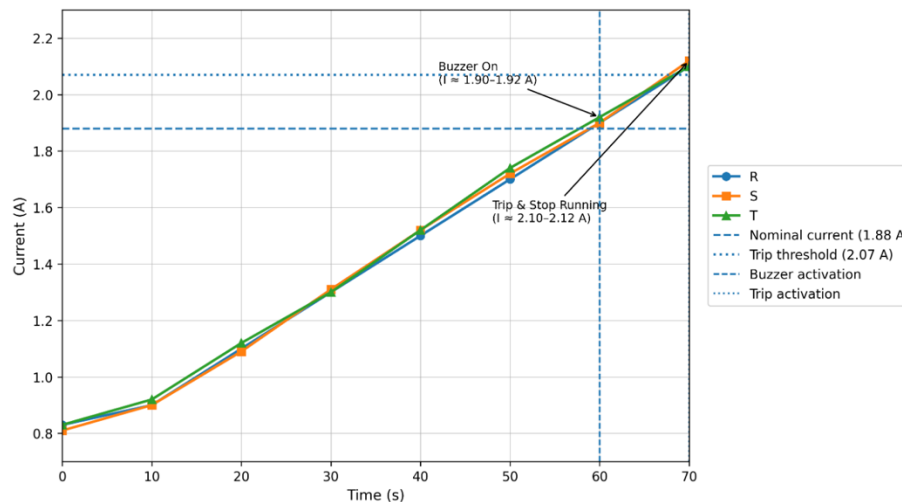
Tabel 5: Pengujian *overcurrent* terhadap motor 0,35 kW

Waktu	Arus (A)			Keterangan
	R	S	T	
0	0,83	0,81	0,83	<i>Running</i>
10	0,90	0,90	0,92	<i>Running</i>
20	1,10	1,09	1,12	<i>Running</i>
30	1,30	1,31	1,30	<i>Running</i>
40	1,50	1,52	1,52	<i>Running</i>
50	1,70	1,72	1,74	<i>Running</i>
60	1,90	1,90	1,92	<i>Buzzer On</i>
70	2,10	2,12	2,10	<i>Trip & Stop Running</i>

Berdasarkan Tabel 5, pada kondisi awal pengujian arus motor berada pada kisaran 0,81–0,83 A pada ketiga fasa, sehingga motor beroperasi normal dengan status *Running* karena nilai tersebut masih jauh di bawah arus nominal sebesar 1,88 A. Seiring peningkatan beban, arus motor meningkat secara bertahap menjadi sekitar 0,90–0,92 A pada 10 detik, 1,09–1,12 A pada 20 detik, 1,30 A pada 30 detik, dan 1,50–1,52 A pada 40 detik. Selama arus masih berada di bawah batas proteksi, sistem tetap mempertahankan motor dalam kondisi *Running*, yang menunjukkan bahwa sistem monitoring mampu membaca kenaikan arus secara stabil tanpa melakukan pemutusan operasi.

Respons proteksi mulai aktif pada 60 detik ketika arus mencapai sekitar 1,90–1,92 A atau telah melebihi arus nominal motor, sehingga sistem mengaktifkan *Buzzer On* sebagai peringatan dini kondisi *overcurrent*. Pada 70 detik, arus meningkat menjadi sekitar 2,10–2,12 A atau melampaui batas *overcurrent* sebesar 10% dari arus nominal, sehingga sistem melakukan *trip* dan menghentikan operasi motor. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem proteksi bekerja secara bertahap sesuai skenario, yaitu mempertahankan operasi normal saat arus masih aman, memberikan peringatan ketika arus melebihi arus nominal, dan melakukan pemutusan ketika arus

mencapai kondisi yang berpotensi membahayakan motor. Hasil pengujian ini juga divisualisasikan dalam bentuk grafik pada Gambar 9.



Gambar 9: Visualisasi pengujian Arus Lebih

3.5 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring dan proteksi gangguan motor induksi tiga fasa yang dirancang mampu bekerja secara fungsional sesuai dengan tujuan perancangan. Hal ini dibuktikan melalui pengujian komponen secara individual hingga sistem secara keseluruhan, di mana seluruh komponen utama seperti sensor arus dan tegangan, sensor suhu, relay, dan buzzer dapat beroperasi dengan baik serta terintegrasi melalui mikrokontroler Arduino Mega. Integrasi ini menegaskan bahwa sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring, tetapi juga sebagai sistem proteksi yang mampu merespon kondisi gangguan secara otomatis.

Hasil pengujian sensor PZEM004T menunjukkan tingkat akurasi yang baik, ditandai dengan kesesuaian nilai pembacaan terhadap alat ukur standar dengan deviasi yang relatif kecil pada setiap fasa. Hal ini mengindikasikan bahwa sensor mampu merepresentasikan kondisi kelistrikan motor secara akurat, sehingga data yang dihasilkan dapat diandalkan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan sistem proteksi. Sementara itu, sensor suhu MAX6675 juga menunjukkan konsistensi pembacaan yang baik dengan selisih yang kecil terhadap termometer, sehingga layak digunakan sebagai parameter utama dalam mendeteksi kondisi overheating.

Dari sisi sistem proteksi, relay menunjukkan kinerja yang sesuai dengan fungsi perancangannya, yaitu memutus suplai daya ketika parameter operasional melebihi batas aman. Aktivasi relay pada kondisi suhu kritis menunjukkan bahwa sistem mampu merespon gangguan secara otomatis dan tepat. Selain itu, buzzer sebagai sistem peringatan dini juga bekerja dengan baik dengan memberikan sinyal peringatan sebelum kondisi mencapai tingkat kritis, sehingga memungkinkan operator melakukan tindakan preventif sebelum proteksi utama diaktifkan.

Pada pengujian sistem dalam kondisi normal menggunakan motor 0,75 kW, parameter tegangan, arus, dan suhu berada dalam kondisi stabil tanpa fluktuasi signifikan. Tidak adanya aktivasi buzzer maupun relay menunjukkan bahwa sistem mampu membedakan kondisi normal secara tepat serta tidak menghasilkan kesalahan deteksi (*false alarm*). Hal ini menegaskan bahwa sistem memiliki tingkat keandalan yang baik dalam melakukan monitoring secara kontinu.

Sebaliknya, pada kondisi gangguan menggunakan motor 0,35 kW, sistem menunjukkan sensitivitas yang baik dalam mendeteksi perubahan parameter. Pada kondisi *voltage*

unbalance, sistem mampu mengidentifikasi ketidakseimbangan tegangan yang melebihi batas dan merespon dengan mengaktifkan relay. Pada pengujian *overcurrent* dan *overheat*, sistem juga menunjukkan pola respon bertahap, di mana buzzer aktif sebagai peringatan awal dan relay aktif pada kondisi kritis. Pola ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan klasifikasi tingkat keparahan gangguan dan mampu memberikan respon yang proporsional.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam aspek integrasi fungsi monitoring dan proteksi. Hasil penelitian-penelitian sebelumnya yang mengembangkan sistem monitoring berbasis suhu, getaran, dan arus telah mampu memberikan peringatan terhadap gangguan, namun belum dilengkapi dengan mekanisme proteksi otomatis [5], [16], [17]. Berbeda dengan pendekatan tersebut, sistem dalam penelitian ini telah mengintegrasikan fungsi proteksi melalui relay yang bekerja secara langsung berdasarkan kondisi parameter, sehingga meningkatkan tingkat keamanan operasional motor.

Selain itu, jika dibandingkan dengan penelitian-penelitian yang menggunakan sensor ZMPT101B dan ACS712 untuk pemantauan parameter listrik, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan keunggulan dalam hal kelengkapan parameter [17], [18]. Hasil penelitian sebelumnya belum mengintegrasikan parameter suhu, sehingga belum mampu mendeteksi kondisi overheating secara langsung [5], [17]. Sebaliknya, sistem dalam penelitian ini menggabungkan pemantauan tegangan, arus, dan suhu secara simultan, sehingga mampu mendeteksi gangguan secara lebih komprehensif, baik dari aspek listrik maupun termal. Penelitian lainnya yang hanya berfokus pada parameter suhu menggunakan sensor LM35. Pendekatan tersebut memiliki keterbatasan karena tidak mempertimbangkan parameter listrik sebagai indikator awal gangguan [19], [20]. Dalam penelitian ini, sistem mampu mendeteksi perubahan tegangan dan arus sebagai indikasi awal sebelum berdampak pada kenaikan suhu, sehingga memberikan keunggulan dalam aspek deteksi dini. Selain itu, penelitian lainnya yang menggabungkan parameter arus dan suhu masih terbatas pada motor satu fasa, sedangkan sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini telah mampu mengakomodasi kompleksitas sistem tiga fasa, termasuk deteksi *voltage unbalance* [21], [22].

Dari aspek implementasi sistem, penelitian ini juga menunjukkan pendekatan yang lebih adaptif melalui penerapan dua level respon, yaitu peringatan awal dan proteksi utama. Pendekatan ini memberikan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional yang umumnya hanya memiliki satu level respon. Selain itu, penggunaan sensor PZEM004T dan MAX6675 menunjukkan tingkat akurasi yang baik, yang memperkuat keandalan sistem dalam membaca parameter operasional motor. Hal ini menjadi keunggulan dibandingkan beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan sensor dengan sensitivitas terbatas, seperti ACS712.

Secara keseluruhan, sistem monitoring dan proteksi yang dikembangkan menunjukkan kinerja yang baik dalam mendeteksi dan merespon berbagai jenis gangguan pada motor induksi tiga fasa. Dengan integrasi multi-parameter, kemampuan deteksi yang komprehensif, serta mekanisme proteksi bertahap, sistem ini tidak hanya mampu meningkatkan akurasi monitoring, tetapi juga memberikan respon yang adaptif terhadap kondisi gangguan. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan sistem monitoring motor induksi dan memiliki potensi yang kuat untuk diaplikasikan dalam meningkatkan keandalan sistem industri.

4. Conclusion

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring dan proteksi motor induksi tiga fasa berbasis mikrokontroler yang mampu bekerja secara

real-time dan terintegrasi. Sistem yang dikembangkan mampu memantau parameter utama, yaitu tegangan, arus, dan suhu, dengan tingkat akurasi yang baik serta mampu membedakan kondisi normal dan gangguan secara tepat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat mendeteksi berbagai jenis gangguan seperti *voltage unbalance*, *overcurrent*, dan *overheat*, serta memberikan respon bertahap melalui mekanisme peringatan (buzzer) dan proteksi (relay). Integrasi multi-parameter dan penerapan dua level respon menjadi kontribusi utama penelitian ini, yang memungkinkan sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring, tetapi juga sebagai sistem proteksi yang adaptif dan efektif dalam mendukung *condition-based maintenance* pada motor induksi tiga fasa. Dalam implementasinya, sistem ini dikembangkan dengan pendekatan yang terstruktur dan terkontrol sehingga mampu menunjukkan kinerja yang stabil dan andal dalam berbagai skenario pengujian. Ruang lingkup pengujian difokuskan pada kondisi operasional yang representatif untuk memastikan validasi fungsi sistem secara optimal. Ke depan, pengembangan sistem dapat diarahkan pada integrasi dengan teknologi berbasis jaringan seperti Internet of Things (IoT) untuk memungkinkan monitoring jarak jauh dan penyimpanan data secara kontinu, serta penerapan metode kecerdasan buatan (*machine learning*) untuk meningkatkan kemampuan analisis menuju *predictive maintenance*. Selain itu, optimalisasi desain perangkat keras dan perluasan skenario pengujian pada kondisi operasional yang lebih kompleks akan semakin memperkuat fleksibilitas dan skalabilitas sistem dalam aplikasi industri yang lebih luas.

References

- [1] A. Narendran and R. Sureshkumar, "Hysteresis-controlled - landsman converter based multilevel inverter fed induction-motor system using PIC," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 76, 2020, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103099.
- [2] T. Ghanbari, A. Mehraban, and E. Farjah, "Inter-turn fault detection of induction motors using a method based on spectrogram of motor currents," *Measurement*, vol. 205, p. 112180, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2022.112180.
- [3] M. F. Yakhni *et al.*, "Variable speed induction motors' fault detection based on transient motor current signatures analysis: A review," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 184, p. 109737, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.YMSSP.2022.109737.
- [4] A. G. D. ; O. Bissiriu *et al.*, "Monitoring and Diagnosing Faults in Induction Motors' Three-Phase Systems Using NARX Neural Network," *Energies 2024, Vol. 17, Page 4609*, vol. 17, no. 18, p. 4609, Sep. 2024, doi: 10.3390/EN17184609.
- [5] F. Cipollini, L. Oneto, A. Coraddu, S. Savio, and D. Anguita, "Unintrusive Monitoring of Induction Motors Bearings via Deep Learning on Stator Currents," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 144, pp. 42–51, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.PROCS.2018.10.503.
- [6] F. Liu, C. Hou, L. Liang, X. Zhang, D. Liu, and X. Wang, "Winding fault detection based on current information of induction motors," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–16, Dec. 2025, doi: 10.1038/S41598-025-17368-5;SUBJMETA.
- [7] P. Alkorta, J. A. Cortajarena, O. Barambones, and F. J. Maseda, "Effective generalized predictive control of induction motor," *ISA Trans.*, vol. 103, pp. 295–305, 2020, doi: 10.1016/j.isatra.2020.04.008.
- [8] J. Zhang, P. Wang, R. X. Gao, C. Sun, and R. Yan, "Induction Motor Condition Monitoring for Sustainable Manufacturing," *Procedia Manuf.*, vol. 33, pp. 802–809, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.04.101.
- [9] A. Zhang, X. He, A. Cammi, and X. Wang, "Modelica and Arduino-based hardware-in-the-loop simulation of a nuclear-powered engineering ship," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 429, p. 113650, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.NUCENGDES.2024.113650.
- [10] E. Riyanto, "Perancangan Pengukur Detak Jantung Dan Suhu Tubuh Berbasis Arduino Serta Smartphone Android," *Naskah Publikasi Ilmiah Mahasiswa Universitas Muhammadiyah Surakarta*, 2016.

- [11] A. I. Adekitan, I. Samuel, and E. Amuta, "Dataset on the performance of a three phase induction motor under balanced and unbalanced supply voltage conditions," *Data Brief*, vol. 24, p. 103947, 2019, doi: 10.1016/j.dib.2019.103947.
- [12] X. Wang, C. Zhu, R. Zhang, R. Tang, and H. Song-Yop, "Performance analysis of single-phase induction motor based on voltage source complex finite-element analysis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp. 587–590, 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.871454.
- [13] P. Pietrzak, P. Pietrzak, and M. Wolkiewicz, "Microcontroller-Based Embedded System for the Diagnosis of Stator Winding Faults and Unbalanced Supply Voltage of the Induction Motors," *Energies 2024, Vol. 17, Page 387*, vol. 17, no. 2, p. 387, Jan. 2024, doi: 10.3390/EN17020387.
- [14] P. Gnaciński, M. Pepliński, A. Muc, and D. Hallmann, "Induction Motors Under Voltage Unbalance Combined with Voltage Subharmonics," *Energies 2024, Vol. 17, Page 6324*, vol. 17, no. 24, p. 6324, Dec. 2024, doi: 10.3390/EN17246324.
- [15] M. Barroso, J. M. Bossio, C. M. Alaíz, and Á. Fernández, "Fault Detection in Induction Motors using Functional Dimensionality Reduction Methods," Jun. 2023, Accessed: Sep. 13, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2306.09365>
- [16] J. J. Guedes, M. F. Castoldi, A. Goedel, C. M. Agulhari, and D. S. Sanches, "Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution," *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 204–212, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.08.033.
- [17] M. Hussain, T. D. Memon, I. Hussain, Z. A. Memon, and D. Kumar, "Fault Detection and Identification Using Deep Learning Algorithms in Induction Motors," *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, vol. 133, no. 2, pp. 435–470, Jul. 2022, doi: 10.32604/CMES.2022.020583.
- [18] A. Raqeeb, F. Shah, Z. Alam, S. Choudhury, B. Khan, and R. Palanisamy, "Data-Driven Bearing Fault Diagnosis for Induction Motor," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2023, no. 1, p. 7173989, Jan. 2023, doi: 10.1155/2023/7173989.
- [19] A. Glowacz, "Acoustic based fault diagnosis of three-phase induction motor," *Applied Acoustics*, vol. 137, no. March, pp. 82–89, 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.03.010.
- [20] U. Ali, "Towards Fault Diagnosis in Induction Motor using Fractional Fourier Transform," Dec. 2024, Accessed: Sep. 13, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2412.18227>
- [21] M. D. Kumar, S. F. Kodad, and B. Sarvesh, "Simplified Fault Detection Algorithm for Voltage Source Fed Induction Motor," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 1401–1410, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.MATPR.2017.11.226.
- [22] A. Kouzou, P. Saifullah, A. Iqbal, and H. Abu-Rub, "Performance analysis of a five phase induction motor under unbalanced voltage supply," *2013 10th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2013*, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1109/SSD.2013.6564086.