

Analisis Winding Insulation Pada Performa Induksi Motor Tiga Phase Berbasis Logika Fuzzy

Fajar Pujiyanto^{1*}

¹Program Studi Teknika, Politeknik Bumi AKPELNI

Jalan Pawiyatan Luhur II No 17. Bendan Dhuwur. Kota Semarang. Jawa Tengah (50235)

*Corresponding Author. Email: fajar.pujiyanto@akpelni.ac.id. Hp 081326556710

Abstrak

Motor induksi tiga *phase* adalah optional terbaik sebagai media penggerak permesinan di dunia industri, hal ini dipilih karena kehandalan dan perawatan yang mudah. Menjaga performa induksi motor adalah hal penting untuk menghindari kegagalan fungsi motor dan menjaga produksi industri. Penurunan performa disebabkan karena pengaruh mekanik, sistem listrik dan lingkungan. Mendeteksi masalah lebih awal diperlukan untuk secepatnya dilaksanakan perbaikan guna menghindari kerusakan lebih parah, penyebab kegagalan pada lilitan dipengaruhi oleh nilai *insulation resistance*. Faktor penyebab perubahan nilai IR yaitu *electrical stress*, *mechanical stress*, *chemical stress*, *thermal stress* dan *environmental contamination*. Pada penelitian ini dibahas tentang analisis performa induksi motor dengan memperhatikan nilai *insulation deterioration* yaitu *insulation resistance (IR)*, *polarization index (PI)* dan *relative humidity (RH)*, hal ini penting karena nilai rendah dari ketiga komponen menyebabkan penurunan performa dan kegagalan induksi motor. Dasar penulisan menggunakan metode deskripsi kualitatif dengan mengacu pada penelitian terdahulu dan literatur pendukung, penyelesaian masalah digunakan analisis berbasis logika Fuzzy pada aplikasi Matlab. Penelitian berhasil dilakukan dengan pengolahan data dari hasil pengukuran, dan dilanjutkan pengujian analisis fuzzy matlab terhadap ketiga parameter input yaitu IR, PI dan RH. Hasil akhir analisis Fuzzy Matlab yaitu berhasil menentukan performa baik dan buruk pada induksi motor.

Kata Kunci: Induksi motor, Logika fuzzy, Performa, *Winding insulation*

Abstract

The three-phase induction motor is the best option for driving machinery in the industrial world, it was chosen because of its reliability and easy maintenance. Maintaining the performance of induction motors is important to avoid motor malfunctions and maintain industrial production. The performance degradation is due to mechanical, electrical, and environmental influences. Detecting problems early is necessary for repairs to be carried out as soon as possible to avoid further damage. The cause of failure in the winding is influenced by the value of the insulation resistance. Factors causing changes in the IR value are electrical stress, mechanical stress, chemical stress, thermal stress, and environmental contamination. This study discusses the analysis of the performance of the induction motor by the value of insulation deterioration, namely the value of insulation resistance (IR), polarization index (PI) and relative

humidity (RH), this is important because the low value of the three components causes a decrease in performance and failure of the induction motor

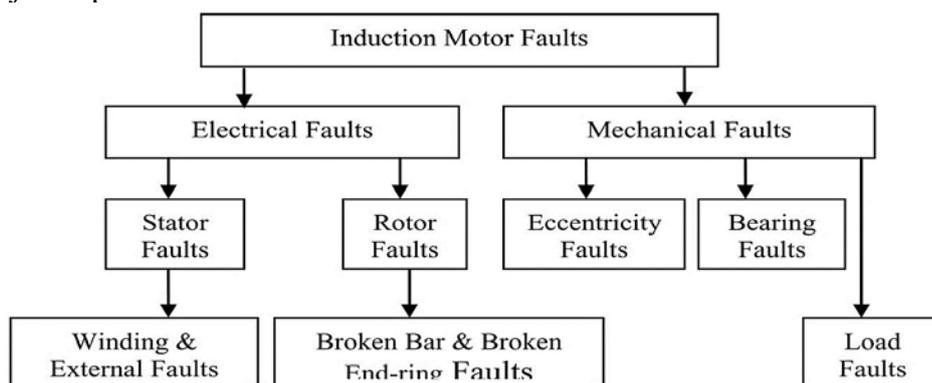
Keywords: Fuzzy logic, Induction motor, Performance, Winding insulation.

PENDAHULUAN

Induksi motor tiga phase banyak digunakan di lingkungan industri sebagai motor penggerak permesinan bantu, hal ini dilakukan karena aspek kehandalan, penggunaannya dan perawatan yang mudah dilakukan. Penggunaan energi secara global mencatat kebutuhan energi induksi motor dua kali lipat dari instalasi penerangan, kebutuhan energi induksi motor sebagai sistem penggerak mencapai 43% hingga 46% dari seluruh kebutuhan energi di dunia (Waide & Brunner, 2011). Pemilihan penggunaan induksi motor sebagai penggerak utama di dunia industri untuk menggantikan motor diesel, sekaligus sebagai upaya efisiensi energi dan pencegahan polusi udara dunia (Bergmeijer, 1992). Induksi motor 3 phase bekerja optimal jika memiliki kondisi yang baik disetiap komponennya, antara lain yaitu kondisi stator, rotor, *bearing*, *ground* sistem, power kelistrikan dan keseimbangan *magnetic pull*.

Pemeliharaan induksi motor perlu dilakukan untuk memastikan motor bekerja secara optimal, perawatan dan pengecekan secara berkala di tiap komponen dan fungsi untuk menghindari induksi motor mengalami kegagalan fungsi kerja, sehingga mengakibatkan penundaan operasional dan terjadi kerugian industri(Koji & Tsuyoshi, 2019). Pelaksanaan perawatan rutin dan kegiatan inpeksi induksi motor dilakukan secara berkelanjutan dengan mencatat semua indikator dalam beberapa jam sekali dalam sehari, pengecekan lanjutan setidaknya setiap sebulan atau dua bulan sekali(Pratama et al., 2022). Perawatan dalam kurun quartal atau semester, pelaksanaan perawatan besar setidaknya setahun sekali dan maksimal dilakukan perawatan dan pengecekan skala menyeluruh maksimal dalam dua tahun(Wibowo & Astriawati, 2021).

Kegagalan operasional induksi motor dipengaruhi oleh banyak faktor dari sisi komponen didalamnya, penurunan kondisi di salah satu komponen menyebabkan penurunan performa hingga terjadi kerusakan fatal pada induksi motor. Beberapa klasifikasi penyebab terjadinya kerusakan indukai motor ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Klasifikasi penyebab Kegagalan Induksi Motor(Siddiqui et al., 2014).

Mendeteksi masalah lebih awal diperlukan para teknisi untuk secepatnya mengambil tindakan dan perbaikan guna menghindari kerusakan lebih parah pada induksi motor, penyebab kegagalan pada bagian *winding stator* dipengaruhi oleh nilai *insulation resistance*. Faktor utama perubahan nilai IR yaitu *electrical stress, mechanical stress, chemical stress, thermal stress dan environmental contamination*(Primer et al., 2009). Faktor penyebab kegagalan dari induksi motor terbesar kedua yaitu 25% oleh *insulant deterioration*, dan penyebab kerusakan pertama sebesar 43% oleh *external contamination* (Chauvin Arnoux, 2010). Salah satu faktor penyebab terbesar kontaminasi dari sisi lingkungan atau *external contamination* adalah kontaminasi oli atau *grease* sebesar 20%, kondisi ini berkaitan langsung dengan setiap perubahan nilai dan kondisi *insulant deterioration* yang berdampak langsung terhadap kondisi serta performa induksi motor.

Pengecekan dan penilaian performa induksi motor dapat dilihat dari sisi *insulation deterioration* yaitu nilai *insulation resistance, polarization index* dan tingkat *humidity* lingkungan(Negara et al., 2014), pengecekan ketiga poin ini seperlunya dilakukan untuk menghindari terjadinya kegagalan sistem dan secara ekonomi mengurangkan biaya perawatan jangka panjang. *Humidity* lingkungan mempengaruhi nilai dari *insulation* dan *polarization index*, kondisi udara lembab dan kering berdampak cukup signifikan terhadap ambient temperatur lilitan motor saat induksi motor beroperasi. Sisi lain *humidity* yang terpengaruh oleh uap minyak, udara basah yang korosif menyebabkan nilai *insulation resistance* lilitan menjadi rendah dan paling buruk terjadinya *shorted* pada sisi lilitan induksi motor. Penilaian *insulation resistance* dan *polarization index* untuk induksi motor dapat dinyatakan baik mengacu pada pedoman pengetasan *insulation standart IEEE 43-2000*(IEEE, 2000).

Kajian pustaka atau *literatur review* dalam penelitian ini yaitu penelitian terdahulu yang berhubungan dengan induksi motor, digunakan sebagai acuan dan teori dasar pendukung dalam penyelesaian permasalahan penelitian ini, Berikut penelitian terdahulu sebagai sarana pendukung keilmuan dan bahan kajian penyelesaian masalah yaitu penelitian dari Sari Hartati et al. (2020), menjelaskan tentang analisa penilaian induksi motor dengan menggunakan parameter perbedaan tegangan dan arus. Dampak dari perbedaan nilai tegangan dan perbedaan arus pada lilitan mengakibatkan terjadinya penurunan efisiensi dan kenaikan temperatur stator, analisi dilakukan dengan menggunakan logika Fuzzy Matlah. Hasil akhir penelitian menyatakan kondisi motor dalam tiga keadaan yaitu motor baik, motor rusak dan kotor rusak parah.

Gonzalez et al., (2018) menjelaskan tentang penghitungan nilai dari *polarization index* dan *fractional order dynamics* pada *insulation electric motor*. Pengujian dilakukan dengan menggunakan magnet permanen motor sinkron 418VAC, dinamika fraksional dari resistansi isolasi elect motor dapat diwakili oleh model orde fraksional dan resistansi mengikuti fungsi Mittag-Leffler daripada fungsi eksponensial. Menurut Naik et al.,(2017) pengujian induksi motor dilakukan dengan simulasi komputer yaitu penggunaan program PLC dengan cara pemberian nilai tanpa load asli, penelitian menyatakan uji induksi motor dapat

dilakukan dengan blok-blok komputer, namun pengujian ini memerlukan pendanaan yang besar dan mahal dibanding pengujian langsung menggunakan tenaga listrik.

Deshmukh et al. (2017) menjelaskan tentang pengujian dan penambahan lapisan ferit pada lilitan stator dapat mengurangi rugi-rugi motor dan meningkatkan nilai efisiensi induksi motor. Pengujian dilakukan kepada induksi motor dengan cara memodifikasi lilitan stator menjadi dua kategori lilitan, yaitu lilitan utama dirancang menggunakan tegangan masukan 238 VAC dan lilitan exciter menggunakan tegangan 8 VAC. Hasil pengujian dengan penggunaan dua jenis tegangan masukan pada kedua lilitan menghasilkan kenaikan nilai efisiensi dan faktor daya induksi motor. Penelitian dari Negara et al., (2014) menjelaskan tentang analisa nilai insulation dari lilitan induksi motor. Perubahan nilai *insulation resistance* dan *polarization index* dipengaruhi oleh tingkat *humidity* lingkungan disekitaran induksi motor, *humidity* atau kelembapan udara yang mengandung komposisi uap korosif ataupun mengandung uap minyak mempercepat perubahan nilai insulation induksi motor. Hasil pengujian dilakukan pada semua kondisi *humidity* udara dan nilai arus serapan konstan pada induksi motor, pengaruh kelembapan tinggi dan gangguan dari kebocoran arus menyebabkan perubahan insulation jauh lebih besar dari motor yang dikondisikan normal. Data pengujian tahanan isolasi digunakan untuk menghitung tahanan terhadap tanah (RTG) dan kapasitansi terhadap tanah (CTG), nilai RTG dan CTG digunakan sebagai nilai komponen rangkaian ekuivalen untuk materi pengujian dan simulasi.

Pada penelitian ini dibahas tentang analisis penilaian terhadap performa induksi motor dengan memperhatikan nilai *winding insulation* dan menggunakan logika fuzzy, hasil akhir dari analisis nilai *winding insulation* dan perhitungan logika fuzzy digunakan untuk menentukan performa induksi motor dalam keadaan baik atau buruk. Hasil analisis logika fuzzy secara mudah dapat dipergunakan oleh seorang teknisi atau *engineer* untuk mengambil tindakan lanjutan pada induksi motor dalam hal perawatan berkala atau masuk ke perbaikan komponen. Logika fuzzy menggunakan nilai *insulation resistance*, *polarization index* dan *relative humidity* sebagai tiga parameter input, data parameter input diolah menggunakan logika fuzzy dan menghasilkan parameter output berupa hasil penilaian tentang kondisi performa induksi motor.

METODE PENELITIAN

Penulisan penelitian ini digunakan metode deskripsi kualitatif, dimana proses penyelesaian masalah mengacu pada *literatur review* dan beberapa penelian terdahulu untuk mendapatkan keterkaitan dan penyelesaian yang sesuai dengan pedoman internasional kelistrikan IEEE dan dasar keilmuan tentang induksi motor. Proses analisis data untuk penghitungan dan penyelesaian masalah digunakan logika fuzzy pada aplikasi Matlab. Tahapan analisis diawali dengan parameter input yaitu nilai *insulation winding*, kemudian data parameter input diproses menggunakan logika Fuzzy Matlab sehingga menghasilkan parameter output penilaian performa induksi motor.

A. Objek penelitian

Objek penelitian yang digunakan adalah induksi motor 3 phase 380 VAC, untuk kelengkapan data objek penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Induksi Motor 3 Phase 380 VAC

No	Parameters	Value
1	Type	3D 280M1-2
2	Serial No	00.123
3	Voltage	380
4	Frequency	50
5	Ampere	178.8
6	Rpm	36xx
7	Cos θ	0.92
8	Insulation Class	F Class
9	Ambient Temperatur	40° C
10	IP	55

B. *Insulation Theory*

Penelitian tentang nilai insulation pada komponen induksi motor diberlakukan pada bagian lilitan atau *winding stator*, induksi motor 3 phase memiliki 3 komponen lilitan yang diatur sedemikian rupa menyesuaikan dengan kebutuhan dan tegangan masukan 3 phase sebesar 380 VAC – 440 VAC. Koneksi kabel pada lilitan stator induksi motor di simbolkan dengan U, V dan W dan kaitan instalasi kabel tersebut dengan bagian *ground* atau *body* induksi motor. Stardart internasioanal dan acuan dasar tentang komponen induksi motor yang berkaitan dengan *armature* atau lilitan motor tertera dalam aturan Insulation Standart IEEE 43-2000. Didalam acuan ini tertulis tentang pengertian insulation system, penghitungan dasar nilai *insulation*, faktor yang mempengaruhi nilai *insulation* hingga tata cara pengukuran insulation yang benar.

Nilai *insulation* pada induksi motor berhubungan dengan beberapa poin yaitu nilai *Insulation resistance (IR)*, *Polarization Index (PI)*, *Surface Leakage Current (IL)*, *Absorption Current (IA)*, *Conductive Current (IG)*, *Geometric Capacitive Current (IC)* dan *Electroendosmosis Effect*. Pengertian dari setiap komponen tersebut menurut IEEE 43-2000(IEEE, 2000)adalah sebagai berikut:

Insulation resistance (IRt) adalah kemampuan insulation listrik pada *armature* atau lilitan motor untuk menahan kekuatan arus searah, pengukuran ini dilakukan dengan inject tegangan DC menggunakan Megger kit. Hasil pembagian tegangan langsung yang diterapkan dari polaritas negatif dibagi arus yang melintasi isolasi induksi motor dan dikoreksi menggunakan nilai acuan temperatur kerja di 40°C, diambil pada rentang waktu tertentu (t) dimulai dari awal pemberian aplikasi tegangan searah. Waktu aplikasi pemberian tegangan normalnya berlangsung pada 1 menit (IR1) hingga 10 menit terakhir (IR10). Konvensi satuan waktu yang digunakan saat pengukuran dari awal menit hingga 10 menit berikutnya diasumsikan dalam satuan menit.

Polarization Index (PIt) adalah variasi nilai sebuah tahanan isolasi terhadap satuan waktu. Hasil pembagian dari nilai resistansi insulasi pada waktu kedua (t_2) dibagi dengan nilai tahanan insulasi pada waktu pertama (t_1). Jika hasil pengukuran nilai tahanan isolasi pada (t_2) dan (t_1) memiliki hasil yang tidak spesifik, maka nilai tersebut dapat diasumsikan dalam penghitungan pada 10 menit dan 1 menit pertama. Perlakuan konversi satuan antara nilai 1 hingga 10 diasumsikan dalam satuan menit.

Surface Leakage Current (IL) adalah nilai arus yang bersifat konstan terhadap satuan waktu, dan nilai ini dapat diukur dan ditemukan di atas permukaan lilitan ujung stator atau diantara sambungan konduktor yang terbuka dan pada badan komponen rotor dalam suatu lilitan rotor yang berinsulasi. Besarnya nilai kebocoran arus pada permukaan dipengaruhi dan tergantung pada temperatur serta jumlah bahan konduktif yang digunakan. Nilai kebocoran akan dipengaruhi oleh tingkat kondisi lingkungan (*environment*) yaitu temperatur, kelembaban (*humidity*) dan tingkat kontaminasi pada permukaan insulasi induksi motor.

Absorption Current (IA) adalah nilai arus yang dihasilkan oleh polarisasi molekul dan proses perpindahan oleh elektron yang bersifat melepaskan dengan waktu penerapan tegangan pada grafik laju penurunan dari nilai awal yang relatif tinggi hingga nilai menjadi atau mendekati Nol, proses penurunan ini tergantung pada jenis dan kondisi bahan insulasi pengikat yang digunakan dalam sistem insulasi induksi motor.

Conductive Current (IG) adalah nilai arus yang bersifat konstan dalam satuan waktu. Nilai arus yang melewati insulasi curah dari permukaan *grounding* menuju konduktor dengan nilai tegangan tinggi, dan nilai ini dipengaruhi oleh jenis bahan pengikat yang digunakan pada sistem insulasi induksi motor.

Geometric Capacitive Current (IC) adalah nilai arus AC (*Alternating Current*) dengan nilai besaran yang tinggi dan durasi waktu pendek, dengan sifat melepaskan atau menurun secara eksponensial dengan waktu penerapan tegangan. Nilai IC terpengaruh dan bergantung pada resistansi internal pada alat ukur yang digunakan dan kapasitansi geometris pada belitan induksi motor.

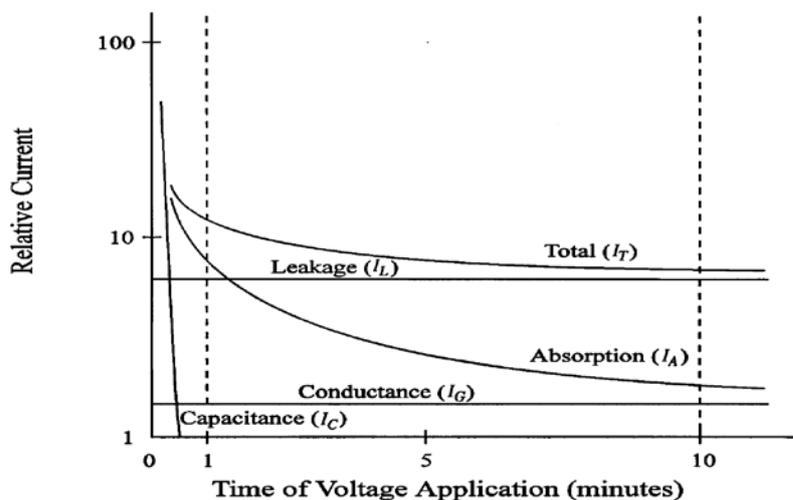
Electroendosmosis Effect adalah fenomena dimana kondisi pengamatan terkadang dilakukan dan lebih sering terjadi pada kondisi lilitan induksi motor yang lebih tua. Kondisi dimana lilitan induksi motor terdapat adanya uap air korosif, uap minyak dan nilai resistansi insulasi yang berbeda diperoleh ketika polaritas kabel pengujian dibalik. Normalnya pada kondisi lilitan basah yang lebih tua, resistansi isolasi berlaku untuk polaritas terbalik, di mana koneksi kabel *ground* terhubung ke lilitan dan tegangan negatif ke *ground*, memiliki nilai yang jauh lebih tinggi daripada kondisi polaritas normal.

Karakteristik dari ketiga komponen parameter input yaitu insulation resistance, polarization index dan relative humidity adalah sebagai berikut,

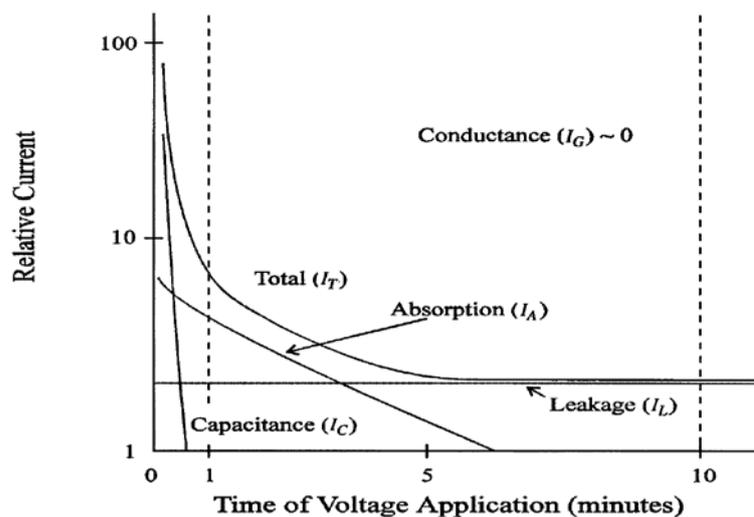
1. *Insulation Resistance (IR)*

Karakteristik dan sifat dari IR dengan memperhatikan nilai tegangan searah pada alat ukur yang digunakan serta nilai terukur yang dipengaruhi oleh kebersihan, kekeringan dan kondisi uap atau lapisan film pada permukaan lilitan induksi motor. Jika kondisi lilitan dalam keadaan kotor dan basah, maka nilai

Arus Total (I_T) bersifat konstan terhadap waktu (t), sehingga nilai I_L ataupun I_G akan bernilai lebih besar daripada I_A , ditunjukkan pada Gambar 2. Jika lilitan dalam kondisi kering dan bersih, maka nilai I_T bersifat menurun terhadap waktu (t), sehingga nilai I_T akan didominasi oleh Arus Serapan (I_A), ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Karakteristik Insulasi pada Kondisi Lilitan Kotor Basah(IEEE, 2000).



Gambar 3. Karakteristik Insulasi pada Kondisi Lilitan Bersih Kering(IEEE, 2000).

Tata cara pengukuran dan pengujian IR dilakukan dengan memberikan tegangan langsung dan perlu pembatasan nilai tegangan disesuaikan dengan kemampuan tegangan pada lilitan dan kondisi insulasi dasar induksi motor. Aturan ini penting dan perlu diperhatikan terutama perlakuan untuk induksi motor bertegangan rendah atau lilitan dengan kondisi kotor basah. Dampak memberikan tegangan pengujian terlalu tinggi atau tidak sesuai aturan, menyebabkan tegangan berlebih pada sistem insulasi lilitan dan menyebabkan kegagalan insulasi serta

kerusakan pada lilitan induksi motor. Pengujian IR dilakukan pada tegangan langsung dengan nilai konstan dengan range 500V hingga 10kV yang memiliki jenis polaritas negatif. Pengujian IR dimulai pada saat tegangan pengujian dimasukan dan langsung diterapkan selama 1 menit. Acuan dan standart nilai tegangan pengujian ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Acuan dan Standart Tegangan Pengujian IR

Winding Rate Voltage (V)	Insulation Resistance Test Direct Voltage (V)
<1000	500
1000 – 2500	500 – 1000
2501 – 5000	1000 – 2500
5001 – 12 000	2500 – 5000
> 12.000	5000 – 10 000

Pengujian IR dengan menggunakan voltmeter-ammeter adalah cara sederhana menentukan IR dengan mengukur tegangan yang melewati insulasi dan arus yang melaluinya. Cara ini memerlukan tegangan searah yang konstan, alat pengukur voltmeter harus sesuai dengan tegangan maksimum dan minimum. Ammeter memiliki skala *microammeter multirange* yang dipilih untuk mengukur berbagai arus sesuai tegangan yang digunakan. Mikroammeter berada pada skala jangkauan tertinggi untuk menghindari shorted pada alat saat pertama pengukuran. *Insulation Resistansi* (IR) dihitung dengan persamaan (1).

$$IR(t) = E(t) / I(t) \quad \text{Persamaan (1)}$$

Keterangan;

IR(t) = resistansi isolasi (Megaohm)

E(t) = pembacaan voltmeter (Volt)

I(t) = pembacaan arus dalam (t) detik setelah penerapan tegangan uji.

Hasil pengukuran IR pada induksi motor dapat digunakan sebagai dasar untuk teknisi atau engineer untuk melaksanakan tindakan perawatan lebih lanjut. Tindakan yang dapat dilakukan berdasarkan nilai hasil pengujian IR ditunjukkan pada Tabel 3.

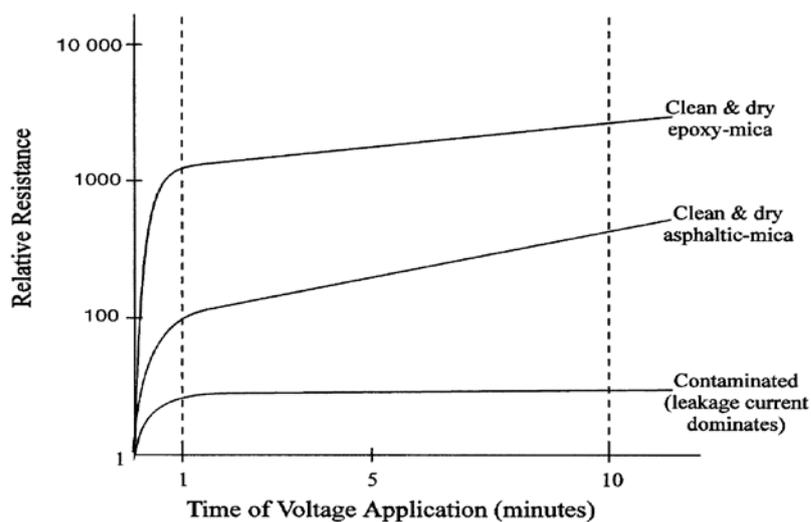
Tabel 3. General observasi dan Tindakan setelah Pengujian IR(Megger, 2006).

Hasil (Result)	Tindakan Lanjutan
Baik, nilai tinggi, terpelihara dengan baik	Aman, tidak ada alasan untuk khawatir
Cukup, nilai tinggi, tetapi kecenderungan konstan ke arah nilai yang lebih rendah	Temukan penyebabnya dan perbaiki, pemeriksa karena penurunan nilai
Rendah, tetapi terpelihara dengan baik	Kondisi mungkin baik, tetapi penyebab nilai rendah harus diperiksa

Sangat rendah, sehingga tidak aman	Bersihkan, keringkan, atau tingkatkan nilainya sebelum perakitan peralatan. (Pengujian ulang saat mengering.)
Nilai wajar atau tinggi, sebelumnya baik tetapi menunjukkan penurunan mendadak	Pengujian dengan interval sering sampai penyebab nilai rendah ditemukan, perbaiki atau sampai nilai menjadi stabil pada tingkat yang lebih rendah tetapi aman untuk operasi, atau sampai nilai terendah sampai tidak aman beroperasi.

2. Polarization Index (PI)

Pengukuran PI sebagai rasio resistansi insulasi selama 10 menit (IR10) dengan tahanan insulasi selama 1 menit (IR1), pelaksanaan pengujian PI pada temperatur konstan. Pada komponen insulasi induksi motor yang lebih tua (bahan: asphaltic-mica), *Absorption Current* (IA) membutuhkan waktu 10 menit atau lebih untuk menurunkan nilai hingga mendekati Nol. Pada induksi motor terbaru dan modern sistem insulasi untuk lilitan stator IA dapat cepat menurun hingga mendekati Nol dalam 2 - 3 menit, ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kondisi Insulation Material Lama (A-m) dan Modern (E-m)(IEEE, 2000).

Berdasarkan grafik pada Gambar 4, maka penghitungan PI yang berlaku berkaitan dengan jenis material insulasi yang digunakan induksi motor. Penghitungan PI terbagi atas dua persamaan yang dapat digunakan dan disesuaikan dengan jenis bahan insulasi. Penghitungan PI dengan menggunakan persamaan berikut:

$$PI = IR1 / IR30(s) \quad \text{Persamaan (2)}$$

Keterangan:

PI = indeks polarisasi,

IR1 = pembacaan isolasi setelah penerapan tegangan selama 1 menit,
 IR30(s)= pembacaan isolasi setelah penerapan tegangan selama 30 detik.

$$PI = IR10/IR1 \quad \text{Persamaan (3)}$$

Keterangan:

PI = indeks polarisasi,

IR5 = pembacaan isolasi setelah penerapan tegangan selama 5 menit,

IR1 = pembacaan isolasi setelah penerapan tegangan selama 1 menit.

Hasil pengukuran PI pada induksi motor digunakan sebagai dasar penilaian kualitas insulasi dalam kondisi baik atau buruk. Standart penilaian dan result dari pengujian PI ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Standart Ratio Pengujian PI(IEEE, 2000).

Polarization Index Value	Insulation Condition
< 1.0	Dangerous
1 – 1,4	Poor
1,5 – 1,9	Questionable
2,0 – 2,9	Fair
3,0 – 4,0	Good
> 4.0	Excellent

Standart rekomendasi nilai minimum untuk pengujian PI berdasarkan Insulasi kelas induksi motor ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Standart Minimum Nilai PI dengan kelas Insulasi(IEEE, 2000).

Thermal Class Rating	Minimum PI Value
Class A	1,5
Class B	2,0
Class F	2,0
Class H	2,0

3. *Relative Humidity (RH)*

Relative Humidity adalah persentase rasio dari jumlah kandungan uap air yang terkandung dalam volume udara dibandingkan dengan jumlah uap air maksimal yang dapat terkandung dalam volume udara tersebut (saturasi)(Ii & Teori, n.d.). Persentase kandungan RH dalam udara secara umum dituliskan 0 – 100%, dimana RH dengan nilai 100 % diartikan bahwa udara memiliki kandungan air 100% atau udara saturasi (kondisi dimana udara penuh dengan uap air). Penghitungan RH udara menggunakan persamaan berikut:

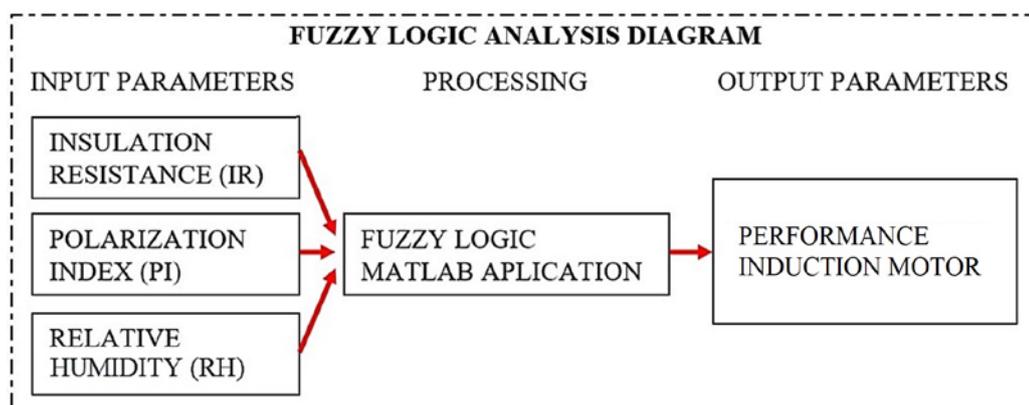
$$RH = \frac{\text{Partial Vapour Pressure}}{\text{Max. Vapour Pressure}} \quad \text{Persamaan (4)}$$

$$RH = \frac{Kg \text{ Vapour} / Kg \text{ Dry Air}}{Kg \text{ Vapour} / Kg \text{ Saturated Air}} \quad \text{Persamaan (5)}$$

RH memiliki keterkaitan dengan pengujian insulation pada induksi motor, beberapa jenis material insulasi bersifat higroskopis atau mudah menyerap uap air sehingga kondisi lilitan menjadi basah. Bahan higroskopis seperti asphaltic-mica dan shellac mica-folium yang lebih tua serta beberapa strip isolasi yang digunakan sebagai sekat konduktor tembaga. Kondisi lilitan yang basah meningkatkan IG dan menurunkan nilai IR. Pengujian IR ataupun PI baik dilakukan pada ambient temperatur untuk menghindari kelembaban yang tinggi pada lilitan induksi motor.

C. Logika Fuzzy dan Matlab

Pada penelitian ini penyelesaian masalah digunakan analisis perhitungan logika Fuzzy (Sri Kusumadewi, 2010), parameter input dari ketiga komponen dan satu parameter output dirubah menjadi himpunan fuzzy, kemudian diolah menggunakan kaidah dan aturan logika fuzzy. Penyelesaian keseluruhan data dilakukan menggunakan fuzzy dalam aplikasi simulink Matlab (Advernesia, 2017), hasil akhir dari penghitungan adalah performa induksi motor (result = baik / buruk). *Block diagram* proses analisis logika fuzzy ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Analisis Logika Fuzzy

Parameter dasar diperlukan sebagai acuan dasar penghitungan logika fuzzy, nilai acuan atau *range* berlaku untuk parameter input dan output. Parameter dasar analisis performa induksi motor ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Fuzzy Parameter Input – Output

Parameter	Nilai
1 Insulation Resistance (IR)	IR < 1MΩ (<i>unacceptable</i>); 1-10MΩ (Special care); 10-100MΩ (questionable); IR > 100MΩ (acceptable) (IEEE, 2000).
2 Polarization Index (PI)	PI < 1.0 (<i>dangerous</i>); 1 – 1,4 (<i>poor</i>); 1,5 – 1,9 (<i>questionable</i>); 2,0 – 2,9 (<i>fair</i>); 3,0 – 4,0 (<i>good</i>); PI > 4.0 (<i>excellent</i>) (IEEE, 2000)

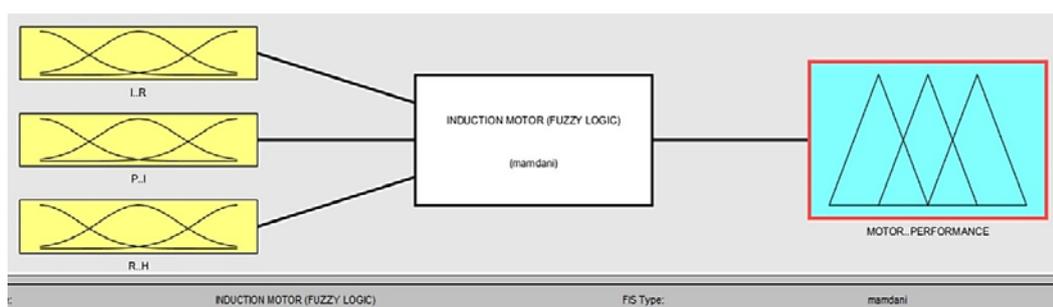
3	Relative Humidity (RH)	0-50% (<i>dry</i>); 51-80% (<i>moist</i>); 81-100% (<i>wet</i>)(Temperatures, n.d.)
4	Performa Induksi Motor (<i>Final result</i>)	0-50% (<i>poor/unacceptable</i>); 50-70% (<i>special monitoring</i>); 70-100% (<i>good/acceptable</i>)

PEMBAHASAN

Pengolahan data dalam penelitian ini menggunakan logika fuzzy pada aplikasi Matlab Simulink, dimana tiga parameter input diolah menggunakan logika fuzzy untuk menentukan hasil akhir parameter output. Nilai acuan dari tiap keempat parameter ditunjukkan pada Tabel 5, parameter dasar ini sebagai acuan awal untuk pembentukan keanggota fuzzy atau fuzzifikasi pada aplikasi Matlab.

A. Desain Logika Fuzzy Matlab

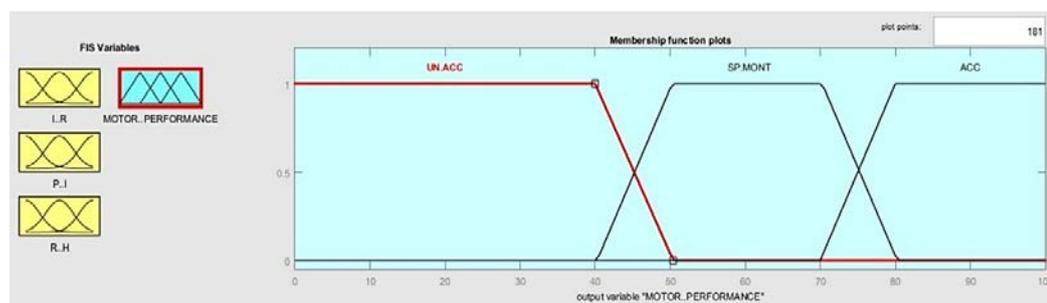
Pada penelitian ini desain fuzzy pada aplikasi matlab simulink terdiri dari tiga parameter input dan satu parameter output. Tiga parameter input yaitu *Insulation resistance (IR)*, *Polarization Index (PI)* dan *Relative Humidity (RH)*, ketiga parameter diolah dalam sistem fuzzy matlab guna mendapatkan hasil akhir berupa parameter output yaitu penentuan performa induksi motor (*Final result*). Desain Fuzzy Matlab ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Desain Parameter Input-Output Fuzzy Matlab

B. Fuzzyfikasi

Pada proses ini ditampilkan himpunan fuzzy atau keanggotaan fuzzy untuk setiap parameter input dan output, keanggotaan fuzzy dibuat berdasarkan nilai acuan atau parameter dasar yang telah ditentukan sesuai dengan Tabel 6. Keanggotaan fuzzy atau fuzzifikasi untuk parameter output ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Fuzzifikasi Parameter Output Performa Induksi Motor

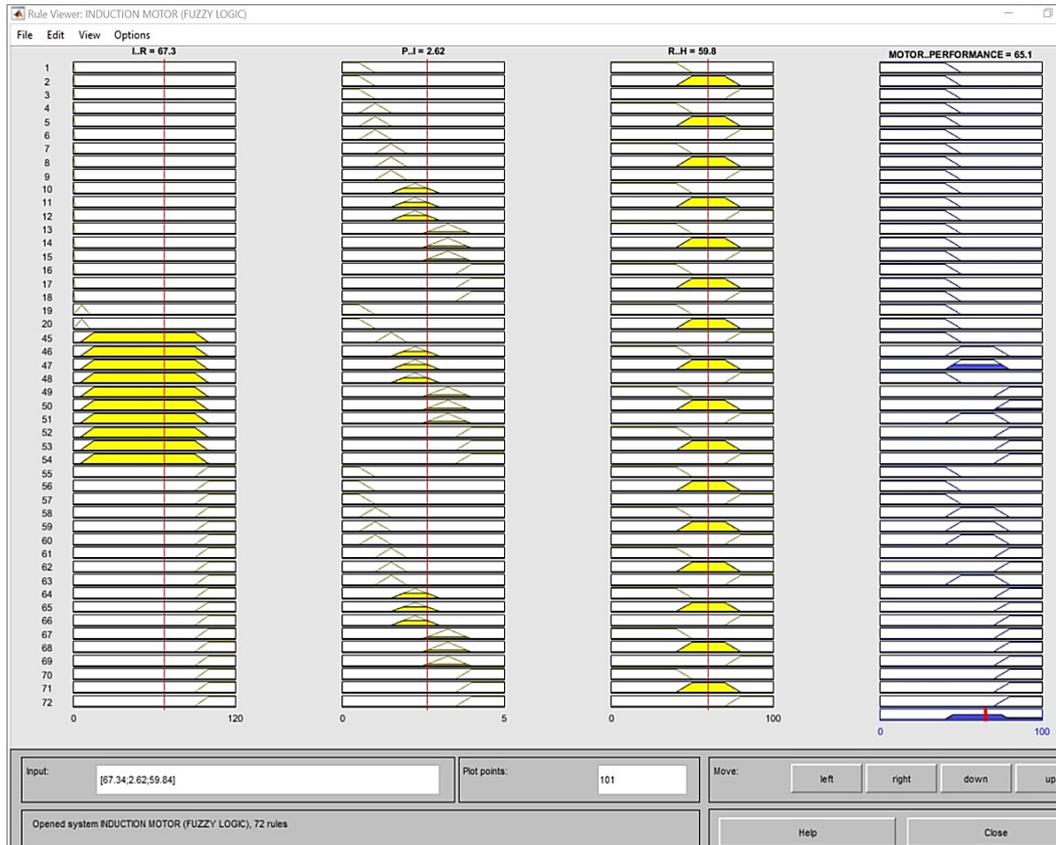
C. Fuzzy Rules Based

Pada penelitian ini analisis fuzzy terdapat tiga parameter input beserta dengan fungsi keanggotaannya. Parameter input terdiri dari IR (*unacceptable, special care, questionable, acceptable*), PI (*dangerous, poor, questionable, fair, good, excellent*) dan RH (*dry, moist, wet*). Maka dari parameter tersebut dihasilkan sejumlah 72 Rules yang dipergunakan untuk proses penyelesaian analisis logika fuzzy matlab. Sesuai kaidah pembuatan *fuzzy rules* yaitu dengan menggunakan kata hubung “*If – and – Then*”, ketiga kata hubung tersebut dipergunakan untuk memberikan penekanan dan pemahaman hubungan antar keanggotaan fuzzy pada setiap parameter. Berikut adalah 7 dari 72 Rules yang dipergunakan dalam penyelesaian analisis logika fuzzy matlab, yaitu:

1. [R10]. *If IR unacceptable, and PI fair, and RH dry, Then Performance Poor/unacceptable*
2. [R20]. *If IR special care, and PI danger, and RH moist, Then Performance Poor/unacceptable*
3. [R30]. *If IR special care, and PI fair, and RH wet, Then Performance Poor/unacceptable*
4. [R40]. *If IR questinable, and PI poor, and RH dry, Then Performance Poor/unacceptable*
5. [R50]. *If IR questinable, and PI good, and RH moist, Then Performance Good/acceptable*
6. [R60]. *If IR acceptable, and PI poor, and RH wet, Then Performance Special monitoring*
7. [R70]. *If IR acceptable, and PI excellent, and RH dry, Then Performance Good/acceptable*

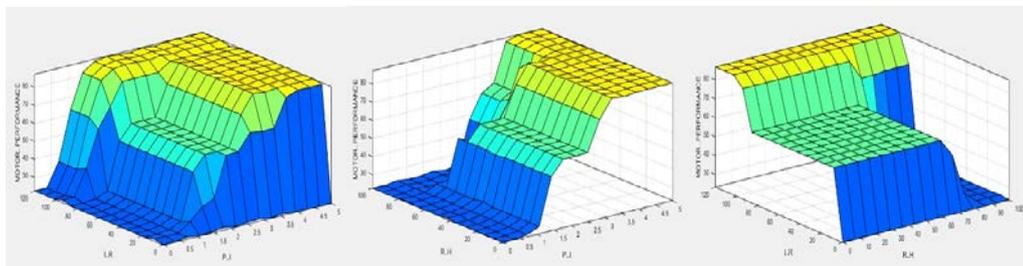
C. Fuzzy Inference Engine dan Defuzzifikasi

Fuzzy inference engine dan defuzzifikasi adalah proses analisis oleh logika fuzzy matlab dengan memperhitungkan setiap nilai pada parameter input dan menghasilkan nilai pada parameter output dengan mengacu kepada *fuzzy rules based*. Sistem fuzzy ini melakukan analisis perhitungan secara otomatis pada aplikasi matlab. *Inference engine* dan defuzzifikasi ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Fuzzy Inference Engine dan Defuzzifikasi

Analisis fuzzy pada aplikasi matlab dengan mengacu pada *inferrence engine* dan defuzzifikasi menampilkan grafik keterkaitan antara ketiga parameter input, yaitu hubungan analisis antara *Insulation Resistance (IR)*, *Polarization Index (PI)* dan *Relative Humidity (RH)*. Grafik hubungan ketiga parameter input ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Hubungan Parameter Input (IR-PI-RH)

D. Hasil Pengujian

Pengukuran *insulation* dilakukan pada induksi motor dengan spesifikasi sesuai dengan Tabel 1, yaitu induksi motor 3 phase 380 VAC dengan type 3D 280M1-2, 178.8 Amp, *Insulation class F (Amb. temp 40°C)*, IP 55. Hasil pengukuran *Insulation resistance (IR)* electric motor pada temperatur 40°C dan RH 50% ditunjukkan pada Tabel 7.

Table 7. Data Pengukuran Nilai *Insulation Electric Motor*

IR(menit)	U - Gnd	V - Gnd	W - Gnd	Keterangan
IR1	378.6	390.6	350,2	Alat ukur :
IR2	310,4	568.2	528.4	Digital
IR3	510,8	670.5	660.4	Megger Test
IR4	740,5	830.8	840.8	Sanwa
IR5	946.2	1820.2	1170.4	MG5000
IR6	1680.5	1940.6	1688.4	
IR7	1845.8	2446.4	1864.6	
IR8	2320.4	2650.8	2437.5	
IR9	3480.8	3548.2	3436.8	
IR10	3876.4	2886.5	3878.8	
PI	10.24	7,39	11.08	

Penjelasan data dari Tabel 6, hasil pengukuran nilai *insulation* dilakukan pada ketiga kabel induksi motor yaitu kabel U, V, W dan kabel Gnd (*body motor*). Pengukuran dilakukan secara berkelanjutan dan diambil data hasil pengukuran disetiap menit pada menit pertama hingga menit 10. Nilai PI didapatkan dengan penghitungan manual menggunakan persamaan (3), hasil penghitungan nilai PI lebih besar dari 4 adalah kondisi *excellent* pada keanggotaan fuzzy PI. Hasil pengukuran IR1 sampai dengan IR10 adalah lebih dari 100M Ω , maka dinyatakan kondisi *acceptable* pada keanggotaan fuzzy IR. Nilai *humidity* RH pada level 50% adalah kondisi *moist* pada keanggotaan fuzzy RH.

Pengujian dari setiap nilai pengukuran pada Tabel 7, di masukan (*input data*) kedalam sistem analisis logika fuzzy matlab yaitu nilai IR, PI dan RH ke *Fuzzy Inference Engine* dan Defuzzifikasi. Proses analisis Fuzzy matlab berjalan secara otomatis dan menghasilkan nilai pada parameter output yang menyatakan *final result* yaitu performa induksi motor. Hasil pengujian analisis fuzzy matlab ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Analisis Fuzzy Matlab Performa Induksi Motor

IR(M Ω)	PI(M Ω)	RH (%)	Final Result	IR(M Ω)	PI(M Ω)	RH(%)	Final Result
378.6	10.24	50	Good	390.6	7,39	50	Good
310,4	10.24	50	Good	568.2	7,39	50	Good
510,8	10.24	50	Good	670.5	7,39	50	Good
740,5	10.24	50	Good	830.8	7,39	50	Good
946.2	10.24	50	Good	1820.2	7,39	50	Good
1680.5	10.24	50	Good	1940.6	7,39	50	Good
1845.8	10.24	50	Good	2446.4	7,39	50	Good
2320.4	10.24	50	Good	2650.8	7,39	50	Good
3480.8	10.24	50	Good	3548.2	7,39	50	Good
3876.4	10.24	50	Good	2886.5	7,39	50	Good

KESIMPULAN

Penelitian membahas tentang analisis penilaian performa induksi motor berbasis logika fuzzy pada matlab Simulink. Analisis fuzzy menggunakan tiga parameter input yaitu *Insulation Resistance (IR)*, *Polarization Index (PI)* dan *Relative Humidity (RH)*. Data input adalah hasil pengukuran IR, PI dan RH pada induksi motor 3 phase, pengukuran dilakukan pada ketiga kabel induksi motor yaitu kabel U, V, W dan kabel Gnd (*body motor*). Pengukuran dilakukan secara berkelanjutan dan diambil data hasil pengukuran disetiap menit pada menit pertama hingga menit 10 sebagai nilai IR dan PI. Pengujian analisis logika fuzzy berhasil dilakukan dengan pengolahan data hasil pengukuran dan dilanjutkan analisis fuzzy matlab terhadap ketiga parameter input yaitu IR, PI dan RH, hasil akhir analisis fuzzy matlab yaitu berhasil menentukan performa baik dan buruk pada induksi motor. Penelitian lebih lanjut dapat dilaksanakan untuk penilaian performa induksi motor dengan menggunakan analisis logika fuzzy, yaitu menambahkan parameter input baru untuk memberikan variasi pada proses penyelesaian masalah. Parameter input baru tersebut adalah komponen yang menyebabkan terjadinya perubahan performa induksi motor, faktor tersebut antara lain dari sisi mekanikal, konstruksi ataupun sistem kelistrikan induksi motor.

DAFTAR PUSTAKA

- Advernesia. (2017). *What is MATLAB and its Uses*. Article/Id_ID.
- Bergmeijer, P. (1992). The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships. *Ports As Nodal Points in a Global Transport System*, 111(50), 259–270. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-040994-8.50026-7>
- Chauvin Arnoux. (2010). *Insulation Resistance Testing Guide*. 28.
- Deshmukh, K. S., Bansal, D. P. K., & Killedar, D. A. (2017). Theory and Analysis of Three Phase Induction Motor using Written Pole Technology. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 12(01), 70–75. <https://doi.org/10.9790/1676-1201027075>
- Gonzalez, E. A., Petráš, I., & Ortigueira, M. D. (2018). Novel polarization index evaluation formula and fractional-order dynamics in electric motor insulation resistance. *Fractional Calculus and Applied Analysis*, 21(3), 613–627. <https://doi.org/10.1515/fca-2018-0033>
- IEEE. (2000). IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery IEEE Power and Energy Society. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc*, 43, 9–14.
- Ii, B. A. B., & Teori, L. (n.d.). =217 (e) T a. 217, 5–43.
- Koji, Y., & Tsuyoshi, T. (2019). *Measuring “insulation resistance” for three-phase motor while operating | OMRON TECHNICS | Technology | OMRON Global*. 51, 1–6.
- Megger. (2006). “ A Stitch in Time ...” The Complete Guide to Electrical Insulation Testing. *Megger*, 23–24.
- Naik, V., Singh, S. K., Chawhan, S., Wankhede, J., Nair, A., Balpande, A.,

- Engineering, E., & Nagpur, S. B. J. I. T. M. R. (2017). Routine Test of Three Phase Induction Motor. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(4), 1745–1751.
- Negara, I. M. Y., Asfani, D. A., Fahmi, D., & Siti Sudatul Aisyah, N. (2014). Testing and simulation of motor insulation system under some artificial environmental conditions. *International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, 1(July 2015), 286–289. <https://doi.org/10.11591/eecsi.1.343>
- Pratama, A. A., Astriawati, N., Waluyo, P. S., & Wahyudiyana, R. (2022). Optimalisasi Perawatan Sistem Pendingin Mesin Utama Di Kapal MV. Nusantara Pelangi 101. *Majalah Ilmiah Bahari Jogja*, 20(1), 1–11.
- Primer, T. D. M., Connected, D., Voltage, L., & Voltage, H. (n.d.). *Three-Phase Dual-Voltage Motor Insulation Resistance Testing*.
- Sari Hartati, P. R., Manuaba, I. B. G., & Mataram, I. M. (2020). Induction Motor Monitoring System Base on Fuzzy Logic Controller. *Journal of Electrical, Electronics and Informatics*, 4(1), 15. <https://doi.org/10.24843/jeei.2020.v04.i01.p03>
- Siddiqui, K. M., Sahay, K., & Giri, V. K. (2014). Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor- A Review. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3(1), 2320–3765.
- Sri Kusumadewi, H. P. (2010). *Fuzzy logic application for decision support*. Graha Ilmu.
- Temperatures, C. O. (n.d.). *AGN 072 – Environmental Conditions. D*, 1–15.
- Waide, P., & Brunner, C. U. (2011). Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. *Internationale Energy Agency, na(na)*, 132.
- Wibowo, W., & Astriawati, N. (2021). Sistem Pendingin Tertutup Pada Mesin Diesel Tipe Diesel MAK 8M32 Sebagai Penggerak Utama Kapal Motor LIT ENTERPRISE. *Jurnal POLIMESIN*, 19(1), 28–34.