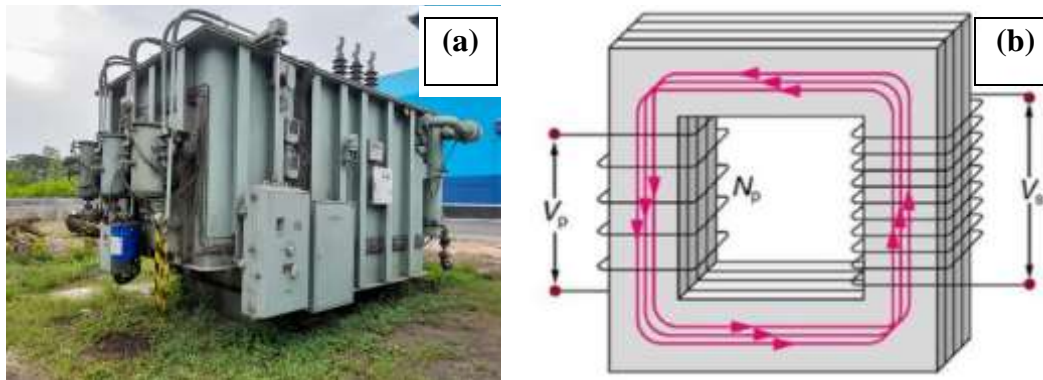


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Transformator Daya

Transformator daya merupakan aset listrik statis yang difungsikan untuk memindahkan daya dari satu rangkaian ke rangkaian lain dengan frekuensi tidak berubah, namun merubah level tegangannya [16]. Fungsional trafo secara maksimal dilakukan secara kontinyu yang mengidentitaskan transformator sebagai pusat penyaluran sistem transmisi dan distribusi. Wujud dan ilustrasi prinsip kerja transformator daya ditunjukkan pada Gambar 2.1 di bawah,



Gambar 2. 1 Transformator Daya (a) Wujud dan (b) Prinsip Kerja [17]

Wujud transformator pada umumnya ditunjukkan pada Gambar 2.1 (a) memiliki prinsip kerja yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 (b) menunjukkan induktansi timbal balik yang disebabkan terdapat perbedaan tingkatan nilai pada sisi primer terhadap sisi sekunder yang dibentuk oleh *fluks* magnetik kedua rangkaian yang tinggi dan melalui jalur reluktansi rendah yang ditunjukkan pada garis panah berwarna merah muda [17]. Jika suatu kumparan disambungkan pada suatu sumber tegangan bolak balik, suatu fluks bolak balik terjadi di dalam inti berlaminasi, yang sebagian besar akan mengait pada kumparan lainnya, dan di dalamnya akan terinduksi suatu gaya gerak listrik (GGL) [18].

2.2. Umur Transformator

Umur transformator perlu diperkirakan untuk menjaga kehandalan aset. Transformator dikatakan handal ketika dapat mempertahankan proses operasinya

dari efek kegagalan transformator. Fenomena kegagalan biasa disebabkan kecacatan historis seperti cacat produksi, kondisi operasional yang tidak memadai, pemeliharaan yang kurang baik, dan kombisi tekanan operasional seperti, kegagalan bersifat *elektrik*, *mekanik*, dan *thermal* [19]. Persentase kegagalan transformator per subpopulasi komponen dapat dihitung dengan Persamaan (2.1).

$$\%TF = \frac{NF}{Tnf} \times 100\% \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) menghasilkan keluaran kalkulasi berupa persentase kegagalan transformator per subpopulasi yang ditentukan dari perbandingan nilai jumlah rata-rata kegagalan transformator dalam suatu periode waktu terhadap total kegagalan dalam periode waktu yang sama ce.

Suatu penelitian mengaplikasikan Persamaan (2.1) menunjukkan 343 kegagalan transformator pada tahun 2010 sampai dengan 2018 menunjukkan persentase kegagalan pada Gambar 2.2 di bawah,



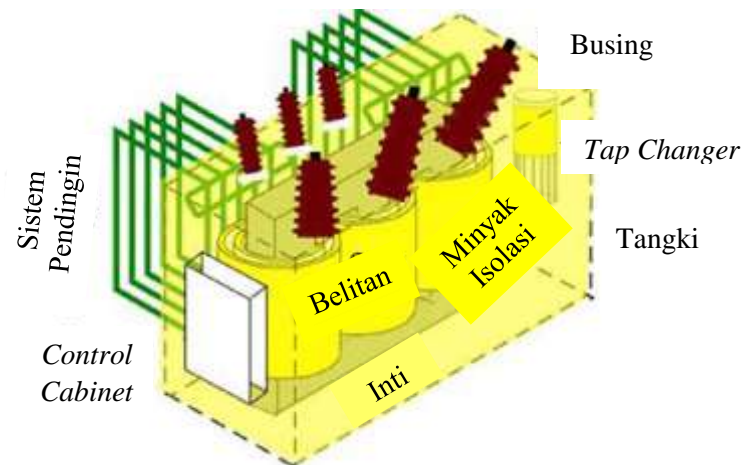
Gambar 2. 2 Persentase Temuan Kegagalan Transformator [19]

Pada Gambar 2.2 menunjukkan persentase kegagalan transformator terbesar berada pada bagian isolasi sebesar 36,74 persen, diikuti oleh belitan sebesar 21,30 persen, busing sebesar 15,70 persen, *On Load Tap Changer* sebesar 12,01 persen, inti sebesar 4,37 persen, sistem pendingin sebesar 3,79 persen, tangki konservator sebesar 3,50 persen, dan kegagalan lainnya sebesar 2,60 persen. Setiap komponen tersebut membentuk karakteristik elektrik, mekanik, termal, dan kimia. Karakteristik setiap komponen memiliki fenomena-fenomena tersendiri seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1 di bawah,

Tabel 2.1 Fenomena dan Karakteristik Kegagalan Komponen Transformator[19]

Komponen	Karakteristik	Fenomena
Belitan	Elektrik	1. Hubung singkat antara fasa 2. Hubung singkat antara sisi primer dan sekunder. 3. Hubung singkat fasa terhadap <i>grounding</i>
	Termal	1. Beban berlebih 2. Kegagalan sistem pendingin 3. Arcing 4. Munculnya bunga api 5. <i>Partial Discharge</i> 6. Kenaikan temperatur pada material belitan 7. <i>Hot Spot</i>
	Mekanik	1. Terjadi kemiringan pada konduktor 2. Terjadinya perubahan bentuk konduktor 3. Perubahan posisi belitan. 4. Penjepit belitan longgar 5. Belitan mengalami lekukan
Inti	Elektrik	1. Hubung singkat laminasi inti 2. Inti terpisah dengan <i>grounding</i>
	Mekanik	1. Deformasi Inti
Bushing	Elektrik	1. Hubung arus singkat pada lapisan
	Termal	1. Beban berlebih pada jaringan 2. Munculnya bunga api 3. <i>Partial Discharge</i> 4. Kenaikan temperatur pada material belitan 5. <i>Hot Spot</i>
	Mekanik	Bushing retak atau pecah
OLTC	Electrik	<i>Open Circuit</i> pada kontak
	Termal	<i>Coking</i> pada kontak
	Mekanik	1. Kesalahan mekanik pergantian tap.
Isolasi (Minyak dan Kertas)	Kimia	1. Kadar air pada minyak 2. Kadar air pada kertas 3. Temperatur tinggi pada minyak dan kertas 4. Penuaan kertas dan minyak karena dekomposisi termal 5. Kontaminasi kelembaban
<i>Cooling System</i>	Electrik/ Mekanik	1. Pompa pendingin 2. Kipas Pendingin 3. Radiator
<i>Tank</i>	Mekanik/ Termal	1. Kebocoran 2. Korosi
<i>Others</i>	Penyebab tidak dapat diidentifikasi	1. <i>Operation Error</i> 2. Kurangnya pemeliharaan 3. Kegagalan sistem Proteksi

Tabel 2.1 menunjukkan secara umum setiap komponen memiliki karakteristik kegagalan yang sama terhadap jenis fenomena yang bervariasi. Hal ini disebabkan Komponen-komponen transformator memiliki fungsi dan konstruksi yang berbeda-beda. Konstruksi transformator ditunjukkan seperti gambar 2.3.



Gambar 2.3 Komponen Transformator Berdasarkan Peluang Kegagalan [19]

Gambar 2.3 menunjukkan konstruksi transformator berdasarkan peluang kegagalan. Komponen utama transformator berupa inti besi, kumparan, isolasi minyak transformator, isolasi kertas, busing, dan tangki. Komponen pendukung berupa sistem pendingin dan *tap changer*.

2.3. Komponen Berdasarkan Kegagalan Transformator

Kegagalan isolasi beserta fenomena dan karakteristik yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 memiliki pemicu kegagalan tersendiri disetiap komponen. Berikut pemicu kegagalan disetiap komponen transformator:

1. Kegagalan isolasi

Fenomena kegagalan kadar air pada isolasi minyak dan kertas dapat dipicu secara historis seperti, saat perakitan pabrik, kegagalan alat pernapasan (*silica gel*) dalam menyerap air, proses perawatan, dan kelembaban minyak melalui proses oksidasi internal atau secara eksternal. Degradasi termal pada isolasi minyak dan kertas dapat dipicu oleh defisiensi sistem pendinginan, beban berlebih, dan inti besi terlalu panas. Laju penuaan kertas dan minyak dapat dipercepat oleh gangguan internal dan eksternal seperti hubung singkat, arus lonjakan, kelebihan beban dan penggunaan transformator secara terus menerus [20].

2. Kegagalan busing

Busing adalah struktur isolasi yang mendukung jalur konduktor antara transformator dengan setiap sisi masukan maupun keluaran transformator. Fenomena hubung singkat dan ekspansi termal secara umum disebabkan kelebihan

beban, tekanan termal, lonjakan transien. Sedangkan, fenomena kegagalan karena kerusakan porselen disebabkan permasalahan eksternal seperti sambaran petir dan gaya hubung singkat eksternal [21].

3. Kegagalan tangki

Tangki transformator merupakan penampung minyak isolasi dan struktur pendukung untuk komponen transformator lainnya. Pecahnya material dalam tangki disebabkan tekanan yang tinggi kandungan gas yang bersifat thermal pada minyak. Sedangkan, kebocoran tangki biasanya disebabkan terdapat korosi bahan tangki, retakan dinding tangki.

4. Kegagalan inti

Inti sebagai pembawa fluks magnet yang secara elektrik dilaminasi dan digabungkan secara magnetik dengan isolasi kertas untuk mengurangi rugi-rugi elektrik. Fenomena hubung singkat pada laminasi inti disebabkan kerusakan laminasi inti [22].

5. Kegagalan sistem pendingin

Sistem pendingin sebagai komponen yang berfungsi untuk mengurangi panas transformator yang secara paksa memanfaatkan pompa dalam proses sirkulasi memiliki pemicu kegagalan berupa kerusakan pada komponen sistem pendingin itu sendiri [23].

6. Kegagalan *Oil Level Tap Changer* (OLTC)

OLTC memiliki fungsi untuk mengatur tegangan keluaran sebuah trafo. Fenomena kegagalan OLTC secara umum disebabkan oleh hubung singkat internal, instalasi kontak yang kurang baik, dan penuaan pada kontak selektor.

7. Kegagalan lainnya

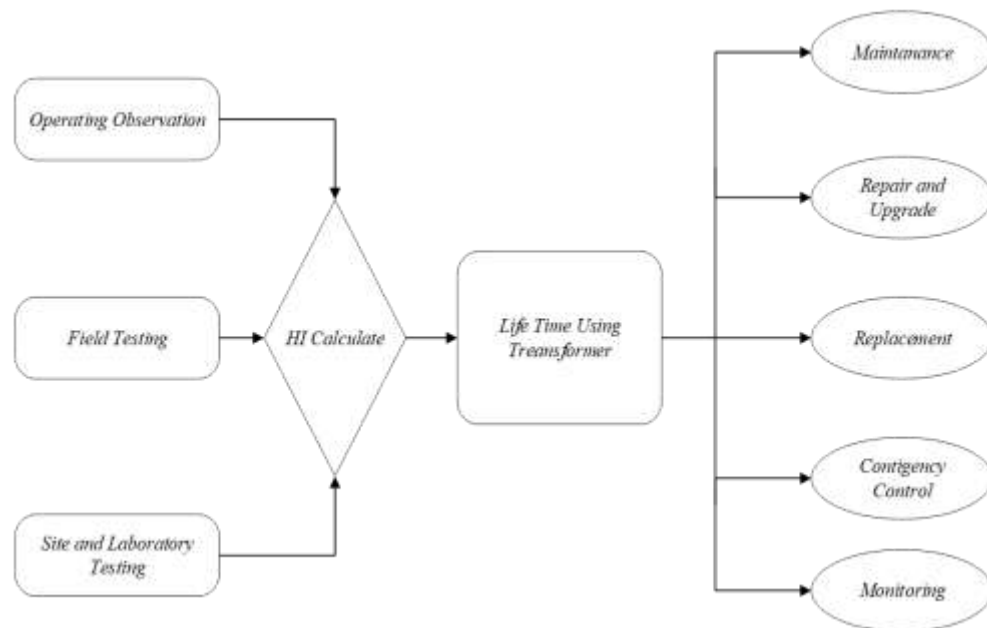
Kegagalan lainnya secara umum disebabkan kesalahan pemantauan dan operasional, kualitas pemeliharaan yang buruk, penurunan kualitas sistem proteksi, serta gangguan dari faktor eksternal seperti sambaran petir dan gangguan makhluk ekosistem sekitar.

2.4. *Health Index*

Health Index (HI) termasuk dalam metode pengukuran sisa umur transformator yang terdiri dari beberapa macam indikator penilaian kesehatan aset.

Proses hasil keluaran metode HI memanfaatkan kombinasi indeks kesehatan yang bersifat objektif dan kuantitatif pada hasil observasi, inspeksi lapangan, pengujian dan histori. Ketiga parameter diberi bobot berdasarkan pengaruh terhadap probabilitas kegagalan transformator [19].

Konsep HI memiliki tiga entitas yaitu masukan berupa pengumpulan data, persamaan matematika, dan keluaran HI berupa sisa umur transformator seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Konsep Pendekatan Metode HI [24]

Gambar 2.4 menunjukkan pada hasil konsep pendekatan metode HI memiliki peran penting dalam pemantauan kondisi dan kesehatan transformator terutama identifikasi berkelanjutan dalam penentuan kondisi pada bagian abnormal. Hasil akhir metode ini berupa informasi utilitas dalam segala aspek terutama keputusan pemeliharaan selanjutnya seperti, transformasi diperbaiki, diperbarui, diganti atau terus beroperasi.

Penilaian yang dipilih untuk mengidentifikasi hasil metode HI diklasifikasikan menjadi dua wujud nilai mutu yaitu huruf mutu dan angka mutu. Nilai mutu dalam wujud alfabet (A, B, C, dan D) dijadikan sebagai predikat kondisi kesehatan transformator sedangkan, angka mutu untuk rekognisi masukan kalkulasi HI dari angka mutu dalam wujud angka (1, 2, 3, dan 4) yang dicapai pada setiap parameter [24]. Tingkatan penilaian mutu HI ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Tingkatan Penilaian Mutu HI [24]

Angka Mutu	Huruf Mutu	Keterangan
4	A	<i>Healthy</i>
3	B	<i>Sub-Healthy</i>
2	C	<i>Minor Defect</i>
1	D	<i>Critical Defect</i>

Tabel 2.2 menunjukkan predikat nilai mutu HI memiliki tingkatan berbeda yang ditunjukkan pada kisaran nilai dari 0 sampai dengan 4. Semakin besar nilai mutu menunjukkan status kesehatan transformator semakin baik. Tingkatan pada kondisi setiap nilai mutu berdasarkan kesehatan yang berbeda dalam ruang lingkup kinerja fungsional, ketahanan risiko, dan adaptasi lingkungan. Fungsional mengacu pada atribut peralatan/jaringan distribusi dalam memenuhi kebutuhan operasi dan evaluasi jaringan listrik.

Keterangan *healthy* diindikasikan dengan angka mutu senilai empat dan huruf mutu A. Keterangan kondisi ini menunjukkan bahwa trafo dapat terus menjalankan fungsional tanpa hambatan dalam waktu dan kondisi yang ditentukan. Kondisi ini diindikasikan dengan hasil parameter memenuhi standar dan ketahanan risiko yang kuat.

Keterangan *sub-healthy* diindikasikan dengan angka mutu senilai tiga dan huruf mutu B. Keterangan kondisi ini menunjukkan bahwa trafo dapat menjalankan fungsional dalam waktu yang ditentukan namun berada di bawah kondisi yang ditentukan. Kondisi ini diindikasikan dengan hasil parameter yang memenuhi standar, beberapa kuantitas hasil pada parameter mendekati nilai batas standar dan ketahanan risiko tidak lebih kuat dibanding kondisi *healthy*.

Keterangan *minor defect* diindikasikan dengan angka mutu senilai dua dan huruf mutu C. Keterangan kondisi ini menunjukkan trafo dapat menjalankan fungsional dalam waktu yang ditentukan, namun, di bawah kondisi yang ditentukan. Indikasi pembeda dibanding kondisi yang lain pada penurunan kinerja yang terjadi, kuantitas hasil pada parameter melampaui batas toleransi standar, dan ketahanan risiko cenderung lemah.

Keterangan *critical defect* diindikasikan dengan angka mutu senilai satu dan huruf mutu D menunjukkan trafo tidak dapat menjalankan fungsional dalam waktu maupun kondisi. Kondisi ini mengindikasikan berupa kinerja yang tidak dapat berjalan dan kuantitas hasil pada parameter mendekati bahkan sama sekali tidak

diketahui. Ketahanan risiko yang terbentuk memiliki tingkat dampak komperhensif yang sangat besar.

2.4.1. Pendekatan HI

Pendekatan yang dipilih pada penelitian ini menjadikan variasi model variabel pada observasi lapangan berdasarkan dua faktor. Faktor historis maupun kondisi terdiri dari parameter-parameter terikat yang ditunjukkan pada Tabel 2.3 [25].

Tabel 2.3 Tabulasi Nilai HI Transformator [25]

	Faktor	Bobot
Historis	Durasi Waktu Operasi	4
	Pembebanan	3
	Intensitas Inspeksi Rutin	4
	Temuan Abnormal	4
	Lokasi	1
	Manufacture	2
	Total	18
Kondisi	Pengujian Tegangan Tembus	3
	Pengujian <i>Water Content</i>	3
	Pengujian <i>Polarity Index</i>	2
	Pengujian Resistansi Belitan	2
	Pengujian Perbandingan Belitan	2
	Pengujian Tan Delta	3
	Pengujian Gas Terlarut	3
	Total	18

Tabel 2.3 merupakan transkripsi nilai HI dengan rancangan jumlah total bobot yang sama besar. Total bobot terhitung akan terdistribusi dengan skor dari setiap parameter untuk penentuan nilai akhir HI menggunakan Persamaan (2.2) [25].

$$HI = (0,4 \times NH) + (0,6 \times NK) \quad (2.2)$$

Persamaan (2.2) dengan total bobot setiap faktor sama besar memiliki koefisien dalam bentuk persentase berbeda. Nilai akhir faktor historis (NH) dengan koefisien persentase 40 persen lebih kecil dibandingkan nilai akhir faktor kondisi (NK) sebesar 60 persen. Penentuan besar nilai koefisien persentase dipengaruhi oleh pengaruh presisi penilaian yang dihasilkan setiap parameter terhadap peluang resiko kesehatan transformator. Klasifikasi faktor penilaian HI terbagi menjadi dua

berdasarkan runtutan tujuan perancangan metode HI yang memuat faktor historis dan kondisi.

2.4.2. Faktor Historis

Faktor historis dirancang untuk memberikan ruang bagi penilaian objektif para ahli yang mengarahkan kepada keamatan pengaruh historis aset untuk menjadi penilaian HI. Pada aktualisasi penilaian ini dapat dijumpai pada edaran PT PLN (Persero) No:0017.E/DIR/2014 yang menjelaskan metode pemeliharaan trafo berbasis manajemen aset untuk ruang lingkup nasional dan internasional dapat dijumpai pada penilaian jurnal IEEE 978-1-4799-0545-4/13/2019 mengenai *risk assessment for power transformers in PEA substations using health index*.

Faktor historis merupakan aspek penting yang dapat digunakan untuk menggambarkan kinerja transformator dan karena itu perkiraan kegagalan transformator. Dari kedua penilaian objektif ini terdapat 6 indikator yang dapat dijadikan parameter penilaian faktor ini ditunjukkan pada Tabel 2.4. [26],

Tabel 2.4 Teknik dan Nilai Mutu Parameter Faktor Historis

Parameter Historis	Nilai Mutu (Huruf)			
	A	B	C	D
Usia (Tahun)	0 s.d. 3	4 s.d. 10	11 s.d. 20	> 20
Pembebanan (%)	< 30	30 s.d. 50	51 s.d. 70	> 70
Inspeksi Pemeliharaan	≤ 12	-	> 12	-
Temuan Abnormal	0	1	2	>2
Lokasi	-	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3
Asal Manufacture	-	Eropa	Asia	-

Parameter yang ditunjukkan Tabel 2.4 memiliki peran penting dalam menggambarkan kondisi serta gangguan transformator. Parameter di atas memiliki peran sebagai berikut:

1. Usia transformator terhitung sejak waktu awal transformator beroperasi. Transformator daya memiliki masa pakai handal sekitar 20 sampai dengan 35 tahun. Parameter ini terukur meninjau *timeline* pembuatan berdasarkan perkembangan teknologi dari suatu zaman tertentu dan aspek penurunan

kehandalan trafo berdasarkan kondisi durasi waktu tahunan. Parameter ini tercatat dari saat transformator beroperasi secara normal sampai waktu pengambilan data penelitian. Parameter ini memiliki bobot empat dan memiliki empat kriteria penilaian mutu berdasarkan data umur trafo yang didapat, nilai A untuk 0 sampai dengan 3 tahun, nilai B untuk 4 sampai dengan 10 tahun, nilai C untuk 11 sampai dengan 20 tahun, nilai D untuk di atas 20 tahun.

2. Pembebanan memiliki peran penting dalam penentuan kondisi kesehatan trafo. Kesesuaian antara kapasitas dan kebutuhan beban pada sisi keluaran trafo perlu diperhatikan agar didapatkan persentase pembebanan yang ideal. Persentase pembebanan didapat dari proses devisiasi antara kapasitas daya semu terhadap daya aktif trafo. Daya semu atau kapasitas daya dapat ditemukan pada *name plate* trafo sebesar 80 MVA dan daya aktif dapat ditentukan dengan Persamaan (2.3).

$$P = V \times I \times PF \quad (2.3)$$

Nilai daya aktif (P) pada Persamaan (2.3) mengkalkulasi nilai elektrik terukur seperti tegangan (V), arus (I), dan faktor daya (PF). Keluaran proses kalkulasi ini dijadikan variabel terikat terhadap persentase pembebanan pada Persamaan (2.4).

$$\%load = \frac{P}{S} \times 100\% \quad (2.4)$$

Persentase pembebanan (*%load*) yang ditunjukkan Persamaan (2.4) mengkalkulasikan persentase perbandingan yang diperoleh antara daya aktif (P) terhadap daya semu (S). Persentase pembebanan yang didapat inilah yang menjadi parameter HI trafo. Parameter ini memiliki kriteria bobot sebesar tiga dan empat kriteria penilaian mutu, mutu huruf A untuk persentase pembebanan kadapatan kurangin dari 30 persen, mutu huruf B untuk persentase pembebanan bernilai pada rentan 30 s.d 50 persen, mutu huruf C untuk persentase pembebanan bernilai pada rentan 50 s.d 70 persen, mutu huruf D untuk untuk persentase melebihi 70 persen.

3. Intensitas pemeliharaan trafo memiliki peran penting dalam peremajaan transformator. Kegiatan pemeliharaan periodik seperti pembersihan setiap kotoran pada komponen trafo, pengecekan kinerja proteksi, dan pergantian

silika bubble. Intensitas pelaksanaan pada parameter ini dibatasi dalam periode tahunan untuk menilai seberapa sering trafo mendapatkan *treatment* pemeliharaan. Parameter ini memiliki bobot penilaian empat dengan dua kriteria penilaian mutu yaitu, mutu huruf A jika intensitas pemeliharaan dilakukan minimal satu kali dengan kurun waktu kurang dari 12 bulan, dan mutu huruf D jika intensitas pemeliharaan dilakukan satu kali dengan kurun waktu lebih dari 12 bulan.

4. Temuan abnormal merupakan hasil inspeksi pada tahapan *monitoring*, operasi, dan pemeliharaan trafo. Temuan yang tercatat menjadi dasar pelaksanaan tindakan perbaikan. Temuan berbasis teknik diagnosa dibatasi dalam kurun waktu tahunan berdasarkan jumlah dan macam temuan yang ditemukan. Parameter ini memiliki bobot penilaian empat dengan dua kriteria penilaian mutu berdasarkan jumlah temuan abnormal trafo dalam 12 bulan. Mutu huruf A jika tidak terdapat temuan abnormal, mutu huruf B jika terdapat satu temuan abnormal, mutu huruf C jika terdapat dua temuan abnormal, nilai D jika terdapat lebih dari sama dengan tiga temuan abnormal.
5. Kelas aset distribusi dibagi menjadi tiga macam berdasarkan tingkat mutu pelayanan kehandalan dan keamanan. Aspek penilaian pemicu paling umum adalah karakter fluktuasi beban. Kelas 1 meliputi distrik komersil, industri, VIP, dan *Central Bussniseess District* (CBD) memiliki probabilitas gangguan yang tinggi karena pembebanan yang fluktuatif secara konsisten dibanding Kelas 2 meliputi distrik perkotaan dan kelas 3 meliputi distrik perdesaan. Parameter ini diklasifikasikan berdasarkan lokasi trafo memiliki bobot dua dengan tiga penilaian mutu berdasarkan kelas aset. kelas 3 menempati mutu huruf B, kelas 2 menempati mutu huruf C, dan kelas 1 menempati mutu huruf D.
6. Negara asal memiliki dasar pengukuran berupa pembanding antara asal negara manufacture itu terbuat. Inovasi negara dalam berproduksi, tingkat kemajuan teknologi asal merek, desain produksi, Kreativitas produksi, kualitas produksi, prestise yang dimiliki negara asal merek, dan catatan kehandalan produksi trafo yang telah beroperasi pada lokasi penelitian ini.

Merek memiliki bobot satu dengan dua penilaian berdasarkan asal pabrikan trafo. Penilaian mutu huruf B diberikan apabila asal pabrikan dari negara eropa dan mutu huruf C diberikan apabila asal pabrikan dari negara asia.

2.4.3. Faktor Kondisi

Faktor kondisi dirancang untuk memberikan probabilitas kehandalan transformator secara langsung berdasarkan penilaian pengujian elektrik untuk mendapatkan nilai parameter objektif berdasarkan acuan standar kelistrikan yang relevan [5]. Pengukuran yang menjadi parameter hi pada faktor kondisi meliputi, pengukuran tegangan tembus (BDV), kadar air, analisis gas terlarut (DGA), Indeks polarisasi (PI), resistansi belitan (WR), *turn ratio* (TR), dan $\tan \delta$ (DF). Penilaian mutu serta teknik setiap parameter pengujian diatur berdasar standar internasional yang bervariasi dan ditunjukkan pada Tabel 2.5 [26].

Tabel 2.5 Standar Pengukuran Faktor Kondisi

Parameter	Acuan Standar	
Tegangan Tembus	IEC 60422	
Kadar Air	IEC 60814	
<i>Dissolved Gas Annalisys</i>	IEEE C57.104	
<i>Polariti Index</i>	IEEE C57.152	
Resistansi Belitan	IEEE C57.152	(Nilai minimum > 5%)
Tan δ	IEEE C57.152	(Nilai maximum = 1%)
<i>Turn Ratio</i>	IEC 60076-1	(Nilai maximum = 0,5%)

Tabel 2.5 menunjukkan acuan standar internasional terhadap kriteria teknik dan nilai mutu faktor kondisi ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Teknik dan Nilai Mutu Parameter Faktor Kondisi [26]

Parameter Kondisi	Nilai Mutu			
	A	B	C	D
BDV (kV)	> 50 kV	-	40 s.d 50	< 40
DGAF (%)	< 1,2	1,2 s.d.1,5	1,5 s.d. 2,0	> 2,0
Kadar Air	< 40	-	-	\geq 40
WR (Jumlah Pengujian memenuhi standar)	Tiga	Dua	Satu	Tidak ada
<i>Polarity Index</i>	> 2,0	1,25 s.d. 2,0	1,00 s.d. 1,25	s.d 1
<i>Tan Delta</i>	< 0,5	$0,5 \leq DF < 0,7$	$0,7 \leq DF < 1$	$DF > 1$

TR (Jumlah Pengujian memenuhi standar)	Tiga	Dua	Satu	Tidak ada
--	------	-----	------	-----------

Parameter-parameter pada Tabel 2.6 menganalisis acuan nilai mutu terhadap kriteria keluaran data parameter faktor kondisi. Terdapat ruang lingkup berbeda disetiap parameter yaitu:

1. Pengujian tegangan tembus (BDV) dilakukan untuk menentukan kekuatan dielektrik dari minyak isolasi trafo. Prosedur serta hasil pengukuran yang dijadikan nilai mutu dilakukan berdasarkan kriteria standar IEC 60422 untuk rating tegangan 150 kV. Pengambilan sampel minyak dilakukan pada bagian bawah tangki trafo dan diuji pada alat penguran BDV dengan jarak celah antara katoda sebesar 2,5 mm [27].

Hasil yang digunakan sebagai mutu HI adalah rata-rata dari enam kali hasil uji pengukuran tegangan tembus yang dapat ditentukan dengan Persamaan (2.5).

$$\overline{BDV} = \frac{\sum Xi}{\sum Fi} \quad (2.5)$$

Keluaran Persamaan (2.5) berupa rata-rata pengukuran BDV diperoleh dari hasil perbandingan total nilai BDV terukur (Xi) terhadap jumlah frekuensi pengukuran (Fi). Keluaran perhitungan tersebut memiliki bobot penilaian sebesar tiga dengan tiga kriteria penilaian mutu berdasarkan rata-rata pengukuran yaitu, huruf mutu A jika kepadatan hasil BDV di atas 50 kV, huruf mutu C jika kepadatan hasil BDV berada di antara 40 s.d 50 kV, dan huruf mutu D jika kepadatan hasil BDV di bawah 40 kV.

2. Pengukuran kadar air atau *water content* dilakukan untuk mengetahui konsentrasi kandungan air sebagai pemicu kelembaman pada minyak isolasi yang sangat berbahaya bagi kesehatan isolasi transformator. Tabel 2.3 menunjukkan prosedur dan acuan pengukuran nilai mutu HI diatur berdasarkan standar IEC 60814 [28]. Parameter ini memiliki bobot penilaian sebesar tiga dengan tiga kriteria penilaian mutu yaitu, huruf mutu A jika kadar air terukur kurang dari 40 ppm dan huruf mutu D jika kepadatan kadar air melebihi 40 ppm.
3. Pengukuran analisis gas terlarut (DGA) dilakukan untuk mendeteksi secara dini fenomena kegagalan yang ada pada trafo yang diujikan akibat proses dekomposisi gas terhadap isolasi minyak (H₂, CH₄, C₂H₆, dan C₂H₄) dan

dekomposisi isolasi gas terhadap isolasi kertas (CO dan CO₂) yang diatur berdasarkan standar IEEE C57.104 [25]. Teknik interpretasi yang dijadikan kriteria pada Tabel 2.3 berdasarkan proses kalkulasi faktor DGA yang ditunjukkan pada Persamaan (2.6).

$$FDGA = \frac{\sum_{i=1}^7 ni*pi}{\sum_{i=1}^7 pi} \quad (2.6)$$

Persamaan (2.6) memiliki ni yaitu nilai gas terukur pada setiap gas ppm dan pi adalah bobot setiap gas. Nilai pi setiap gas diklasifikasikan berdasarkan batas standar gas DGA. Nilai satu untuk CO dan CO₂, nilai dua untuk H₂, nilai tiga untuk CH₄, C₂H₄ dan C₂H₂, sedangkan nilai lima untuk C₂H₂ [26]. Parameter ini memiliki bobot penilaian sebesar tiga dengan lima kriteria penilaian mutu yaitu, huruf mutu A jika FDGA yang didapat kurang dari 1,2, huruf mutu B jika FDGA yang didapat berada pada kisaran 1,2 sampai dengan 1,5, huruf mutu C jika FDGA yang didapat berada pada kisaran 1,5 sampai dengan 2,0, huruf mutu D jika FDGA yang didapat berada pada kisaran 2,0 sampai dengan 3,0.

4. Pengukuran indeks polarisasi atau *polarity index* (PI) bertujuan untuk mengetahui kondisi ketahanan kapasitansi terhadap injeksi tegangan yang bertujuan untuk mengetahui laju polarisasi isolasi trafo yang terjadi antara sisi komponen belitan dan sistem pentanahan terhadap komponen belitan [27]. Tabel 2.3 diatur berdasarkan standar IEEE C57.152. Persamaan untuk menghitung PI ditunjukkan pada Persamaan (2.7).

$$PI = \frac{IR_{10}}{IR_1} \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) didapat dari kalkulasi rasio *IR test* (resistansi isolasi) yang dilaksanakan pada satu waktu terhadap perhitungan indek polarisasi. Konsep perhitungan index polarisasi memanfaatkan karakter kapasitansi dan laju polarisasi berdasarkan jangka waktu resistansi menit ke sepuluh (IR₁₀) dan menit ke pertama (IR₁) dengan wujud tegangan pengukuran DC. memiliki bobot penilaian sebesar dua dengan lima kriteria penilaian mutu yaitu, huruf mutu A jika PI yang didapat lebih dari 2,0, nilai B jika PI yang didapat berada pada kisaran 2,0 sampai dengan 1,25, huruf mutu C jika PI yang didapat berada pada kisaran 1,25 sampai dengan 1,10, huruf mutu D jika kedapatan nilai PI kurang dari 1,10.

5. Pengujian resistansi belitan dapat mendeteksi *short circuit* pada jaringan kontak belitan dan *tap changer* [29]. Tabel 2.3 menunjukkan acuan indeks kesehatan WR mengacu berdasarkan standar IEEE C57.152. Persamaan untuk menghitung WR ditunjukkan pada Persamaan (2.8).

$$WR = \frac{U}{I} \quad (2.8)$$

Hasil Persamaan 2.5 dijadikan perbandingan teori terhadap hasil pengujian untuk ditentukan besar deviasi. Persamaan ini memanfaatkan prinsip hukum ohm dalam penentuan nilai suatu resistansi yaitu perbandingan nilai tegangan uji (U) terhadap arus uji (I). Keluaran persamaan ini digunakan sebagai koefisien pada variabel teori untuk penentuan deviasi Persamaan (2.10). Parameter ini memiliki bobot sebesar dua dengan tiga kriteria penilaian mutu. Kriteria yang dirancang berdasarkan jumlah hasil pengujian yang mendapat hasil memuaskan yaitu di bawah lima persen terhadap konfigurasi pengukuran antar fasa disetiap posisi tap. Nilai huruf mutu A jika persentase kesalahan parameter kedapatan lebih dari maupun sama dengan dua penilaian memuaskan, huruf mutu C jika kedapatan hanya satu penilaian memuaskan, dan nilai mutu E jika tidak kedapatan hasil memuaskan dari ketiga konfigurasi pengukuran.

6. Pengukuran *turn ratio* (TR) dilakukan untuk mendeteksi hubung singkat antara sisi belitan berdasarkan besar nilai keluaran pengukuran terbentuk [30]. Pengukuran dilakukan berdasarkan jumlah posisi tap dengan memanfaatkan Persamaan (2.9).

$$TR = \frac{VP}{VS} \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) memanfaatkan rasio perbandingan kapasitas tegangan antara sisi primer terhadap sisi sekunder. Hasil persamaan ini dijadikan variabel teoritis yang didapat dari keterangan *nameplate* terhadap deviasi hasil pengukuran alat. Kriteria *turn ratio* (TR) memiliki bobot sebesar dua dengan tiga kriteria penilaian mutu. Penilaian berdasarkan data memuaskan memenuhi standar berdasarkan jumlah fasa bernilai di bawah 0,5%. Nilai huruf mutu A jika kedapatan tiga fasa bernilai memuaskan, huruf mutu C jika kedapatan dua fasa bernilai memuaskan, dan huruf mutu D jika hanya

kedapatan satu bahkan tidak sama sekali didapatkan nilai turn ratio yang memuaskan.

7. Pengujian $\tan \delta$ dilakukan sebagai pengukuran arus bocor pada isolasi trafo karna salah satu karakteristiknya sebagai kapasitansi. Proses kalkulasi $\tan \delta$ memanfaatkan hasil rasio antara karakter resistif dan kapasitif pada isolasi [12]. Parameter ini memiliki bobot senilai tiga dengan lima kriteria penilaian. Nilai huruf mutu A jika DF yang didapat kurang dari 0,1 persen, huruf mutu B jika DF yang didapat berada pada kisaran 0,1 sampai dengan 0,5 persen, huruf mutu C jika DF yang didapat berada pada kisaran 0,5 sampai dengan 0,7 persen, huruf mutu D jika DF kedapatan melebihi 0,7 persen.

Pada pengukuran resistansi belitan dan *turn ratio* memanfaatkan hasil persentase kesalahan sebagai penentuan kriteria nilai mutu terhadap data yang didapatkan. Nilai persentase kesalahan didapat melalui proses kalkulasi Persamaan (2.10).

$$\%Error = \left| \frac{Xa - Xb}{Xa} \right| \times 100 \% \quad (2.10)$$

Persamaan (2.10) memuat selisih hasil pengukuran (Xa) dan perhitungan (Xb) dibandingkan dengan hasil perhitungan itu sendiri (Xa). Wujud bilangan yang digunakan bersifat mutlak terhadap kemungkinan nilai dalam wujud negatif maupun positif.

2.4.4. Estimasi Prediksi Susut Umur HI

Parameter HI faktor historis dan kondisi menghasilkan penilaian berupa kalkulasi bobot terhadap nilai mutu terdistribusi melalui proses kalkulasi HI. Setiap nilai akhir parameter membentuk nilai faktor masing-masing. Nilai akhir historis dan kondisi masing-masing dapat ditentukan dengan Persamaan (2.11) dan Persamaan (2.12).

$$NH = \frac{NAH \text{ Total}}{BobotH \text{ Total}} \quad (2.11)$$

$$NK = \frac{NAK \text{ Total}}{BobotK \text{ Total}} \quad (2.12)$$

Persamaan (2.11) dan Persamaan (2.12) memuat kalkulasi kedua faktor pada HI yang memanfaatkan perbandingan rasio antara nilai akhir setiap faktor yang diperoleh dari perkalian antara total mutu angka (NA) terhadap bobot total (Bobot Total). Hasil kalkulasi tersebut digunakan sebagai hasil akhir untuk predikat serta estimasi umur ditunjukkan pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Perkiraan Umur Transformator [25]

HI	Condition	Harapa Umur
3.4 s.d. 4	Sangat Bagus	Lebih dari 15 Tahun
2.8 s.d. 3.3	Bagus	Lebih dari 10 tahun
2.0 s.d 2.7	Cukup	Sampai 10 tahun
1.2 s.d 1.9	Buruk	Kurang dari 10 tahun
0 s.d 1.1	Sangat Buruk	Di akhir kehidupan

Pada Tabel 2.15 status kesehatan perkiraan umur sesuai dengan mutu huruf yang telah dibangun dijadikan harapan umur dengan keterangan kondisi menjadi lima klasifikasi. Pertama, sangat bagus dan bagus dengan harapan umur masing-masing selama 15 tahun dan 10 tahun dengan persyaratan nilai HI sebesar 85 sampai dengan 100 dan 70 sampai dengan 85. Kedua, cukup dengan harapan umur dalam kurun waktu 3 sampai dengan 10 tahun dengan persyaratan nilai HI sebesar 50 sampai dengan 70. Terakhir, buruk dan sangat buruk dengan harapan umur masing-masing kurang dari tiga tahun sampai dengan sudah menempuh akhir hayat.

2.5. Kajian Pustaka

Berikut ini penelitian-penelitian yang menjadi landasan penelitian yang sedang dilakukan,

Penelitian pertama, mengenai deteksi gangguan transformator berbasis manajemen transformator untuk meningkatkan kinerja operasi dan finansial menunjukkan persentase pembebanan ideal adalah di bawah 60 persen. Penelitian ini menggunakan objek trafo dengan kode BL 268, BL 231, dan BR 154 dengan pembebanan masing-masing 99,72 persen, 109,31 persen, dan 103,48 persen. Pembebanan yang tidak ideal ini menunjukkan pada tahun 2019 total temuan gangguan sebanyak 11 temuan yang meliputi gangguan pada minyak isolasi, *over heat* akibat pola pembebanan, dan sambaran petir. Peran metode HI disini sebagai perekomendasi keputusan dengan peningkatan kapasitas dan penukaran trafo.

Setelah dilakukan manajemen transformator, gangguan ditemukan trafo pada tahun 2020 presentase pembebanan menjadi 50,53 persen, 67,39 persen dan 66,12 persen. Temuan gangguan trafo menurun dari sembilan temuan menjadi satu temuan. Temuan gangguan yang ditemukan bukan disebabkan oleh pembebanan atau kegagalan komponen trafo melainkan akibat kegagalan eksternal berupa sambaran petir [26].

Penelitian kedua, mengenai identifikasi kegagalan komponen menunjukkan metode HI layak diaplikasikan untuk memperkirakan probabilitas kegagalan dan umur efektif trafo dengan mempertimbangkan fokus pelaksanaan untuk menggabungkan interpretasi hasil terperoleh dari metode pemantauan dan diagnosa yang berbeda dan penetapan bobot disetiap parameter tergantung kepada *utility* resiko historis. Menempatkan tujuh buah trafo berkapasitas 32 MVA sebagai objek penelitian dan memanfaatkan nilai mutu dengan rentan (1, 2, dan 3) terhadap 11 parameter berbasis faktor kondisi sebesar dua untuk pengukuran turn ratio. Berbobot tiga untuk pengukuran rasio karbon, BDV, IFT, dan winding resistance. Berbobot empat untuk pengukuran short circuit impedance (SCI). Berbobot lima untuk pengukuran DGA dan SFRA. Keluaran HI yang ditawarkan berdasarkan rekomendasi perencanaan ada tiga macam yaitu, inspeksi atau pengecekan untuk nilai HI yang didapat berada diantara 80 sampai dengan 100, perbaikan untuk nilai HI didapat berada diantara 40 sampai dengan 80, dan pergantian untuk nilai HI yang didapat berada di antara 0 sampai dengan 40. Dari tujuh objek yang digunakan berdasarkan kalkulasi HI didapat dua trafo dalam kategori baik menyebabkan penyesuaian pemeliharaan hanya bersifat inspeksi, empat trafo dalam kategori cukup menyebabkan penyesuaian pemeliharaan bersifat perbaikan, dan satu unit trafo dalam kategori memprihatinkan menyebabkan penyesuaian pemeliharaan berupa pergantian atau pelepasan trafo [19].

Penelitian ketiga, Menjadikan Trafo daya 60 MVA di PT.PLN (Persero) UL-TJBT UPT Purwokerto. Jika transformator ini mengalami gangguan maka banyak sekali kerugian yang dihasilkan. Sebagai satu cara untuk mencegah adanya gangguan pada transformator tersebut maka perlu adanya pemeliharaan yang tepat agar kinerja transformator tidak terganggu. Penelitian ini membahas tentang kondisi dan umur transformator daya menggunakan metode *health index* (HI).

Kondisi dan umur transformator daya ditentukan dari nilai HI berdasarkan faktor historis. Waktu operasi termasuk dalam kategori antara 0 sampai dengan 3 tahun, Pembebanan tertinggi terjadi pada bulan oktober sebesar 47 persen, Inspeksi dan pemeliharaan dilakukan setiap satu kali dalam dua tahun, tidak pernah mengalami gangguan internal sama sekali selama tahun 2018, transformator beroperasi pada sektor industri, dan transformator sendiri bermerek Pauwels asal dari India. Faktor kondisi untuk 11 pengujian tegangan tembus minyak yang memenuhi standar, kadar air dalam minyak transformator sebesar 16 ppm, *dissolved gas analysis* terkandung pada minyak transformator memenuhi syarat batas normal, nilai PI untuk pengukuran resistansi isoslasi memenuhi batas PI nominal, resistansi belitan pada sisi tegangan tinggi maupun rendah memberikan pengukuran sesuai standar, pengukuran perbandingan belitan pada 17 tap memenuhi standar, dan dari pengukuran tan delta nilai pada *winding* dan *bushing* sebesar 0,41 persen. Nilai *health index* diperoleh pada penelitian yaitu sebesar 3,48 dan transformator daya PT.PLN (Persero) UI-TJBT UPT Purwokerto termasuk dalam perawatan normal. Transformator menggunakan metode HI terprediksi dapat beroperasi selama 10 tahun kedepan [8].

Penelitian keempat, menyajikan konsep penilaian risiko untuk transformator daya dengan menggunakan *health index*, yang memanfaatkan konsep faktor historis dan kondisi. Data pemeliharaan dari 237 transformator daya digunakan untuk menganalisis peringkat dan penilaian faktor risiko. Bobot faktor risiko diberikan oleh tim pemeliharaan yang berpengalaman. Faktor dan penilaian risiko dikategorikan dengan bobot yang sama yaitu, historis transformator, dan kondisi transformator saat ini. Penilaian dari kedua bagian dihitung untuk mendapatkan *health index* (HI) transformator daya. HI kemudian dijadikan nilai pada matriks *health index* yang menginterpretasikan kondisi risiko untuk transformator tersebut. Metode penilaian risiko yang diusulkan dalam penelitian ini diterapkan pada tiga transformator daya di area beban yang berbeda di wilayah objek penelitian. Hasil menunjukkan bahwa metode tersebut berhasil mendeteksi kondisi resiko dari transformator tersebut. Oleh karena itu metode yang diusulkan dapat membuat rencana perawatan *preventif* yang efisien [31]

Penelitian kelima, memanfaatkan penilaian kondisi kesehatan isolasi keseluruhan trafo distribusi tegangan menengah berdasarkan hasil uji minyak. Untuk memvalidasi pendekatan yang disajikan, algoritma ML (*machine learning*) diuji pada dua *database* terhadap lebih dari 1000 sampel minyak trafo dengan tingkat tegangan bervariasi. Hasil uji minyak trafo diperoleh dari trafo selama waktu pengambilan sampel oli dari dua perusahaan dengan utilitas berbeda. Prosedur yang diilustrasikan bertujuan untuk meniru skenario realistis tentang bagaimana utilitas akan mendapat manfaat dari penggunaan alat ML yang berbeda untuk memahami *health index* insulasi transformator mereka. Tujuan ini dicapai dengan menggunakan dua langkah prosedural. Model tereduksi yang dikembangkan sebelumnya adalah dasar untuk mengurangi jumlah pengujian yang diperlukan untuk perhitungan *health index* transformator. Ditemukan bahwa pengurangan jumlah pengujian tidak memengaruhi keakuratan model prediksi ML yang dianggap sebagai keuntungan signifikan dalam hal pengurangan biaya manajemen aset transformator [32].