

Analisis Kelayakan Motor Listrik Induksi Tiga Fase Berdasarkan Kondisi Belitan Stator Dan Tahanan Isolasi Menggunakan Static Motor Analyzer Di PT Pupuk Kalimantan Timur

Antonius Yudistira Sakke¹, Suratno², Verra Aullia³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Samarinda

antoniusyyyyy37@gmail.com, suratnopolnes@gmail.com, verraaulia@polnes.ac.id

Abstrak- Motor induksi tiga fase merupakan komponen vital dalam proses industri, sehingga keandalannya perlu dipastikan melalui pengujian kondisi secara berkala. Metode konvensional seperti pengukuran tahanan isolasi dengan insulation tester dinilai kurang mampu mendeteksi kerusakan tersembunyi pada belitan stator maupun isolasi motor secara dini. Penelitian ini bertujuan menganalisis kelayakan operasi motor induksi tiga fase berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi dan belitan stator menggunakan Static Motor Analyzer di PT Pupuk Kalimantan Timur. Pengujian dilakukan terhadap sepuluh unit motor induksi tiga fase, meliputi uji resistansi belitan stator, uji tahanan isolasi, *polarization index*, dan *surge comparison test*, yang hasilnya dibandingkan dengan standar IEEE 43 dan EASA AR100-2015. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tujuh motor dinyatakan layak operasi karena seluruh parameter pengujian memenuhi standar, sedangkan tiga motor dinyatakan tidak layak operasi akibat ketidakseimbangan resistansi antar fase, degradasi isolasi, dan indikasi turn-to-turn fault, dengan Motor 2KM601 P4 menunjukkan kondisi paling kritis hingga memicu status *Emergency Shutoff*. Static Motor Analyzer terbukti efektif mengungkap gangguan tersembunyi yang tidak terdeteksi metode konvensional, sehingga dapat diandalkan sebagai alat diagnostik utama dalam mendukung program *predictive maintenance* motor listrik di lingkungan industri.

Kata kunci: Motor Induksi Tiga Fase, Tahanan Isolasi, Belitan Stator, Static Motor Analyzer, Surge Test, Polarization Index.

I. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fase merupakan mesin listrik yang banyak digunakan di industri karena memiliki keandalan tinggi, konstruksi sederhana, dan biaya perawatan yang relatif rendah. Keandalan motor sangat berpengaruh terhadap kontinuitas proses produksi sehingga diperlukan pemeliharaan dan pengujian kondisi motor secara berkala untuk mendeteksi potensi kerusakan sebelum terjadi kegagalan operasi.

Salah satu metode *predictive maintenance* yang banyak digunakan adalah pengujian menggunakan Static Motor Analyzer (SMA). Alat ini mampu melakukan pengujian secara *offline* terhadap kondisi belitan stator dan tahanan isolasi, sehingga kerusakan seperti hubung singkat antar lilitan,

ketidakseimbangan resistansi fase, maupun degradasi isolasi dapat dideteksi secara dini.

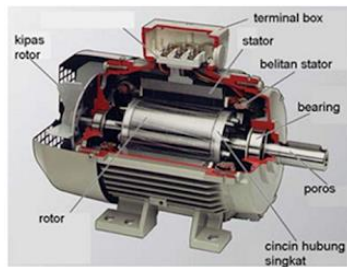
Penelitian ini menganalisis sepuluh motor induksi tiga fase yang berasal dari beberapa pabrik dan unit proses di PT Pupuk Kaltim. Motor-motor tersebut berfungsi sebagai penggerak berbagai peralatan industri, seperti pompa, blower, mixer, drum, *high palletizer*, dan *conveyor bagging*. Keberagaman fungsi dan lokasi pemasangan motor memberikan gambaran yang representatif mengenai kondisi motor yang digunakan di lingkungan industri.

Penelitian ini bertujuan menganalisis kelayakan operasi motor induksi tiga fase berdasarkan kondisi belitan stator dan tahanan isolasi menggunakan Static Motor Analyzer. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam menentukan kelayakan operasi motor serta mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan secara lebih efektif guna meningkatkan keandalan sistem dan kontinuitas proses produksi.

II. LANDASAN TEORI

A. Motor Induksi Tiga Fase

Mesin-mesin listrik digunakan untuk mengubah suatu bentuk energi ke energi yang lain, misalnya mesin yang mengubah energi mekanis ke energi listrik disebut generator, dan sebaliknya energi listrik menjadi energi mekanis disebut motor. Masing-masing mesin mempunyai bagian yang diam dan bagian yang bergerak. Bagian yang bergerak dan diam terdiri dari inti besi, dipisahkan oleh celah udara dan membentuk rangkaian magnetik dimana fluksi dihasilkan oleh aliran arus melalui kumparan/belitan yang terletak didalam kedua bagian tersebut. Pada umumnya mesin-mesin penggerak yang digunakan di Industri mempunyai daya keluaran lebih besar dari 1 HP dan menggunakan motor Induksi Tiga Fase [1]. Konstruksi motor induksi tiga fase dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Motor Listrik Induksi Tiga Fase

1) Stator

Stator merupakan bagian diam pada motor induksi tiga fase yang berfungsi menghasilkan medan magnet berputar untuk menggerakkan rotor. Konstruksi stator terdiri atas inti besi berlapis (*laminated core*) yang memiliki alur (*slot*) sebagai tempat pemasangan belitan. Belitan stator tersusun atas tiga kumparan yang masing-masing mewakili satu fase dan dihubungkan ke terminal sebagai penghubung dengan sumber tegangan tiga fase. Jumlah kutub pada belitan stator menentukan kecepatan sinkron motor, di mana semakin banyak jumlah kutub, maka semakin rendah kecepatan putar motor. Kondisi belitan stator sangat menentukan keandalan operasi motor. Kerusakan pada belitan dapat menyebabkan penurunan performa, hilangnya medan magnet, hingga kegagalan operasi motor. Secara umum, kerusakan yang sering terjadi pada stator meliputi:

1. Overheating, yaitu kenaikan suhu berlebih yang menyebabkan penuaan dan kerusakan material isolasi.
2. Short circuit winding, yaitu hubung singkat antar lilitan dalam satu kumparan (*turn-to-turn fault*), antar kumparan dalam satu fase (*coil-to-coil fault*), maupun antar fase (*phase-to-phase fault*).
3. Open circuit winding, yaitu terputusnya belitan akibat kerusakan konduktor atau sambungan.
4. Degradasi isolasi, yaitu penurunan kualitas material isolasi akibat faktor usia, temperatur, kelembapan, maupun kontaminasi.

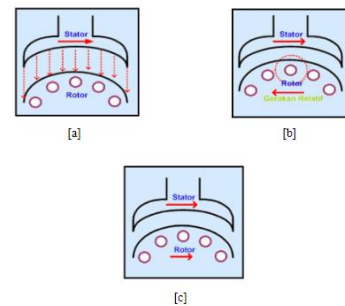
2) Rotor

Rotor adalah bagian yang bergerak atau berputar pada mesin, seperti motor listrik, generator, atau turbin. Fungsinya adalah mentransmisikan daya mekanik atau berinteraksi dengan medan magnet untuk mengubah energi listrik menjadi gerak. Motor Induksi bila ditinjau dari rotornya terdiri atas dua tipe yaitu rotor sangkar dan rotor lilit [2].

3) Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fase

Motor induksi 3 fase bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Ketika tegangan tiga fase diberikan pada stator, akan terbentuk medan magnet berputar. Medan putar ini menginduksi tegangan dan arus pada rotor, yang kemudian menghasilkan gaya putar pada rotor, membuat motor berputar

[2]. Prinsip kerja motor induksi atau terjadinya putaran pada motor, bisa dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. Prinsip Kerja Motor Listrik Induksi Tiga Fase

B. Isolasi

Motor induksi tiga fase berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik melalui interaksi medan magnet antara stator dan rotor. Peran sistem isolasi sangat vital untuk menjaga keamanan listrik sekaligus mencegah arus bocor yang dapat merusak komponen motor. Isolasi bekerja dengan memisahkan kawat konduktor dari inti stator maupun rotor, serta menghindari terjadinya hubung singkat antar fase. Material isolasi, seperti resin atau poliester, dibuat agar mampu menahan panas, tegangan tinggi, serta tekanan mekanis. Mutu isolasi sangat menentukan efisiensi sekaligus usia pakai motor, sebab isolasi yang kurang baik dapat menimbulkan panas berlebih dan kerusakan. Oleh karena itu, pengujian tahanan isolasi maupun *Polarization Index* (PI) perlu dilakukan untuk memastikan kondisi isolasi tetap terjaga dan mencegah kerusakan yang lebih parah [3].

1) Bahan Isolasi

Isolasi listrik menggunakan banyak bahan isolasi penyusun dalam berbagai kombinasi yang menghasilkan berbagai peringkat termal. Beberapa bahan dapat ditemukan dalam kelas termal yang lebih tinggi atau lebih rendah tergantung pada sistem isolasi komposit yang dihasilkan. Beberapa bahan isolasi umum yang diterapkan pada mesin listrik memiliki klasifikasi termal sebagai berikut :

- a. Kelas 105 (dahulu Kelas A): Kapas yang diimpregnasi, sutra, kertas berbasis selulosa, linen (kain cambric).
- b. Kelas 130 (dahulu Kelas B): Mika, serat kaca, asbes, dll. Bahan perekat yang umum digunakan adalah shellac, pernis aspal, dan beberapa resin poliester. Juga film poliester tereftalat (PET) dan berbagai kertas laminasi.
- c. Kelas 155 (dahulu Kelas F): Mika, serat kaca, PET, asbes, dll. Bahan perekat biasanya berupa resin epoksi, epoksi-poliester, atau akrilik.
- d. Kelas 180 (dahulu Kelas H): Elastomer silikon, mika, serat kaca, asbes, dll. Bahan perekat dapat terdiri dari resin silikon. Mika merupakan komponen penting dalam sebagian besar isolasi untuk mesin listrik tegangan tinggi karena memiliki kekuatan dielektrik yang baik pada suhu

tinggi dan tahan terhadap pelepasan parsial. Muskovit dan flogopit adalah dua bentuk mika yang paling umum digunakan untuk isolasi listrik. [3].

2) Tahanan Isolasi

Tahanan isolasi (*insulation resistance*) adalah ukuran seberapa baik material isolasi mampu mencegah aliran arus listrik yang tidak diinginkan antara konduktor dan bagian logam lain seperti inti stator atau rotor. Tahanan isolasi yang baik sangat penting untuk mencegah terjadinya arus bocor, yang dapat menyebabkan kerusakan pada mesin berputar, seperti motor atau generator. Dalam mesin listrik berputar, tahanan isolasi diperiksa dengan mengaplikasikan tegangan DC pada lilitan dan mengukur arus bocor yang terjadi melalui isolasi [4]. Berdasarkan hukum Ohm, tahanan isolasi (R) dihitung dengan persamaan (1) berikut :

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

Keterangan :

V = tegangan yang diaplikasikan (biasanya dalam volt),

I = arus bocor yang diukur (biasanya dalam ampere).

TABEL 1
STANDAR PENGUKURAN TAHANAN ISOLASI [4], [8].

Resistansi Insulasi Minimum ($M\Omega$)	Spesimen Uji
$IR_{1min} = kV + 1$	Untuk sebagian besar belitan yang dibuat sebelum tahun 1970, semua belitan medan, dan lainnya yang tidak dijelaskan di bawah.
$IR_{1min} = 100$	Untuk sebagian besar belitan angker DC dan AC yang dibuat setelah tahun 1970 (kumparan belitan cetakan).
$IR_{1min} = 5$	Untuk sebagian besar mesin dengan kumparan stator belitan acak dan kumparan belitan cetakan yang dinilai di bawah 1 kV.

3) Faktor Yang Dapat Mempengaruhi Tahanan Isolasi

Nilai dari hasil pengujian tahanan isolasi dapat memberikan indikasi awal kondisi mesin [3]. Nilai tahanan isolasi yang rendah dapat disebabkan oleh beberapa faktor :

- Faktor usia : Isolasi menjadi rusak seiring waktu karena materialnya rapuh, menyusut, dan bisa retak. Semakin lama digunakan, bahan isolasi seperti plastik atau resin bisa melemah dan rusak secara alami. Proses penuaan ini dipercepat oleh kondisi beban berlebih yang menyebabkan isolasi menanggung suhu tinggi secara terus-menerus.
- Faktor listrik : Panas yang berlebihan muncul karena efek dari corona, lonjakan listrik akibat petir, tegangan yang tidak seimbang, atau kesalahan saat tes. Listrik yang tidak stabil atau lonjakan listrik bisa memanaskan isolasi dan membuatnya rusak.
- Faktor mekanis : Isolasi bisa rusak karena getaran, wedges (pengganjal) yang longgar, pengaruh dari kipas, sambungan

yang tidak kencang, atau benda asing yang masuk. Getaran mesin atau komponen yang longgar dapat merusak isolasi akibat gesekan dan tekanan yang berulang.

- Faktor panas : Isolasi bisa rusak karena beban terlalu berat, panas yang berlebihan akibat kegagalan isolasi, atau isolasi pita yang terlepas. Ketika mesin terlalu panas, isolasi tidak mampu menahan panas itu dan bisa rusak. Panas yang berlebihan dapat mempercepat proses penuaan material isolasi, membuatnya lebih rentan terhadap kerusakan dan kehilangan integritasnya.
- Faktor lingkungan : Isolasi bisa rusak karena debu, partikel magnetik, kelembaban, atau kontaminasi dari garam dan minyak. Lingkungan yang kotor atau lembab bisa merusak isolasi karena zat-zat itu mengganggu kemampuan isolasi dalam melindungi mesin.

C. Parameter Pengujian

Untuk menentukan kelayakan suatu motor listrik induksi tiga fase, maka akan dilakukan beberapa jenis pengujian untuk mengetahui kondisi dari motor listrik tersebut. Pengujian dilakukan pada tahanan isolasi dibagian belitan stator, pengujian yang dilakukan semuanya dapat dilakukan dengan menggunakan satu alat saja yaitu static motor analyzer. Adapun pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1) Uji Resistansi Isolasi

Uji resistansi isolasi bertujuan untuk mengevaluasi kualitas sistem isolasi belitan motor dengan mengukur arus bocor yang mengalir saat tegangan DC diberikan. Hasil pengujian dipengaruhi oleh kondisi isolasi, suhu, kelembapan, serta tegangan uji. Berdasarkan IEEE Std 43-2013, pengujian ini digunakan untuk menilai kelayakan isolasi motor dan mendeteksi indikasi awal degradasi isolasi. Selain melalui nilai tahanan isolasi, kondisi belitan juga dapat dievaluasi dari keseimbangan resistansi antar fase. Ketidakseimbangan resistansi dapat mengindikasikan adanya degradasi isolasi, sambungan yang kurang baik, atau kerusakan belitan [4]. Deviasi resistansi dihitung menggunakan Persamaan (2) sebagai berikut :

$$R_{dev} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max}} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

R_{dev} = deviasi resistansi (%)

R_{max} = nilai resistansi terbesar (Ω)

R_{min} = nilai resistansi terkecil (Ω)

Berdasarkan IEEE Std 43-2013 dan EASA AR100-2015, nilai deviasi resistansi yang baik tidak melebihi 5% [4], [8]. Nilai di atas batas tersebut menunjukkan adanya ketidakseimbangan belitan atau penurunan kualitas isolasi sehingga diperlukan pemeriksaan lebih lanjut.

2) Uji Tahanan Isolasi

Penurunan resistansi pada lilitan medan atau kumparan dapat mengindikasikan korsleting konduktor yang mungkin disebabkan oleh kerusakan isolasi di antara keduanya. Untuk lilitan atau kumparan lengkap dengan banyak putaran, metode ini mungkin tidak cukup akurat untuk mendeteksi lilitan yang mengalami korsleting. Gulungan rotor harus berada pada suhu ruangan sebelum pengukuran resistansi dingin dilakukan dan suhu gulungan harus ditentukan dengan cermat. Untuk mesin sinkron, resistansi medan dan suhu yang sesuai perlu diukur secara akurat menggunakan beberapa termometer, termokopel, atau RTD yang ditempatkan pada titik-titik yang sesuai karena kenaikan suhu gulungan medan selama operasi biasanya ditentukan dari perubahan resistansi. Resistansi gulungan medan yang diukur harus dibandingkan dengan nilai uji pabrik (setelah koreksi suhu) dan setiap perbedaan yang signifikan harus diselidiki. Dalam mengukur resistansi rotor dengan metode penurunan tegangan, sangat penting agar kontak tegangan untuk voltmeter ditempatkan langsung pada cincin kolektor atau kaki-kaki yang terbuka dari gulungan rotor [5].

3) Uji Penyerapan Dielektrik (Polarization Indeks)

Pengujian penyerapan dielektrik (*dielectric absorption test*) digunakan untuk mengevaluasi kondisi isolasi dengan mengukur perubahan resistansi isolasi terhadap waktu. Pengujian dilakukan pada seluruh atau sebagian belitan terhadap tanah menggunakan tegangan uji 500–10.000 V sesuai IEEE Std 43. Nilai resistansi diukur selama 10 menit atau hingga stabil, kemudian dihitung Polarization Index (PI), yaitu perbandingan resistansi pada menit ke-10 terhadap menit ke-1. Nilai PI digunakan untuk menilai kondisi isolasi serta membandingkan hasil pengujian dengan pengujian sebelumnya. Nilai minimum PI yang direkomendasikan mengacu pada IEEE Std 43 berdasarkan kelas termal sistem isolasi [4].

TABEL 2
NILAI INDEKS POLARISASI MINIMUM YANG
DIREKOMENDASIKAN UNTUK INSULASI PER TERMALKELAS
KOMPONEN MESIN BERDASARKAN STANDAR IEEE STD 43-2013
[4].

Peringkat Kelas Termals	Minimum PI
Kelas 105 (A)	1.5
Kelas 130 (B) Ke atas	2

4) Uji Surge Comparison Test

Surge Comparison Test adalah suatu pengetesan yang dilakukan dengan cara memasukkan tegangan ke belitan stator motor dan akan menampilkan suatu parameter gelombang yang akan menjadi tolak ukur baik atau tidaknya suatu gulungan atau *winding* suatu motor. Pengujian ini memiliki prinsip jika ketiga fase gelombang pengetesan sama maka *winding* motor dalam keadaan baik [7]. Pengujian ini mempunyai beberapa manfaat

untuk mengindikasikan kualitas suatu gulungan/*winding*, yaitu antara lain :

a. Untuk mengetahui tahanan isolasi suatu motor.

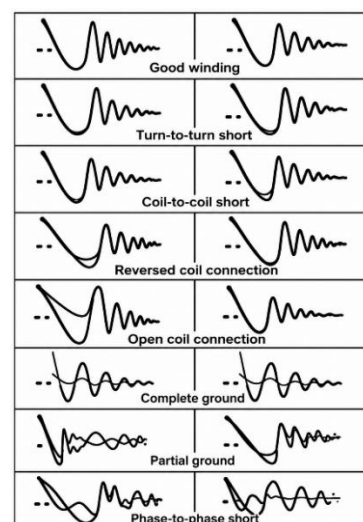
Dengan pengetesan *surge test* alat bisa mengetahui bagaimana kualitas suatu *winding* apakah *short to ground, phase to phase, turn to turn*.

b. Mengindikasikan kesalahan koneksi suatu motor.

Saat motor di *rewinding* maka perlu adanya pengecekan *connection* pada suatu gulungan apakah sudah benar atau salah. Dengan melakukan *surge test* maka akan di ketahui penyimpangan setiap gelombang.

c. *Balance* atau tidaknya suatu *resistance*

Berikut macam-macam bentuk gelombang dan makna kondisi gelombang, untuk lebih jelasnya terapat pada Gambar 3.



Gambar 3. Typical Surge test indication.

Keterangan :

- *Good Winding* = dua gelombang yang dihasilkan adalah sama dan saling tumpang tindih, hal tersebut menunjukkan bahwa winding dalam kondisi baik.
- *Turn to turn Short* = Menunjukkan bahwa adanya indikasi terjadinya hubung singkat antar kawat dalam 1 lilitan.
- *Coil to Coil Short* = Menunjukkan bahwa adanya hubung singkat antara lilitan (coil).
- *Phase to Phase Short* = Menunjukkan bahwa terjadinya hubung singkat antar phase dalam winding.
- *Partial Ground* = Menunjukkan bahwa ada lilitan yang short dengan body motor.
- *Reverse Coil Connection* = Menunjukkan bahwa terjadinya hubung singkat antar group dalam motor
- *Complete Ground* = Menunjukkan adanya indikasi terjadinya hubung singkat antara lilitan (coil) dengan body motor (ground).
- *Open Coil Connection* = Menunjukkan bahwa adanya indikasi hubung buka pada sambungan koneksi lilitannya [6].

Selain mengamati bentuk gelombang (*waveform*), hasil pengujian *Surge Comparison Test* juga dievaluasi menggunakan dua parameter utama, yaitu *Pulse-to-Pulse Error Area Ratio* (P-P EAR) dan *Line-to-Line Error Area Ratio* (L-L EAR). P-P EAR merupakan parameter yang membandingkan luas daerah kesalahan (*error area*) antar pulsa pada belitan dalam satu fase, sehingga digunakan untuk mendeteksi adanya ketidaksesuaian atau kerusakan pada belitan dalam fase yang sama. Sementara itu, L-L EAR merupakan parameter yang membandingkan luas daerah kesalahan antar fase untuk mengidentifikasi adanya ketidakseimbangan atau gangguan pada belitan antar fase. Berdasarkan standar pabrikan Static Motor Analyzer yang digunakan, nilai batas maksimum P-P EAR adalah 5%, sedangkan L-L EAR adalah 10%. Apabila hasil pengujian melebihi batas tersebut, maka motor diindikasikan mengalami gangguan pada belitan stator dan memerlukan pemeriksaan lebih lanjut.

D. Static Motor Analyzer

Static Motor Analyzer merupakan perangkat uji canggih yang digunakan untuk mendiagnosis kondisi motor listrik dalam keadaan diam, tanpa perlu memutar rotor atau menghubungkannya ke sumber daya operasional. Prinsip kerja *Static Motor Analyzer* adalah melakukan serangkaian pengujian listrik terhadap lilitan stator dan sistem isolasinya guna mendeteksi kerusakan sejak dini. Pengujian yang dilakukan meliputi uji tahanan lilitan (*winding resistance test*) untuk mengidentifikasi ketidakseimbangan atau lilitan terbuka antar fase, uji tahanan isolasi (*insulation resistance test*) untuk memastikan tidak terjadi kebocoran arus ke bodi motor, serta *polarization index test* yang membandingkan nilai tahanan isolasi pada menit pertama dan menit kesepuluh untuk menilai degradasi isolasi. Selain itu, *Static Motor Analyzer* juga mampu melakukan *surge test* yang mengirimkan pulsa tegangan tinggi untuk mendeteksi kerusakan antar lilitan (*turn-to-turn fault*), *hipot test* untuk memeriksa kekuatan dielektrik isolasi dengan tegangan tinggi AC/DC. *Static Motor Analyzer* adalah kemampuannya melakukan pemeriksaan secara *non-rotational*, sehingga aman, cepat, dan akurat, sekaligus mendukung program *predictive maintenance* di berbagai sektor industri. Perangkat ini banyak digunakan pada tahap inspeksi awal motor sebelum pemasangan, proses kontrol kualitas pada pabrik pembuat motor, maupun penelusuran kerusakan di lapangan, dengan merek terkenal seperti *Baker Instruments*, *SKF Baker DX*, dan *ALL-TEST Pro* [7]. Static Motor Analyzer dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Static Motor Analyzer

III. METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Lokasi

Proses pengambilan data kondisi belitan stator dan tahanan isolasi motor listik induksi tiga fase dilaksanakan pada bulan Februari sampai dengan Juni 2026, dengan tempat pelaksanaan di PT Pupuk Kalimantan Timur. Yang berlokasi di James Simandjuntak No.01, Kec. Bontang Utara Kota Bontang, Kalimantan

B. Jenis dan Sumber Data

1. Jenis Data

Jenis Data yang diperoleh dalam proses penelitian ini adalah data hasil observasi lapangan berupa:

1. Data motor induksi 3 fase yang masuk ke workshop
2. Data Motor dari static motor analyzer
3. Data hasil pengujian resistansi lilitan, tahanan isolasi, PI, dan Surge Comparison Test, motor listrik induksi tiga fase menggunakan Static Motor Analyzer.

2. Sumber Data

Sumber data yang diperoleh dalam proses penelitian ini adalah data dari alat static motor analyzer dan juga motor-motor listrik induksi tiga fase yang masuk ke workshop untuk diperbaiki

C. Teknik Pengumpulan Data

Tahapan-tahapan dalam pengumpulan data yang dilakukan untuk memperoleh data yang diperlukan dalam proses penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Metode literatur

Merupakan suatu tahapan yang dilakukan dengan cara membaca dan mempelajari buku buku yang berkaitan dengan masalah yang dibahas serta mengumpulkan beberapa atikel atau jurnal dari internet.

2. Metode observasi

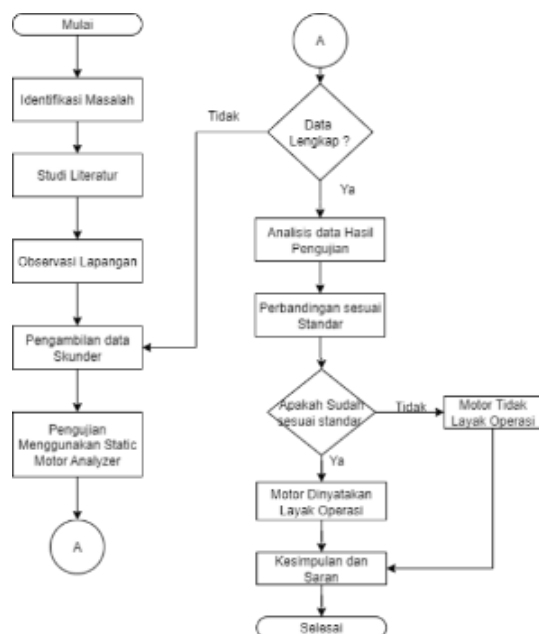
langsungMelakukan tinjauan langsung ke lapangan untuk melihat objek yang akan ditinjau dan mengumpulkan data yang diperlukan serta mendokumentasikannya.

3. Metode wawancara

Merupakan suatu metode untuk memperoleh informasi dan data yang dilakukan dengan cara berwawancara lalu mendiskusikannya kembali kepada pihak perusahaan yang terkait dan dosen pembimbing.

D. Flowchart Penelitian

Tahapan pelaksanaan dalam penulisan skripsi pada penelitian ini seperti yang akan ditunjukkan pada diagram alir penelitian Gambar 5 yang memuat tahapan pelaksanaan, metode yang digunakan setiap tahap.



Gambar 5. Flowchart Penelitian

E. Data Lapangan

Data lapangan adalah data yang diperoleh secara langsung melalui hasil pengamatan di lokasi, yaitu pada Perusahaan

TABEL 3
DATA NAMEPLATE MOTOR LISTRIK INDUKSI TIGA FASE

No	Motor Listrik yang Diuji	Data Nameplate					
		Teg (V)	Arus (In)	RPM	Freq (F)	Daya (Kw)	Kelas Isolasi
1	Motor M0204 P7	500	44	1470	50	34	F
2	Motor HPL 2 P6	500	32	1500	50	25	F
3	Motor 12PM201A P1A	6600	116	735	50	1050	F
4	Motor 14GM001B P3	500	25	1500	50	20	F
5	Motor 206J P2	500	1.97	1500	50	1,5	F
6	Motor Z2201BXM1 P1A	500	34	1430	50	22	F
7	Motor JH201A P5	500	8	1385	50	6	F
8	Motor 2KM601 P6 P1	6600	33	1486	50	315	F
9	Motor KNI 55kW	500	77	2978	50	55	F
10	Motor PM0501A	500	106	2960	50	82	F

1) Penjelasan Nomor Kode Motor Listrik

Setiap motor yang dijadikan bahan penelitian ini, memiliki nomor item atau nomor motor untuk menandakan

fungsi, dan letak motor di setiap area pabrik yang berbeda-beda mulai dari pabrik 1 hingga pabrik 7. Berikut ini merupakan penjelasan dari masing-masing kode nomor item motor listrik yang diteliti :

1. Motor M0204 P7 = M : Kode untuk motor drum, 0204 : Kode motor
2. Motor HPL-2 P6 = HPL : high palletizer, 2 : nomor unit
3. Motor 12-PM-201A P1A = 12 : kode motor area utility, PM : motor pompa, 201A : nomor unit
4. Motor 14-GM-001B P3 = 14 : kode motor area urea, GM : prilling bucket, 001B : nomor unit
5. Motor 206J P2 = 206J : kode motor area amoniak
6. Motor Z-2201B-XM1 P1A = Z : motor mixer, 2201B : kode motor, XM1 : unit 1
7. Motor JH-201A P5 = JH : motor conveyor bagging, 201A : kode motor
8. Motor 2-KM-601 P6 P1 = 2 : area urea, KM : motor blower, 601 : kode motor
9. Motor KNI 55kW = KNI : PT. Kaltim Nitrate Industri
10. Motor PM0501A = PM : motor pompa, 0501 : kode motor

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Resistansi Lilitan dan Deviasi Resistansi Belitan Stator

Pengujian deviasi resistansi bertujuan untuk mengevaluasi keseimbangan resistansi antarbelitan stator dengan membandingkan nilai resistansi pada setiap fase. Ketidakseimbangan resistansi dapat mengindikasikan adanya kerusakan pada belitan, seperti sambungan yang kurang baik, kerusakan konduktor, atau degradasi isolasi. Kriteria kelayakan pengujian ditentukan berdasarkan batas maksimum deviasi resistansi sebesar 5%, sehingga nilai deviasi yang melebihi batas tersebut menunjukkan adanya ketidakseimbangan resistansi pada belitan stator. Hasil pengujian deviasi resistansi pada satu fase dapat dilihat pada Tabel 4, sedangkan hasil pengujian deviasi resistansi antar fase dapat dilihat pada Tabel 4.

TABEL 4
DATA PENGUJIAN RESITANSI PADA TIAP COIL DALAM SATU FASE

No	Nama Motor	Data Pengujian Resistansi Tiap Coil			Deviasi Resistans $R_{dev} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max}} \times 100\%$
		U	V	W	
1	Motor M0204 P7	0.294	0.296	0.296	0.675 %
2	Motor HPL 2 P6	13.98	13.75	14.12	2.62 %
3	Motor 12PM201A P1A	0.309	0.309	0.309	0 %
4	Motor 14GM001B P3	23.34	23.31	23.14	0.856 %
5	Motor 206J P2	16.17	16.25	16.34	1.04 %

No	Nama Motor	Data Pengujian Resistansi Tiap Coil			Deviasi Resistansi $R_{dev} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max}} \times 100\%$
		U	V	W	
6	Motor Z2201BXM1 P1A	51.5	60.2	59.7	14.451 %
7	Motor JH201A P5	22.26	22.29	22.26	0.134 %
8	Motor 2KM601 P6 P1	0.210	0.473	0.476	55.882 %
9	Motor KNI 55kW	0.087	0.088	0.086	2.272 %
10	Motor PM0501A	0.1027	0.1027	0.1028	0.097 %

Berdasarkan hasil pengujian terhadap 10 motor, terdapat dua motor yang tidak memenuhi standar, yaitu motor Z2201BXM1 dengan deviasi resistansi sebesar 7% dan motor 2KM601 sebesar 27%. Nilai deviasi yang melebihi batas tersebut mengindikasikan adanya ketidakseimbangan resistansi pada belitan stator.

TABEL 5
DATA PENGUJIAN RESITANSI PADA TIAP COIL ANTAR FASE

No	Nama Motor UJI	Data Pengujian Resistansi			R	
		Antar Coil (Ω)			DEV	DEV
		U-V	V-W	U-W	UJI	Hitung
1	Motor M0204 P7	0.590	0.592	0.591	0.344	0.337
2	Motor HPL 2 P6	27.73	27.87	28.09	1.316	1.281
3	Motor 12PM201A P1A	0.618	0.617	0.618	0.070	0.161
4	Motor 14GM001B P3	46.66	46.46	46.49	0.428	0.428
5	Motor 206J P2	32.42	32.59	32.51	0.524	0.521
6	Motor Z2201BXM1 P1A	111.7	119.9	111.2	7.625	7.256
7	Motor JH201A P5	44.55	44.55	44.52	0.068	0.067
8	Motor 2KM601 P4	0.683	0.948	0.686	34.388	27.953
9	Motor KNI 55kW	0.175	0.175	0.173	1.385	1.142
10	Motor PM0501A	0.0685	0.0685	0.0686	0.070	0.145

Berdasarkan hasil pengujian terhadap 10 motor, terdapat dua motor yang tidak memenuhi kriteria tersebut, yaitu motor Z2201BXM1 dengan deviasi resistansi sebesar 7% dan motor 2KM601 sebesar 27%. Nilai deviasi yang melebihi batas menunjukkan adanya ketidakseimbangan resistansi pada belitan stator.

B. Hasil Pengujian Tahanan Isolasi

TABEL 6
DATA PENGUJIAN TAHANAN ISOLASI

No	Nama Motor	Tegangan Uji (V)	Arus Bocor I (μ A)	Resistansi ($M\Omega$)	Resistansi Minimal ($M\Omega$)	Keterangan
1	Motor M0204 P7	500	0.0138	36331	1.5	Layak >1.5 $M\Omega$
2	Motor HPL 2 P6	500	0.2186	2297	1.5	Layak >1.5 $M\Omega$
3	Motor 12PM201A P1A	6600	1.075	4653	7.6	Layak >7.6 $M\Omega$
4	Motor 14GM001B P3	500	0.2729	1829	1.5	Layak >1.5 $M\Omega$
5	Motor 206J P2	500	6.267	80	1.5	Layak >1.5 $M\Omega$
6	Motor Z2201BXM1 P1A	500	0.1634	2115	1.5	Layak >1.5 $M\Omega$
7	Motor JH201A P5	500	0.1284	3909	1.5	Layak >1.5 $M\Omega$
8	Motor 2KM601 P6	6600	323.700	6	7.6	Tidak Layak >1.5 $M\Omega$
9	Motor KNI 55kW	500	5.400	92	1.5	Layak >1.5 $M\Omega$
10	Motor PM0501A	500	0.0805	6271	1.5	Layak >1.5 $M\Omega$

Pengujian tahanan isolasi bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan isolasi belitan stator dalam mencegah kebocoran arus ke bodi motor maupun antarbelitan. Berdasarkan IEEE Std 43-2013, nilai minimum tahanan isolasi ditentukan sebesar (kV + 1) $M\Omega$. Hasil pengujian terhadap 10 motor menunjukkan bahwa satu motor, yaitu motor 2KM601 Pabrik 6, tidak memenuhi kriteria kelayakan. Motor tersebut memiliki nilai tahanan isolasi sebesar 6 $M\Omega$, lebih rendah dari batas minimum yang dipersyaratkan, yaitu 7,6 $M\Omega$.

C. Hasil Pengujian Polarization Indeks

TABEL 7
DATA PENGUJIAN POLARIZATION INDEKS

No	Nama Motor	Volts (V)	DA Ratio	PI Ratio
1	Motor M0204 P7	500	23.3	>2 OL
2	Motor HPL 2 P6	500	No Test	No Test
3	Motor 12PM201A P1A	6600	No Test	No Test

No	Nama Motor	Volts (V)	DA Ratio	PI Ratio
4	Motor 14GM001B P3	500	No Test	No Test
5	Motor 206J P2	500	No Test	No Test
6	Motor Z2201BXM1 P1A	500	No Test	No Test
7	Motor JH201A P5	500	No Test	No Test
8	Motor 2KM601 P6	6600	No Test	No Test
9	Motor KNI 55kW	500	2.0	2.4
10	Motor PM0501A	502	2.5	2.9

Pengujian Polarization Index (PI) bertujuan untuk mengevaluasi kondisi dan kualitas isolasi belitan stator berdasarkan perbandingan nilai tahanan isolasi pada menit ke-10 terhadap menit ke-1. Semakin tinggi nilai PI, semakin baik kondisi isolasi motor. Berdasarkan hasil pengujian terhadap 10 motor listrik, seluruh motor memiliki nilai PI di atas batas minimum yang dipersyaratkan, yaitu $\geq 2,0$, sehingga menunjukkan bahwa kondisi isolasi belitan masih dalam kategori baik dan layak untuk dioperasikan.

D. Hasil Pengujian Surge Comparison Test

TABEL 8
DATA PENGUJIAN SURGE COMPARISON TEST

No	Nama Motor	Data Uji P-P EAR (%)			Stand ar	Data Uji L-L EAR (%)			Stand ar
		U	V	W		U-V	V-W	W-U	
1	Motor M0204 P7	4.8	4.6	4.8	$\leq 5\%$	3	4	1	$\leq 10\%$
2	Motor HPL 2 P6	4.4	4.4	4.6	$\leq 5\%$	No Test	No Test	No Test	$\leq 10\%$
3	Motor 12PM201 A P1A	11.2	Fail	Fail	$\leq 5\%$	No Test	No Test	No Test	$\leq 10\%$
4	Motor 14GM001 B P3	4.5	4.4	4.5	$\leq 5\%$	1	1	2	$\leq 10\%$
5	Motor 206J P2	4.8	4.5	4.4	$\leq 5\%$	0	0	0	$\leq 10\%$
6	Motor Z2201BXM1 P1A	4.5	4.6	4.9	$\leq 5\%$	33	7	26	$\leq 10\%$
7	Motor JH201A P5	4.2	4.1	4.2	$\leq 5\%$	1	2	0	$\leq 10\%$
8	Motor 2KM601 P6	9.9	11.9	Fail	$\leq 5\%$	84	-	-	$\leq 10\%$
9	Motor KNI 55kW	4.4	4.2	4.3	$\leq 5\%$	2	1	0	$\leq 10\%$
10	Motor PM0501A	3.0	4.1	4.0	$\leq 5\%$	No Test	No Test	No Test	$\leq 10\%$

Pengujian *Surge Comparison Test* dilakukan untuk mendeteksi kerusakan isolasi antarbelitan (*turn-to-turn insulation*) dengan membandingkan respons gelombang

tegangan pada setiap fase belitan stator. Evaluasi hasil pengujian didasarkan pada dua parameter utama, yaitu *Line-to-Line Error Area Ratio* (L-L EAR) dengan batas maksimum $\leq 10\%$ dan *Pulse-to-Pulse Error Area Ratio* (P-P EAR) dengan batas maksimum $\leq 5\%$. Berdasarkan hasil pengujian terhadap 10 motor listrik, terdapat dua motor yang tidak memenuhi kriteria kelayakan, yaitu motor 12PM201A yang memiliki nilai P-P EAR pada fase U sebesar 11%, serta motor 2KM601 yang memiliki nilai L-L EAR sebesar 12% dan P-P EAR sebesar 84%. Nilai parameter yang melebihi batas standar tersebut mengindikasikan adanya kerusakan isolasi antarbelitan yang berpotensi menurunkan keandalan dan kinerja motor saat dioperasikan.

E. Rekapitulasi Motor Listrik Yang dinyatakan Layak Operasi

Berdasarkan hasil pengujian terhadap 10 motor listrik menggunakan *Static Motor Analyzer* pada kondisi *offline* (tidak terhubung ke sumber tegangan), diperoleh bahwa 7 motor dinyatakan layak beroperasi karena memenuhi kriteria pada empat parameter pengujian utama, yaitu deviasi resistansi, tahanan isolasi, *Polarization Index* (PI), dan *Surge Comparison Test*. Motor listrik yang dinyatakan layak operasi dapat dilihat pada tabel 9.

TABEL 9
MOTOR LAYAK OPERASI

No	Nama Motor	R Dev (%)	IR (M Ω)	PI	Surge P-P EAR	Status
1	Motor M0204 P7	0,344	36.331	>2	$\leq 4,8\%$	Layak
2	Motor HPL 2 P6	1,316	2.297	-	$\leq 4,6\%$	Layak
3	Motor 14GM001B P3	0,428	1.829	-	$\leq 4,5\%$	Layak
4	Motor 206J P2	0,524	80	-	$\leq 4,8\%$	Layak
5	Motor JH201A P5	0,068	3.909	-	$\leq 4,2\%$	Layak
6	Motor KNI 55 kW	1,385	92	2,4	$\leq 4,4\%$	Layak
7	Motor PM0501A	0,070	6.271	2,9	$\leq 4,1\%$	Layak

F. Rekapitulasi Motor Listrik Yang Dinyatakan Tidak Layak Operasi

Berdasarkan hasil pengujian terhadap 10 motor listrik menggunakan *Static Motor Analyzer* pada kondisi *offline* (tidak terhubung ke sumber tegangan), diperoleh bahwa tiga motor dinyatakan tidak layak karena tidak memenuhi satu atau lebih dari empat parameter pengujian utama. Jenis kerusakan yang teridentifikasi pada setiap motor bervariasi, meliputi deviasi resistansi, tahanan isolasi, *Polarization Index* (PI), dan *Surge Comparison Test*. Kegagalan pada salah satu parameter tersebut menunjukkan adanya potensi gangguan pada kondisi motor yang dapat menurunkan keandalan, kinerja, serta kontinuitas

proses produksi dan sistem kelistrikan apabila motor tetap dioperasikan. Motor yang dinyatakan tidak layak operasi beserta parameternya dapat dilihat pada tabel 10.

TABEL 10
MOTOR TIDAK LAYAK OPERASI

No	Nama Motor	Parameter Gagal	Nilai Terukur	Batas Standar	Status
1	Motor 12PM201A P1A	Surge P-P EAR	U : 11,2 % V : - W : -	≤10%	Gagal
2	Motor Z2201BXM1 P1A	R Dev & L-L EAR	7,625 %	≤10%	Gagal
		Surge L-L EAR	33%	≤10%	Gagal
		Deviasi resistansi belitan stator	34,39 %	≤5%	Gagal
		Tahanan isolasi	6 MΩ	≥7,6	Gagal
3	Motor 2KM601 P4	Surge P-P EAR	U : 9,9 % V : 11,9 % W : -	≤5%	Gagal
		Surge L-L EAR	U : 84 % V : - W : -	≤10%	Gagal

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian menggunakan static motor analyzer terhadap sepuluh unit motor induksi tiga fase di PT Pupuk Kalimantan Timur, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Kelayakan operasi motor induksi tiga fase ditentukan melalui empat pengujian, yaitu deviasi resistansi belitan (R DEV), tahanan isolasi (Insulation Resistance), Polarization Index (PI), dan Surge Comparison Test berdasarkan parameter P-P EAR dan L-L EAR. Motor dinyatakan layak apabila seluruh hasil pengujian memenuhi standar IEEE Std 43-2013 dan EASA AR100-2015.
2. Static Motor Analyzer terbukti efektif dalam mengevaluasi kondisi belitan dan isolasi motor, termasuk mendeteksi kerusakan yang tidak teridentifikasi melalui pengujian konvensional, seperti *turn-to-turn fault* pada Motor 12PM201A P1A yang hanya terdeteksi melalui Surge Comparison Test.
3. Dari sepuluh motor yang diuji, tujuh motor dinyatakan layak operasi karena memenuhi seluruh parameter pengujian, sedangkan tiga motor tidak layak operasi akibat ketidakseimbangan resistansi, degradasi isolasi, *turn-to-turn fault*, dan *partial short circuit* pada belitan.
4. Static Motor Analyzer mampu mendeteksi secara dini berbagai potensi kerusakan pada motor induksi, sehingga dapat diandalkan sebagai alat diagnostik.

B. Saran

Pengujian menggunakan Static Motor Analyzer disarankan dilakukan secara berkala sebagai bagian dari program predictive maintenance untuk mendeteksi potensi kerusakan sejak dini. Motor yang tidak memenuhi kriteria kelayakan sebaiknya segera dilakukan pemeriksaan dan perbaikan sesuai tingkat kerusakannya sebelum dioperasikan kembali. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jumlah sampel yang lebih banyak serta mengombinasikan pengujian Static Motor Analyzer dengan metode diagnostik lain, seperti thermography dan analisis vibrasi, agar diperoleh evaluasi kondisi motor yang lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan pada kepala bagian manajemen dan pengembangan sumber daya manusia PT Pupuk Kalimantan Timur dan juga pada bapak M. Noor Safa'at, Kepala bagian workshop listrik, Dept. Pemeliharaan Listrik di PT. Pupuk Kalimantan Timur, yang selama proses pengambilan data telah memberikan data-data yang diperlukan serta memberi penjelasan-penjelasan sehingga system yang ada dan permasalahannya akhirnya dapat dipahami dengan baik.

REFERENSI

- [1] A. Kadir, "Mesin-Mesin Listrik," Jakarta, PT Elex Media Komputindo, 1989.
- [2] D. Ramansyah, F. O. Nauli dan R. Sebayang, "ANALISIS PENGUJIAN TAHANAN ISOLASI STATOR DAN ROTOR GENERATOR GT 1.1 PLTG BELAWAN," Konferensi Nasional Social dan Engineering Politeknik Negeri Medan, pp. 819-827, 2023.
- [3] G. C. Stone, I. Culbert, H. Dhirani and E. A. Boulter, Electrical Insulation For Rotating Machines : Design, Evalutaion, Aging, Testing, and Repairing (Second Edition), Wiley-IEEE Press, 2021.
- [4] IEEE Power and Energy Society, IEEE Std 43-2013: IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery. New York, NY, USA: IEEE, 2013.
- [5] IEEE Power and Energy Society, IEEE Std 56-2016: IEEE Guide for Insulation Maintenance of Electric Machines. New York, NY, USA: IEEE, 2016.
- [6] D. Sulastri and I. A. Darmawan, "Pengujian Elektrik Motor Induksi 3 Phase Rotor Sangkar 75 kW di PT Mesindo Tekninesia," TESLA, vol. 24, no. 1, pp. 47–56, Mar. 2022.
- [7] Motor Diagnostic Systems, "Surge Testing," White Paper. Motor Diagnostic Systems.
- [8] Electrical Apparatus Service Association (EASA), ANSI/EASA AR100-2015: Recommended Practice for the Repair of Rotating Electrical Apparatus. St. Louis, MO, USA: EASA, 2015.