

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Dalam penelitian ini, metode pengumpulan data penelitian sejenis yang akan dijadikan acuan dilakukan dengan cara mempelajari jurnal dan literatur tulisan pendukung.

2.1.1. Pemantauan Kondisi Motor Induksi 3 Fasa Berbasis IOT

Penelitian mengenai motor induksi 3 fasa sebelumnya telah dilakukan oleh P.M. Akotkar, V.S. Karale, dan Dr. A. U. Jawadekar di tahun 2020 berjudul “*Condition Monitoring of Three Phase Induction Motor Based on IOT*”. Penelitian dilakukan dengan melihat acuan pada tegangan, arus, getaran, dan temperatur menggunakan sensor tegangan (ZMPT101b), sensor arus (ACS712), sensor suhu (DHT11), Sensor Getaran (LM393), Arduino UNO, dan ESP 8266. Dalam penelitian ini, deteksi kondisi tersebut dilakukan melalui ESP 8266 yang selanjutnya dikirim ke server ThingSpeak yang kemudian tercatat dan terhistori. Jika kondisi abnormal, operator dapat mematikan motor dari rangkaian kontrol motor untuk mengirimkan sinyal digital ke Mikrokontroler[7].

Penelitian ini memiliki kelebihan pada sistemnya yang menggunakan Thingspeak sehingga bisa menampilkan data berbentuk grafik antara satuan yang diukur dengan waktu dan bisa dilihat dimana saja. Percobaan yang akan dilakukan kali ini akan tetap menggunakan Arduino namun tanpa menggunakan ESP 8266, dan untuk penampilan datanya menggunakan *Visual Basic*. Alat ini tidak menggunakan Thingspeak dikarenakan dalam penelitian ini fokus pada data yang terpusat sebagai sistem kontrol SCADA level dasar dan penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut di kemudian hari.

2.1.2. Pemantauan dan Pengendalian Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan IOT

Penelitian tentang pemantauan dan pengendalian motor induksi 3 fasa sebelumnya juga sudah dilakukan oleh S.Indhumathi, J.Berlin John, M.Anitha, dan A.Ramkumar di tahun 2021 dengan judul “*Three Phase Induction Motor Monitoring and Controlling using IoT*”. Penelitian ini dilakukan dengan pemantauan terhadap suhu, tegangan, dan arus yang dibandingkan dengan kondisi saat sebelum *start*, motor *running*, dan motor saat mati. Didapati bahwa tegangan fluktuatif tidak stabil mulai dari

180V saat sebelum motor start, menuju 198V, 192V, 194V, 185V, 185V tiap 15 menit sekali dan 190V saat motor *off* (kemungkinan sumber tak stabil), sementara arus cenderung stabil di angka 0,36A sampai 0,34A dan temperatur naik dengan stabil mulai dari 26,55C – 47,18C[8].

Penelitian ini menunjukkan bahwa pentingnya perbandingan satuan yang diukur / dipantau dengan waktu, namun juga perbandingan antar satuan dengan satuan untuk mempermudah operator dalam membandingkan kondisi kesehatan motor dari waktu ke waktu.

2.1.3. Relay Proteksi untuk *Over Voltage*, *Under Voltage*, dan *Unbalance Voltage* Berbasis *Visual Basic* Menggunakan *Arduino Mega*

Penelitian lain dilakukan juga oleh Kukuh Widarsono, Moh. Jauhari, dan Anggika Lutfi Dzuhuri di tahun 2019 dengan judul “*Relay Protection of Over Voltage, Under Voltage and Unbalance Voltage Magnitude Based on Visual Basic Using Arduino Mega*”. Penelitian dilakukan dengan *monitoring* kondisi abnormal pada sumber tegangan seperti *unbalance voltage*, *over voltage*, dan *under voltage*. *Unbalance voltage* disini dilihat dari data penelitian yang masuk ke *Visual Basic* lengkap dengan arus, waktu, dan tanggal. Pengujian *over voltage* dan *under voltage* dilakukan dengan menggunakan *osiloskop* dengan tegangan *line to line* 380 V, diatur dalam batas bawah 285 V dan batas atas 418 V. Jika diluar batas tersebut maka kontaktor akan memutus aliran pada beban secara otomatis menggunakan relay 5 VDC dan *di-drive* menggunakan transistor 2N222[9].

Dari penelitian ini, dapat dikembangkan berupa persentase *error* yang akan ditampilkan di *Visual Basic* dan peringatan akan adanya *under / over voltage*. Alat ini merupakan pendeteksi yang akan menampilkan data dan mengontrol Relay Proteksi melalui *Visual Basic*. Perbedaan antara alat ini dengan penelitian di atas adalah kontrol pada relay yang akan dilakukan dengan manual, hal ini dimaksudkan agar operator dapat memilih waktu yang tepat untuk mematikan motor, misal saat keadaan dimana telah disiapkan motor pengganti.

2.1.4. Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi

Penelitian lain juga dilakukan oleh Ali Mashar di tahun 2021 berjudul “Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi 5,5 kW”. Penelitian ini mengkaji tentang pengaruh

ketidakseimbangan tegangan ini terhadap faktor daya, putaran, efisiensi, suhu kerja dan umur mesin. Penelitian dilakukan dengan motor listrik yang dihubungkan dengan sebuah generator DC.

Nilai Faktor Daya cenderung naik dengan semakin tingginya ketidakseimbangan tegangan, yaitu 0,77 pada 0% (keadaan seimbang) sampai 0,83 pada 4% *unbalance voltage*. Nilai putaran rotor turun secara linear terhadap peningkatan ketidakseimbangan tegangan input dengan rentang ketidakseimbangan sampai 10% putaran mengalami penurunan dari 2885 rpm menjadi 2810 rpm. Penurunan putaran rotor tersebut termasuk signifikan karena meningkatkan slip sebesar 2,5%. Nilai suhu belitan juga meningkat berbanding lurus dengan kenaikan ketidakseimbangan tegangan yang ada. Untuk rentang 10% *unbalance*, terjadi kenaikan suhu sebesar 11,3°C. Menurut standar IEEE 117 & 101, kenaikan suhu kerja sebesar 10°C di atas suhu kerja nominal akan menurunkan umur isolasi menjadi setengahnya. Namun penelitian ini juga mencatat bahwa kondisi tegangan yang tidak seimbang hingga 10% tidak mempengaruhi efisiensi motor, yaitu efisiensi 83,5% di 0% *unbalance* dan efisiensi 83,7% di 10% *unbalance*[10]. Penelitian ini memudahkan dalam membuat isi dari program pada alat yang dibuat, agar nilai dari faktor-faktor yang mempengaruhi masa hidup motor induksi dapat ditampilkan dan dibandingkan.

2.2. Monitoring

Monitoring merupakan proses pengumpulan data / informasi dengan tujuan dan metode tertentu. *Monitoring* dimaksudkan untuk mengetahui kecocokan dan ketepatan kegiatan yang dilaksanakan dengan rencana yang telah disusun. *Monitoring* digunakan pula untuk memperbaiki kegiatan yang menyimpang dari rencana, mengoreksi penyalahgunaan aturan dan sumber-sumber, serta untuk mengupayakan agar tujuan dicapai seefektif dan seefisien mungkin. Pemantauan atau *monitoring* umumnya dilakukan dengan perbandingan berdasarkan waktu.

Monitoring dalam alat ini difungsikan sebagai sistem dari data-data yang ada, diambil dari indikator pada motor listrik (suhu, kecepatan, tegangan) sebagai untuk mengoreksi adanya kesalahan dalam sistem yang sudah bekerja dan mengupayakan agar sistem kerja motor berjalan optimal. Ketika sistem sudah berjalan dengan tidak optimal, pengguna dapat mematikan motor tersebut (dalam kondisi darurat) atau menjadwalkan adanya perbaikan.

2.3. Proteksi

Proteksi merupakan cara untuk mencegah atau membatasi kerusakan peralatan terhadap gangguan, sehingga umur motor dapat dijaga ketahanan pakainya. Pengendalian sistem proteksi ini menggunakan program Windows berbasis *Visual Basic* yang menggunakan bahasa pemrograman vb.net. Pengendalian ini berupa tombol yang bisa mengirimkan perintah kepada sistem proteksi.

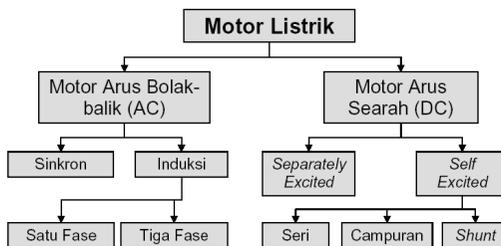
Dalam sistem kali ini, sistem proteksi berupa relay DC digunakan pada :

1. *Switching* sumber daya utama ke sumber daya cadangan dalam sistem *monitoring*
2. Modul relay DC to AC untuk mengaktifkan kontaktor
3. Kontaktor sebagai pemutus jalur listrik 3 fasa ke motor induksi.

2.4. Motor Listrik

Motor listrik merupakan sebuah mesin, yang berguna untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang dihasilkan oleh motor listrik disebabkan oleh gaya elektromagnet. Gaya elektromagnet dihasilkan melalui kutub magnet yang saling tolak-menolak dan tarik-menarik hingga menyebabkan poros besi di dalam motor berputar. Energi mekanik yang muncul digunakan luas dalam kehidupan saat ini, khususnya keperluan di industri.

Motor listrik memiliki berbagai macam jenis yang berbeda. Gambar 2.1 di bawah menunjukkan pembagian jenis-jenis motor listrik.



Gambar 2. 1. Jenis-jenis Motor Listrik

2.4.1. Motor Listrik Arus Searah (DC)

Motor Listrik Arus Searah (DC) menggunakan arus searah sebagai sumber penggerakannya. Motor listrik DC biasa digunakan untuk keperluan

yang membutuhkan torsi tinggi. Pengaturan kecepatan motor listrik DC lebih mudah dilakukan dibandingkan dengan motor listrik AC. Gambar 2.2 merupakan wujud dari sebuah motor DC.



Gambar 2. 2. Motor DC

2.4.2. Motor Listrik Arus Bolak-balik (AC)

Motor Listrik Arus Bolak-balik (AC) menggunakan arus bolak-balik sebagai sumber penggerakannya. Motor listrik AC biasa digunakan untuk keperluan berat / berbeban tinggi sehingga motor listrik arus AC biasa digunakan untuk kebutuhan industri. Pengaturan kecepatan motor AC tidaklah semudah motor DC. Pengaturannya menggunakan variabel frekuensi untuk meningkatkan kecepatan sekaligus menurunkan dayanya. Frekuensi sangat berpengaruh pada kecepatan motor listrik AC sehingga dalam kebutuhan konstan, kecepatan motor listrik yang berkurang dari biasanya mengindikasikan adanya masalah pada motor listrik dan mengurangi masa pakainya[10].

Motor listrik arus AC dibagi menjadi motor sinkron dan motor asinkron (induksi). Perbedaannya terletak pada kecepatannya dimana motor sinkron berputar dengan kecepatan sinkron sehingga bukan jenis self-starting motor karena torsi hanya akan muncul saat motor bekerja di kecepatan sinkronnya, sehingga motor sinkron membutuhkan sumber tegangan DC di luar mesin untuk membawanya dari saat start menuju kondisi running di kecepatan sinkronnya. Hal ini berbeda dengan motor asinkron (induksi) dimana motor listrik menggunakan listrik AC secara penuh mulai dari *starting* hingga *running*-nya, dengan konsekuensi memiliki lonjakan arus *starting* motor yang tinggi pada saat awal pengoperasiannya.

Motor induksi dibagi menjadi motor induksi 1 fasa dan motor induksi 3 fasa. Perbedaannya terletak pada sumber listriknya dimana motor induksi 1 fasa menggunakan sumber listrik 1 fasa, berbeda dengan motor induksi 3 fasa yang menggunakan sumber listrik 3 fasa.

2.5. Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi 3 fasa merupakan motor induksi yang bekerja menggunakan sumber listrik AC 3 fasa. Gambar 2.3 merupakan wujud motor induksi 3 fasa.



Gambar 2. 3. Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi bekerja dengan induksi magnet dari stator, dimana hal tersebut menimbulkan induksi elektromagnet. Induksi elektromagnet adalah timbulnya arus listrik akibat adanya *fluks* magnet / medan putar magnet. Arus induksi ini muncul dari kumparan pada stator ke rotor sehingga rotor berputar terhadap stator sebagai akibat dari tolak menolak antar kutub magnet yang sama. Lilitan pada stator berupa listrik 3 fasa dimana tiap fasanya berjarak 120 derajat. Hal ini yang selalu memunculkan *fluks* magnet. Medan putar magnet ini menyebabkan rotor berputar dengan arah yang sama dengan medan putar magnet. Kecepatan medan putar yang dimunculkan oleh stator dirumuskan pada Persamaan 1[11] :

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (1)$$

- n_s : kecepatan medan putar stator (rpm)
 f : frekuensi (Hz)
 p : jumlah kutub

RPM (*Revolutions per Minute / Rotation per Minute*) adalah jumlah putaran per menit yang terjadi pada benda berputar. Perbedaan yang terjadi antara revolusi dan rotasi adalah poros putaran tersebut. Revolusi merupakan berputarnya suatu benda mengelilingi pusat yang berada di luar benda tersebut. Sedangkan rotasi merupakan berputarnya suatu benda mengelilingi poros pada benda tersebut sebagai titik pusatnya[12][13].

RPM yang akan ditampilkan pada alat ini merupakan kecepatan putar rotor (n_r) motor listrik terhadap porosnya. Dalam praktiknya, kecepatan medan putar / kecepatan stator memiliki perbedaan dengan kecepatan aktual rotor. Jika kedua kecepatan tersebut bernilai sama maka tidak ada tegangan induksi yang timbul di stator. Perbedaan kecepatan ini dinamakan slip, seperti yang ditampilkan pada Persamaan (2). Spesifikasi motor yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

$$slip = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$

n_s : kecepatan medan putar stator (rpm)

n_r : kecepatan aktual rotor (rpm)

Tabel 2. 1. Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa

No.	Spesifikasi	
1	Merk	AEB
	Tipe Produk	D71B – 2
	Nomor Produk	01075
2	Beban	0,37 kW / 0,5 HP
3	Tegangan	220 / 380 V
4	Arus	1,67 / 0,97 A
5.	$\cos\phi$	0,79

2.5.1. Konstruksi Motor Induksi 3 Fasa

2.5.1.1. Stator

Stator merupakan bagian diam pada motor listrik. Stator berupa kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromekaniknya ke rotor. Bentuk stator dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4. Stator Motor

2.5.1.2. Celah

Celah yang dimaksud merupakan ruang antara stator dengan motor. Disinilah adanya medan magnet yang menimbulkan berputarnya rotor.

2.5.1.3. Rotor

Rotor merupakan bagian bergerak di dalam motor listrik. Rotor dapat bergerak diakibatkan adanya *fluks* magnet dari stator. Bentuk rotor dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5. Rotor Motor

2.5.1.4. Terminal

Terminal listrik pada motor merupakan tempat menghubungkan motor listrik dengan sumber listrik. Motor 3 fasa memiliki 6 terminal, 3 terminal *input* dan 3 terminal *output*.

2.5.1.5. Name plate

Motor induksi memiliki spesifikasi berbeda beda tiap jenisnya. Perbedaan paling jelas biasanya terlihat dari kapasitas daya outputnya. Spesifikasi tersebut biasanya terpampang jelas di *nameplate* setiap motor, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.6.

SIEMENS					
PE 21 PLUS™		PREMIUM EFFICIENCY			
MILL AND CHEMICAL DUTY QUALITY INDUCTION MOTOR					
ORD.NO.	51-502-033	DATE	017		
TYPE	RG Z ESD	FRAME	284T		
H.P.	25	SERVICE FACTOR	1.15		
AMPS.	56.8/28.4	VOLTS	230/460		
R.P.M.	1750	HERTZ	60		
DUTY	CONT.	40° C AMB.		3 PH	
CLASS	F	NEMA Design	B	K.V.A. CODE	G
NEC				NEMA	93.0
WINDING	50BC03JPP3	WINDING	456C02JPP3		
Siemens Energy & Automation, Inc. Little Rock, AR					
					MADE IN USA

Gambar 2. 6. Nameplate Motor Induksi 3 Fasa

2.5.2. Gangguan Tegangan pada Motor

Gangguan tegangan pada motor induksi merupakan masalah serius pada motor listrik. Jika nilai tegangan yang ada merupakan sumber listrik bagi motor bermasalah, hal tersebut dapat menimbulkan beberapa anomali pada motor listrik seperti panas berlebih dan penurunan kinerja motor. Gangguan tegangan yang dimaksud adalah gangguan *Unbalance Voltage* dan *Single Phasing* [5][14].

2.5.2.1. Gangguan *Unbalance Voltage*

Unbalance voltage atau ketidakseimbangan fasa adalah kasus dimana motor 3 fasa bekerja dalam keadaan tegangan antar fasa tidak seimbang. Menurut standar yang dikeluarkan *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), mengasumsikan bahwa tegangan rata-rata yang ada merupakan tegangan aktual *line to line* dan tidak menyertakan sudut fasa yang ada, dengan besar persentase tegangan *imbalance* tertera pada Persamaan (1) sebagai berikut.

$$\%UV = 100\% \times \frac{\text{tegangan maksimal} - \text{tegangan rata-rata}}{\text{tegangan rata-rata}} \quad (1)$$

NEMA merekomendasikan ketidakseimbangan tegangan operasi motor induksi 3 fasa kurang dari 5%. Hal itu bertujuan untuk mengantisipasi efek yang terjadi pada motor listrik, selain dari memperpanjang umur pakai motor itu sendiri [15].

Sedangkan menurut IEEE, tegangan rata-rata yang ada merupakan tegangan aktual *line to line* dan sama-sama tidak menyertakan sudut fasa dalam perhitungan, karena hanya besaran yang diperhitungkan, dengan besar persentase tegangan *imbalance* sama seperti dengan standar yang dikeluarkan oleh NEMA pada Persamaan (1) [16].

Tegangan yang tak seimbang tersebut memberikan efek kepada motor induksi 3 fasa sebagai berikut :

1. Arus listrik

Arus pada kecepatan operasi yang sama dengan normal akan meningkat hingga 6-10 kali saat tegangan tak seimbang.

2. *Overheat*

Temperatur pada winding stator meningkat pada saat terjadi ketidakseimbangan tegangan dikarenakan adanya *negatif sequence* pada arus dan tegangan.

3. Torsi

Torsi yang ada berkurang berkisar 25% dari torsi pengenalnya saat ketidakseimbangan tegangan ada di angka 5%. Hal ini pengaruh dari adanya torsi *negatif sequence*.

4. Kecepatan

Kecepatan rotor berkurang karena adanya slip yang terjadi pada rotor yang tidak optimal[17]. Besar slip dapat dilihat dari Persamaan 2 pada Sub Bab 2.6.

2.5.2.2. Gangguan *Overvoltage* & *Undervoltage*

Gangguan *Overvoltage* dan *Undervoltage* merupakan anomali yang muncul dalam suatu jalur listrik. Tegangan lebih (*Overvoltage*) merupakan suatu gangguan akibat tegangan pada sistem tenaga listrik lebih besar dari seharusnya, sedangkan tegangan kurang (*Undervoltage*) merupakan gangguan tegangan pada sistem tenaga listrik kurang dari seharusnya. Gangguan tersebut dapat merusak peralatan-peralatan yang tersambung dengan sumber yang memiliki tegangan abnormal. Dalam standar distribusi PLN, batas tegangan kurang yang dianjurkan adalah maksimal -10% dari tegangan normal, sedangkan tegangan lebih maksimal adalah 5% di atas tegangan normal[18].

2.6. Komponen Utama

2.6.1. *Miniatur Circuit Breaker* (MCB)

Miniatur Circuit Breaker adalah pemutus tenaga dalam kapasitas kecil, yang digunakan untuk memutus daya listrik dari sumber listrik menuju beban. MCB dibedakan menjadi 2 jenis yaitu MCB 1 fasa dan MCB 3 fasa. MCB 1 fasa memiliki 1 terminal input dan 1 terminal output sedangkan MCB 3 fasa memiliki 3 terminal input dan 3 terminal output yang digunakan untuk jalur 3 fasa.

MCB memiliki berbagai macam kapasitas arus maksimumnya, mengikuti besar beban yang ditanggung MCB tersebut, mulai dari 2A sampai 25A. Dalam alat kali ini, MCB yang digunakan adalah 3 MCB 1 fasa 10A dan 1 MCB 1 fasa 4A seperti yang tertera pada Gambar 2.7. MCB 1 fasa untuk sumber daya motor dimaksudkan untuk percobaan dalam pengujian ketidakseimbangan tegangan dan *single phasing*. Spesifikasi MCB yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.2.



Gambar 2. 7. Miniatur Circuit Breaker

Tabel 2. 2. Spesifikasi Miniatur Circuit Breaker 1 Fasa

No.	Spesifikasi	
1	Merk & Nomor Model	Zenith C32N-CL10 & C32N-CL6
2	Tegangan kerja	200-400V
3	Arus trip	10A (C32N-CL10) 6A (C32N-CL6)

2.6.2. Catu Daya

Catu Daya atau *Power Supply* merupakan pengubah sumber tegangan AC menjadi DC untuk keperluan rangkaian kontrol. *Power Supply* memiliki berbagai macam spesifikasi dengan bermacam tegangan dan arus untuk disesuaikan dengan kebutuhan beban rangkaian. Tegangan AC mulanya ditransformasikan oleh transformator *step down* menjadi tegangan AC dengan besar yang lebih kecil. Tegangan AC kecil tersebut kemudian disearahkan oleh rectifier / dioda dengan penyearah gelombang penuh. Setelah melewati rectifier, tegangan AC tersebut berubah menjadi DC denyut. Setelah melewati rectifier, tegangan DC tersebut harus melewati kapasitor untuk mengubah DC denyut menjadi DC murni yang lebih stabil dan bersih. Tegangan DC murni tersebut digunakan regulator tegangan yang bekerja sesuai tegangan referensinya untuk mengatur besar output tegangan DC dari power supply ke rangkaian kontrol.

Catu daya dalam alat ini menghasilkan keluaran tegangan 12V dan arus 5A seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.8. Spesifikasi *Power Supply* dapat dilihat pada Tabel 2.3.



Gambar 2. 8. Power Supply

Tabel 2. 3. Spesifikasi Power Supply

No.	Spesifikasi	
1	Merk & Nomor Model	Talled PSI-CV-12-60-5A
2	Tegangan Input	176-264 V AC
3	Tegangan Output	12 V DC
4	Arus Output	5 A DC

2.6.3. Emergency Automatic Switch

Emergency Automatic Switch adalah relay yang digunakan sebagai saklar otomatis dari sumber listrik utama ke sumber listrik cadangan bila daya dari sumber listrik utama mati / hilang. Relay dalam alat ini memungkinkan sumber listrik cadangan (baterai *accu*) menjadi sumber listrik DC utama bagi rangkaian kontrol bila sumber listrik utama mati / hilang daya sehingga rangkaian kontrol dan proteksi masih dapat aktif. Relay ini memiliki beragam spesifikasi yang memiliki bermacam tegangan. Alat ini menggunakan relay bernomor tipe JQC3F-05VDC-C yang memiliki kemampuan menukar sumber listrik dengan tegangan 5-48 VDC seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.9. Spesifikasi *Emergency Automatic Switch* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.4.



Gambar 2. 9. Emergency Automatic Switch

Tabel 2. 4. Spesifikasi Emergency Automatic Switch [18]

No.	Spesifikasi	
1	Merk & Nomor Model	Bestep JQC3F-05VDC-C
2	Tegangan Kerja	5-48 VDC
3	Arus Maksimal	10 A
4	Tegangan Koil	5 VDC
5	Arus Koil	89,3 A

2.6.4. Sensor Tegangan, Arus, Daya Aktif - PZEM-004T

Sensor tegangan memiliki berbagai jenis yang berbeda beda, tergantung cara kerjanya. Penelitian kali ini menggunakan sensor tegangan berupa PZEM-004T, adapun sensor tegangan lain seperti ZMPT101B, SCT 013. PZEM-004T dipilih digunakan pada alat ini karena multiguna untuk memonitoring arus dan daya.

PZEM-004T adalah sebuah modul sensor multifungsi yang berfungsi untuk mengukur daya, tegangan, arus dan energi yang terdapat pada sebuah aliran listrik. Modul ini dilengkapi sensor tegangan dan sensor arus (CT) yang sudah terintegrasi. Dalam penggunaannya, alat ini khusus untuk penggunaan dalam ruangan (*indoor*).

2.6.4.1. Tegangan Listrik

Tegangan listrik adalah beda potensial listrik diantara dua titik dalam rangkaian listrik dan dinyatakan dalam satuan volt. Dalam hal ini besaran mengukur energi potensial dari sebuah medan listrik yang menyebabkan adanya aliran listrik dalam sebuah konduktor listrik. Tegangan listrik terdiri dari 2 tipe, yaitu tegangan AC (Volt AC) dan tegangan DC (Volt DC). Dalam alat ini, tegangan yang digunakan untuk mengoperasikan motor dan tegangan yang di-*monitoring* adalah tegangan AC, sementara rangkaian *monitoring* menggunakan tegangan DC.

2.6.4.2. Arus

Arus listrik adalah jumlah muatan listrik yang mengalir dari satu titik ke titik lain dalam satuan waktu atau dapat dikatakan jumlah aliran listrik.

2.6.4.3. Daya Listrik dan Faktor Daya

Daya listrik adalah besar energi listrik yang digunakan untuk menghidupkan alat listrik. Daya listrik dalam alat ini adalah menghitung besar daya aktif. Adapun jenis daya listrik lainnya yaitu sebagai berikut.

1. Daya semu (S)

Daya semu merupakan daya listrik yang dihasilkan oleh sumber sebelum dibebani dengan peralatan atau komponen listrik. Daya semu merupakan hasil perkalian antara V_{rms} (tegangan efektif) dan juga I_{rms} (arus efektif). Daya semu dapat dihitung seperti yang tertera pada persamaan (1)[19].

$$S = V \cdot I \quad (1)$$

S : daya semu (VA)

V : tegangan (Volt)

I : arus (A)

2. Daya aktif (P)

Daya aktif adalah daya yang benar-benar terukur pada beban, yaitu motor listrik 3 fasa. Perhitungan daya aktif 1 fasa tertera pada persamaan (2)[20].

$$P = V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (2)$$

P : daya aktif (Watt)

V : tegangan (Volt)

I : arus (Ampere)

$\cos\varphi$: faktor daya

3. Daya reaktif (Q)

Daya reaktif merupakan daya yang menunjukkan adanya kerugian daya yang menggeser grafik sinusoidal akibat adanya beban reaktif. Daya reaktif memiliki fungsi yang sama dengan faktor daya atau $\cos\varphi$. Untuk mengetahui daya reaktif yang ada, dapat dihitung seperti pada Persamaan (3)[19].

$$Q = V \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (3)$$

Q : daya reaktif (VAR)

V : tegangan (Volt)

I : arus (A)

4. Faktor Daya

Beban reaktif dapat berupa beban kapasitif dan beban induktif. Motor induksi menghasilkan beban induktif sehingga dapat mengakibatkan pergeseran fasa. Besar sudut pergeseran fasa yang ada dapat diketahui dari nilai faktor daya. Perhitungan $\sin \varphi$ pada daya reaktif dapat dilakukan setelah mengetahui besar sudut dalam perubahan faktor daya, atau dapat dilakukan dengan perbandingan seperti pada Persamaan (4).

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4)$$

Q : daya reaktif (VAR)
S : daya semu (VA)
P : daya aktif (Watt)

Nilai faktor daya berkisar antara 0-1. Semakin nilainya mendekati 1 maka semakin sedikit kerugian daya yang ditimbulkan. Hal tersebut dikarenakan besar daya aktif adalah sama dengan besar daya semu. PZEM-004T dapat dilihat pada Gambar 2.10 di bawah dan spesifikasi PZEM-004T dapat dilihat pada Tabel 2.5.



Gambar 2. 10. PZEM-004T

Tabel 2. 5. Spesifikasi PZEM-004T [21]

No.	Spesifikasi	
1	Nomor Model	PZEM-004T
2	Range Pengukuran	80-260 V AC 0-10 A AC 0-2,3 kW 0-1,00 power factor

2.6.5. Arduino UNO

Mikrokontroler adalah sebuah sistem mikroprosesor yang di dalamnya terdapat CPU, ROM, RAM, I/O, Clock, dan peralatan internal lainnya yang sudah terhubung dan terorganisir dengan baik dan dikemas dalam satu chip yang siap pakai. Arduino merupakan *platform* berbasis

open source yang menggunakan perangkat keras dan lunak yang mudah digunakan. *Hardware* Arduino berupa papan yang berisi mikrokontroler AVR. Bentuk Arduino UNO dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11. Arduino UNO[22]

Arduino UNO adalah *board* mikrokontroler yang memiliki 14 pin input digital dan 6 pin input analog. Setiap 14 pin digital pada Arduino UNO dapat digunakan sebagai *input* dan *output*, menggunakan fungsi `pinMode()`, `digitalWrite()`, dan `digitalRead()`. Fungsi-fungsi tersebut beroperasi di tegangan 5 volt. Arduino memiliki beberapa keunggulan yang membuatnya digunakan luas sebagai otak sebuah sistem, seperti murah, *cross-platform*, mudah, *open source*, dan kompatibel dengan banyak alat[21]. Spesifikasi Arduino UNO dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6. Spesifikasi Arduino UNO[22]

No.	Spesifikasi	
1	Mikrokontroler	ATmega328P
2	Tegangan Operasi	5V
3	Tegangan Input (Rekomendasi)	7-12V
4	Tegangan Input (Limit)	6-20V
5	<i>Digital I/O Pin</i>	14 (6 mampu untuk output PWM)
6	<i>PWM Digital I/O Pin</i>	6
7	Analog Input Pin	6
8	Arus DC per I/O pin	20 mA
9	Arus DC pada pin 3,3	50 mA
10	<i>Flash Memory</i>	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader

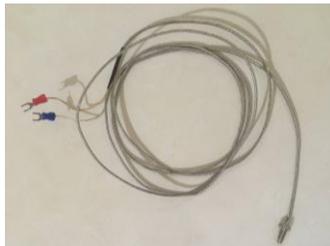
11	Sram	2 KB (ATmega328P)
12	Eeprom	1 KB (ATmega328P)
13	<i>Clock Speed</i>	16 MHz
14	Led_Builtin	13
15	Panjang	68.6 mm
16	Lebar	53.4 mm
17	Berat	25 g

2.6.6. Sensor Temperatur - *Thermocoupler Type-K & MAX 6675*

Suhu atau temperatur adalah panas atau dingin yang diukur berdasarkan skala tertentu dengan menggunakan termometer. Pengukuran suhu kali ini ditujukan kepada kondisi panasnya suhu motor induksi 3 fasa. Pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan sensor suhu yang dihubungkan ke Arduino.

Sensor suhu memiliki berbagai jenis yang berbeda beda, tergantung cara kerjanya. Penelitian kali ini menggunakan sensor suhu berupa *Thermocoupler Type K*, adapun sensor suhu lain seperti DS18B20, LM 35, RTD (*Resistance Temperature Detectors*). Thermocoupler dipilih sebagai sensor suhu karena penggunaannya yang umum di industri, selain sensor RTD[22][23].

Thermocouple adalah jenis sensor suhu yang digunakan untuk mendeteksi temperatur melalui 2 logam konduktor yang disambung bersama dan menyebabkan timbul beda potensial antara sambungan tersebut dengan sambungan referensi yang berfungsi sebagai pembanding, jadi ada sebuah perbedaan tersebut menjadi nilai pengukur oleh Thermocouple. *Thermocouple Type K* dapat dilihat pada Gambar 2.12 dan spesifikasi Thermocouple dapat dilihat pada Tabel 2.7.

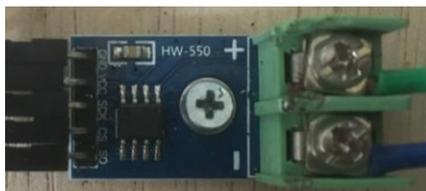


Gambar 2. 12. *Thermocouple Type K*

Tabel 2. 7. Spesifikasi *Thermocouple Type K*

No.	Spesifikasi	
1	Nomor Model	Type K Thermocouple
2	Range Pengukuran Temperatur	-27° – 126° C
3	Akurasi pengukuran	2,2°C atau 75%

MAX6675 adalah konverter termokopel-ke-digital dengan *analog to digital converter* (ADC) 12-bit. MAX6675 juga berisi sambungan dingin, pengontrol digital, dan interfac yang kompatibel dengan SPI dan mikrokontroler. ADC berisi sambungan dioda dengan sambungan dingin dengan tegangan *output* thermocouple yang dinaikkan dan dibaca oleh MAX6675 di pin SO berupa 12 bit. Pembacaan itu ditulis dan dikirimkan ke mikrokontroler[24]. MAX6675 dapat dilihat pada Gambar 2.13 dan spesifikasi MAX6675 dapat dilihat pada Tabel 2.8.

**Gambar 2. 13. MAX6675****Tabel 2. 8. Spesifikasi MAX6675[26]**

No.	Spesifikasi	
1	Merk & Nomor Model	MAX6675ISA +T
2	Range Temperatur	-20° – 85° C
3	Tegangan Sumber	3-5,5 V DC
4	Arus Sumber	0,7-1,5 mA

2.6.7. Sensor Kecepatan - *Hall Effect Sensor*

Kecepatan putaran menunjukkan jumlah putaran dari suatu *tool* dalam satuan waktu dan diberikan dalam putaran per detik atau per menit. RPM adalah satuan yang digunakan untuk menyatakan kecepatan perputaran mesin. Perputaran tersebut dihitung menggunakan waktu berupa menit[12]. Pengukuran kecepatan kali ini dilakukan dengan menggunakan sensor kecepatan yang dihubung ke arduino.

Sensor kecepatan yang dapat digunakan pada arduino tidak sebanyak pada sensor suhu. Alat ini menggunakan sensor kecepatan berupa *Hall effect sensor* yang dihubungkan tidak langsung dengan magnet ke rotor motor. *Hall effect* dipilih karena penggunaannya yang sudah luas dalam kehidupan, bukan hanya pada bidang kelistrikan namun juga pada mekanikal.

Hall effect sensor mendeteksi magnet yang ada, ketika terkena gaya magnet *hall effect* mengirimkan sinyal digital ke arduino. Magnet timbul dari gaya magnet yang ada di rotor motor. Selama 1 detik, magnet di rotor berputar beberapa kali dan sinyal yang masuk dihitung oleh arduino. Sinyal digital yang masuk ke arduino dikalkulasikan dari *revolutions per second* (RPS) menjadi *revolutions per minute* (RPM). *Hall effect sensor* ditunjukkan pada Gambar 2.14 di bawah dan spesifikasi *Hall Effect Sensor* dapat dilihat pada Tabel 2.9.



Gambar 2. 14. Hall Effect Sensor

Tabel 2. 9. Spesifikasi Hall Effect Sensor

No.	Spesifikasi	
1	Nomor Model	A3144 SC581
2	Tegangan Sumber	4,5-24 V DC
3	Arus Sumber	4,4-9 mA

2.6.8. Modul Relay

Modul relay merupakan suatu alat yang beroperasi berdasarkan prinsip elektromagnetik yang memanfaatkan kumparan yang menghidupkan medan magnet untuk membuka atau menutup suatu kontak atau saklar. Relay dapat digunakan untuk mengontrol rangkaian AC dengan menggunakan listrik DC sebagai arus pemacunya. Fungsi utama relay adalah mengontrol rangkaian lain yang memiliki perbedaan

tegangan kerja antara tegangan rangkaian kontrol dan tegangan daya menuju beban[25].

Modul Relay pada alat ini digunakan sebagai pembuka dan penutup saklar rangkaian AC 1 fasa yang digunakan untuk mengontrol kontaktor 3 fasa berupa sumber menuju motor listrik. Bentuk modul relay dapat dilihat pada Gambar 2.15 dan spesifikasi Relay yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.10.



Gambar 2. 15. Modul Relay

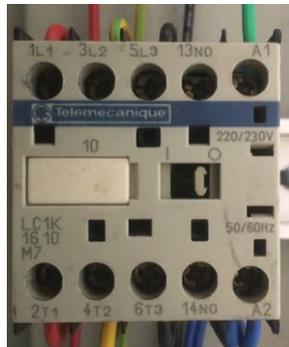
Tabel 2. 10. Spesifikasi Relay[28]

No.	Spesifikasi	
1	Nomor Model	FL-3FF-S-Z
2	Beban Minimum	100mA 5VDC
3	Tegangan <i>Switch</i> Maksimal	250 VAC / 30 VDC
4	Arus <i>Switch</i> Maksimal	15 A

2.6.9. Kontaktor

Kontaktor adalah jenis saklar yang bekerja secara magnetik yaitu kontak bekerja apabila kumparan diberi energi. Sebuah kontaktor terdiri dari koil, beberapa kontak *Normally Open* (NO) dan beberapa *Normally Close* (NC). Koil adalah lilitan yang apabila diberi tegangan akan terjadi magnetisasi dan menarik kontak-kontaknya sehingga terjadi perubahan atau bekerja. Fungsi kontaktor umumnya dipergunakan untuk memutuskan dan menyambungkan arus listrik secara elektrik.

Alat ini menggunakan kontaktor sebagai pembuka rangkaian 3 fasa menuju motor jika diindikasikan terjadi adanya gangguan. Kontaktor dikendalikan oleh Arduino melalui modul relay. Kontaktor dapat dilihat pada Gambar 2.16 dan spesifikasi Kontaktor dapat dilihat pada Tabel 2.11.



Gambar 2. 16. Kontaktor

Tabel 2. 11. Spesifikasi Kontaktor[29]

No.	Spesifikasi	
1	Merk & Nomor Model	Telemecanique LC1K1610M7
2	Tegangan kontrol	220-230 V AC
3	Frekuensi kontrol	50 / 60 Hz

2.6.10. Baterai Accu

Baterai adalah sebuah sumber energi yang dapat merubah energi kimia yang disimpannya menjadi energi listrik yang dapat digunakan seperti perangkat elektronik. *Output* arus listrik dari baterai adalah arus searah atau disebut juga dengan arus DC (*Direct Current*). Baterai disini menggunakan aki bertegangan 12V dan berkapasitas 3,5Ah.

Aki pada percobaan ini digunakan sebagai daya cadangan ketika sumber listrik utama mati/bermasalah sehingga rangkaian monitoring dan kontrol masih dapat bekerja ketika sumber listrik utama hilang. Pada penggunaannya, aki disini menggunakan tegangan 12 V, sesuai dengan input sumber arduino sebesar 7-12 V. Baterai diharapkan dapat selalu siap, sehingga ketika sumber listrik utama off, relay akan segera mengubah jalur sumber listrik rangkaian monitoring dan kontrol ke baterai. Aki dapat dilihat pada Gambar 2.17 dan spesifikasi Aki yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.12.



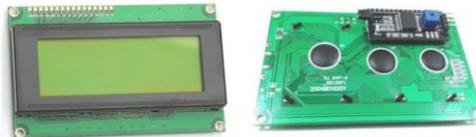
Gambar 2. 17. Aki

Tabel 2. 12. Spesifikasi Aki

No.	Spesifikasi	
1	Merk & Nomor Model	Yuasa YTZ55
2	Tegangan	12 V DC
3	Kapasitas	3,5 – 3,7 Ah
4	P x L x T	115mm x 72mm x 86mm
5	Berat	1,6 kg

2.6.11.LCD & I2C

LCD adalah modul layar elektronik yang berfungsi untuk menampilkan huruf, angka, dan karakter. Koneksi LCD dihubungkan dengan modul I2C. I2C LCD adalah modul yang dikendalikan secara serial sinkron sehingga dapat mengurangi jalur kabel LCD menuju mikrokontrol yang berupa jalur paralel. LCD dan I2C dapat dilihat pada Gambar 2.18 dan spesifikasi LCD & I2C dapat dilihat pada Tabel 2.13.



Gambar 2. 18. LCD 20x4 dan I2C

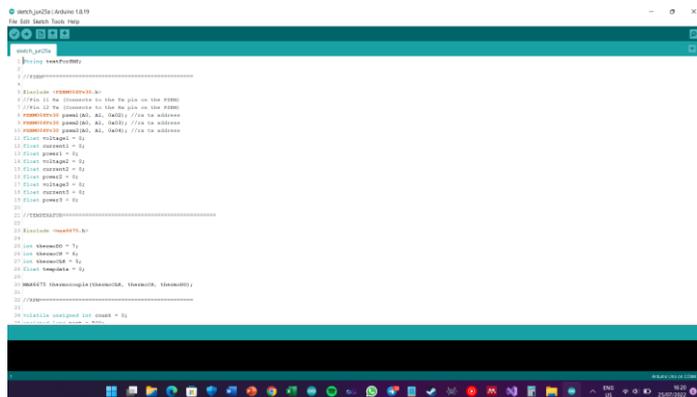
Tabel 2. 13. Spesifikasi LCD

No.	Spesifikasi	
1	Merk & Nomor Model	LCD 20x4 & MH I2C
2	Tegangan	5 V DC
3	Interface	I2C 4 bit LCD data
4	P x L	98mm x 60mm

2.7. Perangkat Lunak Pendukung

2.7.1. Arduino IDE

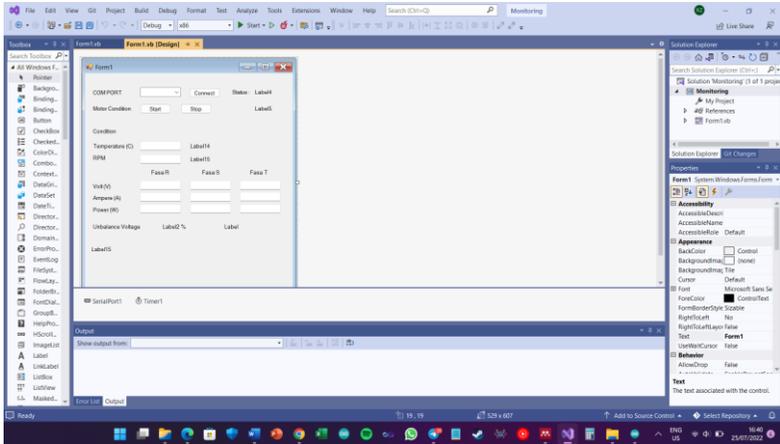
Arduino IDE adalah *software* yang diakses secara *open source* yang tersedia untuk memprogram mikrokontroler berbahasa C++. Arduino IDE menggunakan bahasa pemrograman C++ dan membutuhkan kabel USB *type A to B* untuk mengirim data ke *hardware* Arduino. *Interface* Arduino IDE dapat dilihat pada Gambar 2.19.



2.7.2. Microsoft Visual Studio

Microsoft Visual Studio merupakan *platform open source* yang memiliki berbagai macam kegunaan karena fleksibilitasnya. Microsoft Visual Studio dapat mengerjakan tugas untuk berbagai platform, misal Android, Linux, MacOS, dan Windows, berbagai tipe projek seperti Console App pada MacOS, Windows *Forms App* pada Windows, atau *project* berbasis *command line* untuk di Windows dan Console Xbox menggunakan bahasa program C++.

Alat kali ini menggunakan *Visual Studio* untuk membuat *Windows Form App* dengan bahasa pemrograman C# dari kerangka bahasa program .NET milik Microsoft. *Form App* yang dibuat menampilkan data yang di-monitoring dan diproses oleh Arduino untuk ditampilkan di *Personal Computer (PC)* beroperasi sistem Windows. *Interface* dari Microsoft *Visual Studio* dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2. 20. Interface Microsoft Visual Studio