

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian yang Relevan

Kajian pustaka dalam penelitian ini dilakukan untuk memperoleh landasan ilmiah yang kuat terkait kondisi sistem isolasi motor listrik, mekanisme degradasinya selama kondisi tidak beroperasi, serta strategi pemeliharaan yang dapat diterapkan untuk menjaga keandalan motor listrik tegangan menengah. Referensi yang digunakan berasal dari jurnal ilmiah nasional dan internasional yang membahas aspek pemanasan, degradasi isolasi, serta manajemen termal pada motor listrik dan sistem belitan..

1. Penelitian yang dilakukan oleh Matkarim Ibragimov, Dilmurod Akbarov, dan Iroda Tadjibekova berjudul *“Investigation of asynchronous electric motor winding in heating mode and drying mode to prevent moisture”* membahas pengaruh kelembaban terhadap kondisi belitan motor listrik asinkron, khususnya dalam kaitannya dengan penurunan kualitas sistem isolasi. Penelitian ini menunjukkan bahwa akumulasi kelembaban pada belitan motor yang berada dalam kondisi tidak beroperasi dapat meningkatkan arus bocor dan mempercepat degradasi isolasi, yang berdampak langsung terhadap menurunnya nilai tahanan isolasi dan keandalan motor [14].

Melalui pengujian dalam mode pemanasan dan pengeringan, studi tersebut membuktikan bahwa pemanasan internal belitan motor mampu menurunkan kadar kelembaban yang teradsorpsi pada material isolasi. Peningkatan temperatur belitan menyebabkan penguapan kelembaban, sehingga sifat dielektrik isolasi dapat dipertahankan pada kondisi yang lebih stabil. Temuan ini menunjukkan bahwa pemanasan internal merupakan mekanisme yang efektif dalam mencegah penurunan kualitas isolasi pada motor yang mengalami periode *idle* dalam jangka waktu tertentu.

Meskipun penelitian tersebut tidak secara spesifik dilakukan pada motor tegangan menengah 6 kV di lingkungan PLTU, prinsip pemanasan internal belitan sebagai metode pengendalian kelembaban memiliki relevansi yang kuat terhadap penelitian

ini. Pada kondisi *Reserve Shutdown*, motor 6 kV berada dalam keadaan *idle* dan rentan terhadap kondensasi, sehingga konsep pemanasan belitan melalui metode *Periodic Start* dapat dipandang sebagai implementasi praktis dari mekanisme pemanasan internal yang dibahas dalam penelitian tersebut.

2. Jurnal yang ditulis oleh Kai Wang et al. berjudul "*Degradation Monitoring of Insulation Systems Used in Low-Voltage Electromagnetic Coils under Thermal Loading Conditions from a Creep Point of View*" mengkaji degradasi sistem isolasi pada kumparan elektromagnetik akibat pengaruh pembebanan termal dan waktu paparan. Studi ini menunjukkan bahwa temperatur operasi dan durasi paparan termal memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan sifat mekanik dan dielektrik material isolasi, yang pada akhirnya menurunkan keandalan sistem secara keseluruhan [15].

Walaupun objek penelitian difokuskan pada kumparan bertegangan rendah, mekanisme degradasi isolasi akibat stres termal dan efek waktu (*creep*) yang diuraikan dalam penelitian tersebut bersifat fundamental dan tidak bergantung pada tingkat tegangan nominal. Prinsip ini tetap relevan untuk sistem isolasi motor tegangan menengah, di mana paparan termal dan kondisi lingkungan selama periode *idle* dapat mempercepat proses penuaan isolasi.

Hasil penelitian ini memperkuat pentingnya pengendalian kondisi termal sebagai bagian dari strategi pemeliharaan sistem isolasi. Dalam konteks penelitian ini, pemanasan periodik melalui *Periodic Start* berpotensi mengurangi dampak degradasi akibat fluktuasi termal dan waktu paparan, sehingga mampu memperlambat laju penurunan kualitas isolasi motor 6 kV selama *Reserve Shutdown*.

3. Jurnal yang ditulis oleh Stephen Lucas dan rekan-rekan berjudul "*Active Thermal Management of Electric Motors and Generators Using Thermoelectric (Peltier Effect) Technology*" membahas penerapan teknologi termoelektrik sebagai metode manajemen termal aktif pada motor dan generator listrik. Studi ini menunjukkan bahwa pengendalian temperatur yang efektif dapat meningkatkan efisiensi dan memperpanjang umur peralatan listrik dengan mengurangi stres termal pada sistem isolasi [11].

Meskipun pendekatan yang digunakan dalam penelitian tersebut berfokus pada pendinginan aktif menggunakan efek *Peltier*, kajian ini memberikan gambaran penting mengenai peran manajemen termal dalam menjaga keandalan motor listrik. Penelitian ini menegaskan bahwa kondisi termal belitan memiliki hubungan langsung dengan kestabilan sistem isolasi dan performa jangka panjang peralatan. Dalam konteks penelitian ini, teknologi termoelektrik tidak diterapkan secara langsung. Namun, penelitian tersebut digunakan sebagai pembandingan konseptual untuk menunjukkan bahwa pengendalian temperatur belitan, baik melalui pendinginan aktif maupun pemanasan terkendali, merupakan aspek krusial dalam strategi pemeliharaan motor. *Periodic Start* diposisikan sebagai metode manajemen termal alternatif yang lebih sederhana dan sesuai dengan kondisi operasional PLTU.

4. Jurnal yang ditulis oleh Liliana, Zulfatri Aini, Sepannur Bandri, dan Naufal Zaki Akbar membahas evaluasi dan perbaikan resistansi isolasi pada stator motor induksi melalui metode pemeliharaan korektif. Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan tindakan pemeliharaan yang tepat dapat meningkatkan nilai tahanan isolasi secara signifikan, sehingga memperbaiki kinerja dan memperpanjang umur motor induksi [13].

Hasil penelitian tersebut menegaskan bahwa nilai tahanan isolasi merupakan indikator utama dalam menentukan kelayakan operasi motor listrik. Peningkatan nilai IR setelah dilakukan tindakan pemeliharaan menunjukkan bahwa degradasi isolasi masih dapat dikendalikan apabila dilakukan intervensi teknis yang sesuai. Penelitian ini relevan dengan studi yang dilakukan karena menekankan pentingnya pemeliharaan sistem isolasi sebagai upaya menjaga keandalan motor. Namun, berbeda dengan pendekatan korektif, penelitian ini berfokus pada metode *preventive maintenance* melalui *Periodic Start*, yang bertujuan untuk mencegah penurunan kualitas isolasi sebelum diperlukan tindakan perbaikan yang lebih kompleks.

5. Jurnal yang ditulis oleh Fajar Pujiyanto berjudul "*Analisis Winding Insulation Pada Performa Induksi Motor Tiga Phase Berbasis Logika Fuzzy*" mengkaji penerapan metode logika fuzzy untuk mengevaluasi kondisi isolasi belitan motor induksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan fuzzy mampu memberikan

penilaian kondisi isolasi yang lebih adaptif dibandingkan metode konvensional berbasis ambang batas tunggal [16].

Pendekatan ini menunjukkan bahwa kondisi isolasi motor dipengaruhi oleh berbagai parameter yang saling berkaitan, seperti temperatur, kelembaban, dan nilai tahanan isolasi. Dengan mempertimbangkan banyak parameter sekaligus, metode evaluasi kondisi dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap kesehatan motor.

Meskipun penelitian ini tidak secara langsung diterapkan dalam metodologi penelitian ini, konsep bahwa kondisi isolasi dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan dan operasional mendukung penggunaan parameter IR, PI, suhu, dan kelembaban dalam penelitian ini. Hal tersebut memperkuat dasar pemilihan parameter pengukuran dalam evaluasi efektivitas *Periodic Start*.

6. Jurnal yang ditulis oleh Akmal Radiansyah dan Albert Gifson (TESLA, Vol. 21 No. 2, 2019) membahas inspeksi dan overhaul motor induksi tiga fasa berdaya besar sebagai bagian dari strategi pemeliharaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tindakan overhaul mampu meningkatkan efisiensi dan keandalan motor melalui perbaikan kondisi mekanis dan elektrik, termasuk sistem isolasi [17].

Studi ini menegaskan bahwa degradasi isolasi yang tidak terdeteksi sejak dini dapat berujung pada perlunya tindakan perawatan besar seperti *overhaul* atau *rewinding*. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan yang bersifat *preventif* menjadi sangat penting untuk menghindari downtime yang panjang dan biaya perawatan yang tinggi.

Dalam konteks penelitian ini, *Periodic Start* dipandang sebagai strategi pemeliharaan *preventif* yang bertujuan untuk menjaga kondisi isolasi motor tetap berada dalam batas layak operasi, sehingga kebutuhan akan tindakan pemeliharaan korektif berskala besar dapat diminimalkan. Dengan demikian, penelitian ini melengkapi kajian pemeliharaan motor yang telah ada dengan pendekatan yang lebih sederhana dan aplikatif dalam kondisi *Reserve Shutdown*.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Motor Listrik Tegangan Menengah di PLTU

Motor listrik tegangan menengah (6 kV) memiliki peran yang sangat penting dalam operasional pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Motor ini bukan hanya sekadar alat penggerak, tetapi juga menjadi tulang punggung bagi berbagai peralatan bantu yang krusial, seperti *Boiler Feed Pump* (APA), *Circulating Water Pump* (CRF), *Forced Draft Fan* (FCA), dan *Induced Draft Fan* (FTA). Keandalan motor 6 kV sangat menentukan kesiapan dan kontinuitas operasi unit pembangkit [8]. Sebagai contoh, jika salah satu motor mengalami kegagalan, maka dapat dipastikan bahwa proses pembangkitan listrik akan terganggu, yang berpotensi menyebabkan kerugian finansial yang signifikan terhadap unit pembangkit dan mengganggu pasokan listrik kepada konsumen. Hal ini menunjukkan betapa vitalnya peran motor listrik dalam menjaga stabilitas dan efisiensi operasi PLTU.

Selain sebagai penggerak utama Sistem, motor listrik tegangan menengah juga beroperasi pada kondisi lingkungan yang cukup kompleks, baik dari sisi temperatur, kelembaban, maupun beban kerja. Oleh karena itu, aspek keandalan motor tidak hanya ditentukan oleh desain mekanis dan elektrik, tetapi juga oleh kondisi sistem isolasi yang melindungi belitan motor dari gangguan listrik dan lingkungan.



Gambar 2. 1 Motor Listrik 6 KV PLTU UP Bukit Asam

2.2.2 Karakteristik Kelas Thermal sistem isolasi Motor 6 kV

Motor 6 kV umumnya menggunakan kelas isolasi F atau H. Batas kenaikan temperatur ditentukan oleh standar manufaktur dan referensi internasional. Kenaikan temperatur dihitung berdasarkan selisih antara temperatur winding dan temperatur lingkungan, Faktor lingkungan seperti temperatur ruang, kelembaban, sangat mempengaruhi performa motor, pada kondisi *reserve shutdown*, tidak adanya pemanasan internal dapat menyebabkan temperatur *winding* turun hingga mendekati temperatur lingkungan, sehingga risiko kondensasi dan penurunan tahanan isolasi meningkat.

Motor listrik tegangan menengah 6 kV pada umumnya dirancang menggunakan sistem isolasi dengan kelas thermal tertentu, yang menentukan batas maksimum temperatur operasi yang diizinkan pada belitan stator. Penetapan kelas thermal ini mengacu pada standar internasional seperti yang diterbitkan oleh IEEE.

Kelas isolasi menunjukkan kemampuan material isolasi untuk mempertahankan sifat dielektriknya pada temperatur maksimum tertentu dalam jangka waktu operasi yang dirancang. Motor tegangan menengah pada aplikasi pembangkit umumnya menggunakan kelas isolasi

Batas temperatur maksimum masing-masing kelas isolasi adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Penetapan Kelas Thermal sistem isolasi listrik motor 6 kV

ATE atau RTE (°C)	Kelas Thermal (°C)	Kode kelas
≥ 90 dan < 105	90	Y
≥ 105 dan < 120	105	A
≥ 120 dan < 130	120	E
≥ 130 dan < 155	130	B
≥ 155 dan < 180	155	F

ATE atau RTE (°C)	Kelas Thermal (°C)	Kode kelas
≥ 180 dan < 200	180	H
≥ 200 dan < 220	200	N
≥ 220 dan < 250	220	R

Pada kondisi *Reserve Shutdown*, motor berada dalam keadaan tidak beroperasi, yang membuat suhu belitan mendekati suhu lingkungan. Dalam kondisi ini, risiko kondensasi dan penyerapan kelembaban pada material isolasi menjadi meningkat. Ketika kelembaban terakumulasi, hal ini dapat menurunkan nilai tahanan isolasi motor, yang kedepannya dapat memicu kegagalan operasional. Misalnya, jika motor mengalami peningkatan kelembaban yang signifikan, maka isolasi dapat mengalami kerusakan yang lebih parah akibat arus bocor yang meningkat. Oleh karena itu, pemantauan dan pengelolaan kelembaban menjadi sangat penting dalam menjaga keandalan motor listrik di PLTU, Kondisi tersebut menjelaskan bahwa motor listrik pada masa tidak beroperasi justru menghadapi tantangan keandalan yang berbeda dibandingkan saat motor beroperasi normal. Dengan demikian, aspek pemeliharaan pada periode *Reserve Shutdown* perlu mendapat perhatian khusus dalam pengelolaan motor listrik.

2.2.3 Tahanan Isolasi dan Polarization Index

Tahanan isolasi (*Insulation Resistance / IR*) adalah nilai hambatan listrik dari material isolasi terhadap aliran arus bocor antara bagian bertegangan dan ground atau antar fasa, yang menunjukkan seberapa baik isolasi mampu menahan kebocoran arus listrik, Tahanan isolasi merupakan parameter utama yang digunakan untuk menilai kualitas sistem isolasi pada motor listrik tegangan menengah. Pengukuran IR dilakukan dengan memberikan tegangan searah (DC) pada belitan motor dan mengukur arus bocor yang mengalir melalui sistem isolasi. Nilai tahanan isolasi yang tinggi menunjukkan bahwa material isolasi masih mampu menahan medan listrik dengan baik, sedangkan nilai

IR yang rendah mengindikasikan adanya kelembaban, kontaminasi, atau degradasi material isolasi [3].

Dalam praktik industri, evaluasi nilai tahanan isolasi mengacu pada standar internasional yang telah teruji dan diterima secara luas. Salah satu standar yang paling banyak digunakan adalah IEEE Std 43-2013, yang secara khusus mengatur rekomendasi pengujian tahanan isolasi untuk mesin listrik berputar, termasuk motor listrik tegangan menengah. Standar ini dijadikan acuan utama karena memberikan batas minimum nilai IR yang jelas, metode pengujian yang terstandarisasi, serta interpretasi hasil pengukuran yang aplikatif untuk kondisi lapangan

Menurut IEEE Std 43-2013, batas minimum tahanan isolasi motor dapat dihitung dengan persamaan [5]:

$$R = \frac{kV+1}{1000} M\Omega \dots\dots\dots(2.1)$$

Rumus tersebut digunakan sebagai kriteria awal untuk menilai kelayakan sistem isolasi sebelum motor dioperasikan. Untuk motor listrik tegangan menengah, seperti motor 6 kV, standar ini menetapkan bahwa nilai tahanan isolasi harus berada jauh di atas batas minimum agar motor dinyatakan layak untuk dioperasikan. Oleh karena itu, IEEE Std 43-2013 menjadi referensi dalam penelitian ini karena relevansinya yang tinggi terhadap kondisi pengujian motor listrik di lingkungan PLTU.

Secara fisik, nilai tahanan isolasi merupakan hasil perbandingan antara tegangan DC yang diterapkan dan arus bocor yang mengalir pada sistem isolasi. Hubungan tersebut dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut:

$$IR = \frac{V_{DC}}{I_{Leak}} \dots\dots\dots(2.2)$$

di mana V_{DC} adalah tegangan uji DC yang diberikan dan I_{leak} adalah arus bocor yang terukur. Peningkatan arus bocor menandakan menurunnya kemampuan material isolasi dalam menahan medan listrik, yang umumnya disebabkan oleh kelembaban, kontaminasi permukaan, atau penuaan isolasi. Oleh karena itu, pemantauan nilai IR secara periodik menjadi langkah penting dalam menjaga keandalan motor listrik.

Pengujian IR menggunakan *insulation resistance tester (megger)*, nilai IR yang ditampilkan alat pada dasarnya merupakan hasil perhitungan berdasarkan hubungan tersebut, arus bocor yang meningkat menandakan bahwa kemampuan isolasi dalam menahan medan listrik mengalami penurunan, baik akibat kontaminasi, kelembaban, maupun penuaan material isolasi.

Selain IR, *Polarization Index (PI)* juga digunakan untuk mengevaluasi kualitas isolasi dalam jangka waktu lebih lama. *Polarization Index (PI)* adalah rasio perbandingan antara nilai tahanan isolasi pada menit ke-10 terhadap nilai tahanan isolasi pada menit ke-1 saat dilakukan pengujian dengan tegangan DC, yang digunakan untuk menilai kualitas dan kondisi kebersihan serta kekeringan isolasi pada peralatan listrik seperti motor atau generator, secara matematis dinyatakan sebagai :

Menurut IEEE Std 43-2013, nilai PI dihitung menggunakan Persamaan:

$$PI = \frac{IR_{10}}{IR_1} \dots\dots\dots(2.3)$$

Berdasarkan kelas Thermalnya untuk motor dengan Class Thermal F yang memiliki Nilai $PI \geq 2$ menunjukkan isolasi masih baik, sedangkan $PI < 2$ menandakan isolasi mengalami kelemahan [6]. Standar ini merujuk pada IEEE Std 43-2013, yang juga menetapkan batas minimum tahanan isolasi berdasarkan tegangan nominal [5],

Tabel 2. 2 Nilai PI minimum yang direkendasisan sesuai kelas Thermal

Kelas Thermal	Minimum PI
Kelas A	1,5
Kelas B	2.0
Kelas F	2.0
Kelas H	2.0

Pengujian IR dan PI telah banyak diterapkan dalam praktik industri sebagai dasar penentuan kelayakan operasi motor sebelum dan sesudah dilakukan tindakan pemeliharaan. Studi pemeliharaan motor induksi berkapasitas besar menunjukkan bahwa

peningkatan nilai IR dan PI setelah tindakan perawatan menjadi indikator bahwa sistem isolasi telah kembali berada dalam kondisi layak operasi sesuai standar yang berlaku [17], [18].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini menggunakan IEEE Std 43-2013 sebagai acuan utama dan Standar Operasi Di PLTU UP Aukit Asam sebagai kebijakan lanjutan dalam mengevaluasi nilai tahanan isolasi dan *Polarization Index* motor listrik 6 kV. Penggunaan standar ini memberikan dasar yang kuat dan objektif dalam menilai efektivitas metode *Periodic Start* sebagai strategi pemeliharaan untuk menjaga kualitas isolasi motor selama kondisi *Reserve Shutdown*.

Pengujian tahanan isolasi dan indeks polarisasi juga telah diterapkan pada motor induksi tegangan menengah di lingkungan pembangkit listrik sebagai bagian dari evaluasi kondisi isolasi. Studi pada motor induksi tiga fasa 6 kV sistem *Circulating Water Pump* di PLTGU menunjukkan bahwa pengukuran nilai IR pada menit awal hingga menit ke-10 dapat digunakan untuk menghitung indeks polarisasi sebagai indikator kesehatan isolasi. Nilai PI yang diperoleh mencerminkan kondisi material isolasi terhadap pengaruh kelembaban dan kontaminasi, sehingga parameter IR dan PI dinilai efektif untuk menilai keandalan isolasi motor dalam mendukung strategi pemeliharaan preventif berbasis standar IEEE [19].

Selain digunakan sebagai parameter kelayakan sebelum pengoperasian motor, nilai tahanan isolasi dan *Polarization Index* juga mencerminkan kondisi fisik dan kimia material isolasi dalam merespons pengaruh lingkungan dan waktu paparan. Perubahan nilai IR yang terjadi bukan hanya bersifat sesaat, tetapi dapat menunjukkan kecenderungan degradasi isolasi apabila diikuti oleh penurunan nilai PI secara konsisten. Hal ini menandakan bahwa sistem isolasi tidak hanya terpengaruh oleh kontaminasi permukaan, tetapi juga oleh kemampuan material isolasi dalam menyimpan dan melepaskan muatan listrik selama proses pengujian.

Dengan demikian, pengukuran IR dan PI tidak dapat dipandang sebagai parameter yang berdiri sendiri, melainkan sebagai indikator yang saling melengkapi dalam mengevaluasi kesehatan sistem isolasi motor listrik. Nilai IR yang tinggi namun diikuti

oleh PI yang rendah dapat mengindikasikan adanya kelembaban atau polarisasi yang tidak stabil pada material isolasi. Oleh karena itu, interpretasi hasil pengujian IR dan PI harus dilakukan secara bersamaan untuk memperoleh gambaran kondisi isolasi motor secara lebih komprehensif.

2.2.4 Pengaruh Kelembaban dan Temperatur

Faktor lingkungan, khususnya kelembaban dan suhu, sangat memengaruhi nilai tahanan isolasi [7]. Pada kelembaban tinggi, uap air dapat menempel pada permukaan isolasi, meningkatkan arus bocor, dan menurunkan nilai IR [19]. Ketika motor *idle*, suhu belitan cenderung mendekati suhu lingkungan. Jika turun di bawah titik embun (*dew point*), maka kondensasi akan terjadi pada permukaan isolasi [11]. Kondisi inilah yang menjelaskan mengapa motor pada kondisi RSH sangat rentan mengalami penurunan IR.

Kondisi tersebut mempertegas bahwa perubahan nilai tahanan isolasi pada motor listrik selama periode *Reserve Shutdown* sangat dipengaruhi oleh kondisi termal dan kelembaban lingkungan sekitar belitan. Pada kondisi *idle*, tidak adanya pemanasan internal menyebabkan sistem isolasi menjadi lebih sensitif terhadap fluktuasi lingkungan, sehingga penurunan nilai IR dapat terjadi meskipun tidak terdapat kerusakan fisik pada material isolasi.

Fenomena ini menunjukkan bahwa walaupun motor tidak sedang beroperasi, kondisi lingkungan tetap memberikan pengaruh signifikan terhadap kualitas sistem isolasi. Oleh karena itu, pengendalian faktor lingkungan perlu dipertimbangkan dalam pemeliharaan motor listrik. Kelembaban lingkungan yang tinggi menyebabkan molekul uap air lebih mudah teradsorpsi pada permukaan material isolasi, terutama pada bagian belitan stator yang memiliki luas permukaan relatif besar. Lapisan tipis air yang terbentuk ini dapat bersifat konduktif, sehingga memperbesar kemungkinan terjadinya arus bocor pada sistem isolasi. Dalam jangka waktu tertentu, kondisi tersebut dapat mempercepat penurunan nilai tahanan isolasi meskipun tidak terjadi kerusakan fisik secara langsung pada material isolasi.

Selain kelembaban, temperatur lingkungan juga berperan penting dalam menentukan stabilitas kondisi isolasi. Perubahan temperatur yang terjadi secara perlahan

maupun mendadak dapat memengaruhi keseimbangan termal pada belitan motor. Pada saat motor berada dalam kondisi *idle*, tidak adanya pemanasan internal dari arus listrik menyebabkan suhu belitan sangat bergantung pada kondisi lingkungan sekitarnya. Hal ini meningkatkan potensi terjadinya fluktuasi suhu yang dapat memicu proses kondensasi ketika temperatur belitan melewati titik embun.

Kondensasi yang terjadi secara berulang tidak hanya menurunkan nilai IR secara sementara, tetapi juga dapat memicu degradasi isolasi dalam jangka panjang apabila kondisi tersebut berlangsung terus-menerus. Selain meningkatkan arus bocor, keberadaan kelembapan juga dapat mempercepat proses penuaan isolasi akibat interaksi antara air, kontaminan, dan medan listrik pada belitan motor. Oleh karena itu, pemahaman mengenai pengaruh kelembapan dan temperatur menjadi dasar penting dalam menyusun strategi pemeliharaan motor listrik, khususnya pada kondisi *Reserve Shutdown*.

Kondisi pengaruh lingkungan terhadap kualitas isolasi motor tersebut juga telah dibuktikan melalui studi lapangan. Penelitian pada motor *Condensate Extraction Pump* (CEP) di PT. PLN Indonesia Power Grati PGU menunjukkan bahwa fluktuasi temperatur lingkungan selama periode pengujian dapat memengaruhi tren kenaikan dan penurunan nilai tahanan isolasi, serta berpengaruh terhadap nilai indeks polaritas dan laju degradasi isolasi per jam operasi. Hasil tersebut menegaskan bahwa variasi kondisi lingkungan dan waktu operasi memiliki kontribusi nyata terhadap stabilitas sistem isolasi motor listrik [4]

Paparan suhu tinggi dalam jangka waktu tertentu diketahui memberikan pengaruh terhadap kualitas sistem isolasi mesin listrik. Studi pada stator generator Unit 2 PLTU Asam Asam menunjukkan bahwa peningkatan suhu operasi hingga lebih dari 100 °C menyebabkan penurunan nilai tahanan isolasi dan indeks polarisasi, meskipun nilai tersebut masih berada dalam batas standar yang direkomendasikan. Penurunan nilai isolasi ini juga diikuti oleh peningkatan nilai *tan delta*, yang mengindikasikan adanya kecenderungan degradasi isolasi akibat pengaruh termal. Hasil tersebut menegaskan bahwa temperatur merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kondisi isolasi dan perlu diperhatikan dalam strategi pemeliharaan *preventif* mesin listrik di lingkungan pembangkit listrik tenaga uap [20].

2.2.5 Rencana Pola Pemanasan

Selain kelembaban, sistem isolasi motor juga terpengaruh oleh proses *aging*. Faktor panas, tegangan listrik, kontaminasi partikel, serta getaran mekanis berkontribusi pada penurunan kualitas dielektrik isolasi. *Aging* mempercepat penurunan IR dan dapat menyebabkan kegagalan start [13], Penelitian terbaru juga mengusulkan metode analisis berbasis logika fuzzy untuk mengevaluasi kondisi belitan motor, sehingga dapat memperkirakan degradasi isolasi dengan lebih akurat [16], berdasarkan kondisi tersebut, pembahasan mengenai pola pemanasan menjadi relevan untuk dikaji pada sistem isolasi motor.

Proses *aging* pada sistem isolasi motor berlangsung secara bertahap dan umumnya tidak langsung terlihat dalam waktu singkat. Namun demikian, kombinasi antara faktor termal, lingkungan, dan kondisi operasi dapat mempercepat laju degradasi isolasi, khususnya ketika motor berada dalam kondisi tidak beroperasi dalam jangka waktu yang lama. Pada kondisi tersebut, motor tidak mendapatkan pemanasan internal dari arus beban, sehingga suhu belitan cenderung mengikuti suhu lingkungan sekitar.

Kondisi temperatur belitan yang rendah dan fluktuatif dapat mempercepat akumulasi kelembaban pada material isolasi, yang selanjutnya berkontribusi terhadap peningkatan arus bocor dan penurunan nilai tahanan isolasi. Selain itu, siklus pendinginan dan pemanasan yang tidak terkontrol juga dapat memicu tegangan mekanis pada material isolasi, yang dalam jangka panjang berpotensi mempercepat proses *aging*.

Oleh karena itu, pola pemanasan yang terencana dan terkendali menjadi salah satu pendekatan yang dapat dibahas dalam upaya menjaga kestabilan kondisi isolasi motor. Pola pemanasan tidak hanya dipandang sebagai metode untuk meningkatkan suhu belitan, tetapi juga sebagai bagian dari strategi pemeliharaan yang bertujuan untuk memperlambat laju degradasi isolasi selama periode *idle*.

Dalam konteks ini, rencana pola pemanasan perlu mempertimbangkan karakteristik motor, kondisi lingkungan operasi, serta durasi motor berada dalam kondisi tidak beroperasi. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, pembahasan mengenai pola pemanasan menjadi bagian penting dalam kerangka pemeliharaan sistem

isolasi motor listrik, khususnya pada motor tegangan menengah yang beroperasi di lingkungan pembangkit listrik.

2.2.6 Strategi Pemanasan Motor

Untuk mengatasi kelembaban, metode konvensional adalah menggunakan *heater* [10]. *Heater* berfungsi untuk menjaga suhu motor tetap di atas suhu lingkungan, sehingga kondensasi tidak terjadi. Namun, pada motor besar seperti yang beroperasi pada tegangan 6 kV, penggunaan *heater* sering kali kurang efektif [11]. Distribusi panas yang tidak merata dan kebutuhan energi tambahan yang besar menjadi beberapa keterbatasan dari metode ini, selain itu, pemasangan dan pemeliharaan heater pada motor berkapasitas besar juga memerlukan perhatian khusus agar tidak menimbulkan masalah baru, seperti titik panas lokal atau peningkatan konsumsi energi yang berlebihan.

Oleh karena itu, pencarian metode pemanasan alternatif yang mampu memanaskan belitan motor secara lebih merata dan efisien menjadi sangat penting. Inovasi dalam teknologi pemanasan dapat membantu mengatasi masalah kelembaban dengan cara yang lebih efektif dan berkelanjutan

2.2.7 Periodic start Sebagai Alternatif

Periodic Start merupakan strategi pemeliharaan motor listrik dengan cara menjalankan motor pada interval waktu tertentu selama periode *shutdown* atau *idle*. Tujuan utama dari metode ini adalah menghasilkan pemanasan internal pada belitan stator melalui aliran arus listrik, sehingga temperatur belitan meningkat dan mampu menekan terjadinya akumulasi kelembaban pada material isolasi. Pendekatan pengendalian kondisi termal ini relevan karena kelembaban lingkungan dan kondisi suhu diketahui berpengaruh terhadap penurunan kualitas sistem isolasi mesin listrik [12].

Pada saat motor dilakukan *starting* dan dijalankan dalam kondisi tanpa beban penuh, arus listrik yang mengalir pada belitan stator menghasilkan rugi-rugi tembaga yang berkontribusi terhadap peningkatan temperatur belitan. Peningkatan temperatur tersebut membantu menurunkan kelembaban relatif di sekitar permukaan isolasi dan mengurangi risiko terjadinya kondensasi, sehingga nilai tahanan isolasi motor dapat dipertahankan pada kondisi yang lebih stabil. Hubungan antara tindakan pemeliharaan

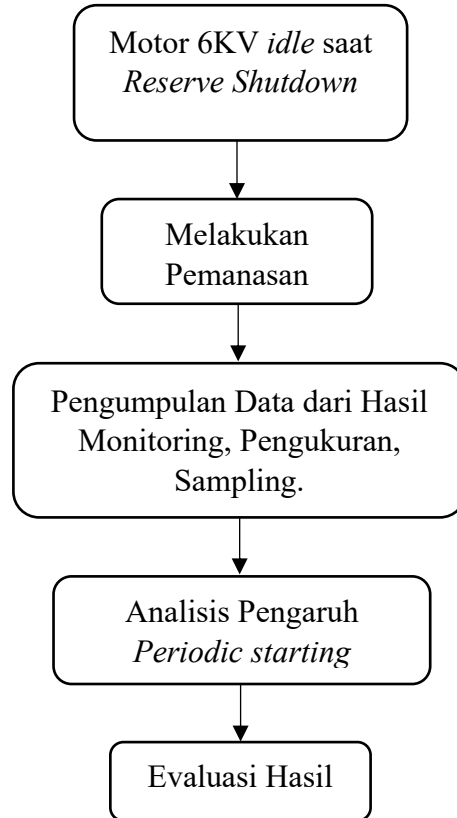
dan perbaikan kondisi isolasi motor telah ditunjukkan melalui peningkatan nilai tahanan isolasi setelah dilakukan perlakuan pemeliharaan tertentu [13].

Dibandingkan dengan penggunaan pemanas eksternal seperti *heater*, *Periodic Start* bekerja dengan mekanisme pemanasan yang berbeda. Pemanasan melalui *Periodic Start* terjadi secara langsung pada belitan stator sebagai sumber panas utama, sedangkan pemanas eksternal umumnya berfungsi sebagai pemanasan tambahan dari luar motor. Secara teknis, pemanasan internal pada belitan berpotensi menghasilkan distribusi panas yang lebih efektif pada kumparan stator, khususnya pada motor listrik berkapasitas besar dan bertipe tertutup. Pendekatan ini selaras dengan konsep manajemen termal pada mesin listrik, di mana pengendalian temperatur belitan berperan penting dalam menekan laju degradasi isolasi akibat pengaruh lingkungan dan waktu paparan termal [15].

Selain sebagai metode pemanasan, *Periodic Start* juga memberikan manfaat tambahan sebagai *functional test* terhadap kesiapan motor listrik. Dengan menjalankan motor secara berkala, potensi permasalahan awal seperti gangguan mekanis, abnormalitas listrik, maupun respon sistem proteksi dapat teridentifikasi lebih dini sebelum motor benar-benar dibutuhkan untuk operasi.

Dalam konteks operasional PLTU, *Periodic Start* merupakan metode yang relatif mudah diterapkan karena memanfaatkan peralatan yang telah tersedia tanpa memerlukan penambahan sistem khusus. Selama kondisi *Reserve Shutdown*, pelaksanaan *Periodic Start* dapat menjadi bagian dari strategi *preventive maintenance* untuk menjaga keandalan motor listrik tegangan menengah, terutama dalam upaya mempertahankan kualitas sistem isolasi [13], [15].

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 2 Kerangka Pemikiran

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, sebelum dimulainya pengujian *Periodic start*, diperlukan persiapan pengujian *Periodic start*. Pada proses persiapan ini terdiri dari mempersiapkan alat yang akan dibutuhkan, serta bekerja melakukan instruksi dan pola kerja sesuai langkah-langkah SOP yang berlaku. Setelah segala persiapan tersebut, penulis dapat melaksanakan pengujian *Periodik start*, yang setelah dilakukannya pengujian tersebut maka tentunya akan mendapatkan data, data tersebut akan diolah oleh penulis yang tahap berikutnya akan di analisis, sehingga penulis dapat memahami hasil dari pemanasan motor 6 kV berbasis *Periodic start* terhadap keandalan dan kesiapan Motor 6 kV.