

Analisis Kualitas Isolasi Minyak Transformator Daya Di PT. PERTAMINA Asset 5 Sanga Sanga Field

Irwansyah¹, Rusda², Suratno³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Samarinda
rusda@polnes.ac.id

Abstrak- Transformator merupakan peralatan penting dalam sistem tenaga listrik yang keandalannya dipengaruhi oleh kualitas minyak transformator sebagai media isolasi dan pendingin. Penelitian ini bertujuan menganalisis kualitas minyak transformator berdasarkan parameter tegangan tembus (*breakdown voltage*), viskositas, resistivitas, konduktivitas, kadar air, dan angka keasaman sesuai standar IEC 60156, IEC 60296, dan SPLN. Sampel yang diuji meliputi minyak transformator ST K01, ST-632, ST-19B, dan minyak transformator baru. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh sampel memenuhi standar tegangan tembus dengan nilai 39,04–54,88 kV serta memiliki viskositas dan angka keasaman yang masih sesuai standar. Namun, minyak transformator ST-19B dan ST-632 memiliki kadar air lebih tinggi, yaitu 0,373% dan 0,301%, yang menyebabkan penurunan resistivitas dan peningkatan konduktivitas. Kondisi tersebut menunjukkan adanya penurunan kualitas minyak yang dapat memengaruhi keandalan sistem isolasi. Secara keseluruhan, seluruh sampel masih layak digunakan sebagai media isolasi dan pendingin. Namun, transformator ST 19B dan ST-632 memerlukan pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition Based Maintenance*), seperti filtrasi minyak, *vacuum dehydration*, dan pemantauan kualitas minyak secara berkala.

Kata kunci: Transformator, minyak transformator, tegangan tembus, *Condition Based Maintenance*.

I. PENDAHULUAN

Transformator merupakan salah satu peralatan utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mentransformasikan energi listrik dari satu tingkat tegangan ke tingkat tegangan lainnya melalui prinsip induksi elektromagnetik. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, transformator berperan penting dalam menjaga kontinuitas penyaluran energi listrik sehingga keandalannya harus tetap terjaga. Gangguan pada transformator dapat menyebabkan terhentinya penyaluran daya, menurunkan keandalan sistem, serta mengakibatkan kerugian operasional yang cukup besar. Oleh karena itu, diperlukan program pemeliharaan yang efektif untuk mempertahankan kinerja transformator selama masa operasinya[9].

Salah satu komponen yang sangat menentukan keandalan transformator adalah minyak transformator. Minyak transformator berfungsi sebagai media isolasi listrik sekaligus media pendingin yang mengalirkan panas dari belitan dan inti transformator menuju sistem pendingin. Selama beroperasi, minyak transformator akan mengalami proses degradasi akibat

temperatur tinggi, oksidasi, kelembapan, kontaminasi partikel, serta pengaruh pembebanan. Degradasi tersebut dapat menyebabkan penurunan sifat dielektrik minyak sehingga kemampuan isolasi dan pendinginan transformator ikut menurun. Apabila kondisi tersebut tidak segera diketahui dan ditangani, maka dapat meningkatkan risiko terjadinya arus bocor, *partial discharge*, percepatan penuaan isolasi kertas, hingga kegagalan transformator[2].

Evaluasi kualitas minyak transformator dilakukan melalui beberapa parameter pengujian yang mampu menggambarkan kondisi fisik, kimia, dan sifat kelistrikan minyak. Parameter tersebut meliputi Breakdown Voltage (BDV), viskositas, densitas, kadar air, resistivitas, konduktivitas, dan keasaman. Nilai Breakdown Voltage digunakan untuk mengetahui kemampuan minyak dalam menahan tegangan listrik sebelum terjadi kegagalan dielektrik. Viskositas berkaitan dengan kemampuan minyak dalam proses perpindahan panas, sedangkan kadar air menunjukkan tingkat kontaminasi yang dapat menurunkan sifat isolasi minyak. Resistivitas dan konduktivitas menggambarkan kemampuan minyak dalam menghambat maupun menghantarkan arus listrik, sementara angka keasaman menunjukkan tingkat oksidasi minyak selama masa operasi. Hasil pengujian tersebut selanjutnya dibandingkan dengan standar IEC 60156, IEC 60296, serta pedoman SPLN sebagai acuan dalam menentukan kelayakan operasi minyak transformator[6].

PT Pertamina EP Zona 9 Asset 5 Sangasanga Field menggunakan transformator distribusi sebagai salah satu peralatan utama untuk mendukung kontinuitas sistem kelistrikan pada fasilitas produksi. Keandalan transformator menjadi faktor penting karena gangguan pada transformator dapat mempengaruhi proses operasional perusahaan. Oleh sebab itu, pemantauan kondisi minyak transformator secara berkala menjadi bagian penting dalam program pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition Based Maintenance*). Melalui evaluasi kualitas minyak, potensi penurunan performa transformator dapat dideteksi lebih awal sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan sebelum terjadi gangguan yang lebih serius.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kualitas minyak transformator pada transformator distribusi di PT Pertamina EP Zona 9 Asset 5 Sangasanga Field berdasarkan hasil pengujian Breakdown Voltage, densitas, viskositas, kadar air, resistivitas, konduktivitas, dan keasaman. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis hubungan antar parameter pengujian, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi penurunan kualitas minyak transformator, mengevaluasi

kesesuaian hasil pengujian terhadap standar IEC 60156, IEC 60296, dan pedoman SPLN, serta menyusun rekomendasi prioritas pemeliharaan berdasarkan kondisi aktual minyak transformator. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam penerapan strategi *Condition Based Maintenance* untuk meningkatkan keandalan transformator dan menjaga kontinuitas sistem kelistrikan di PT Pertamina EP Zona 9 Asset 5 Sangasanga Field.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Transformator Daya

Transformator daya merupakan peralatan listrik statis yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk mentransformasikan energi listrik dari satu tingkat tegangan ke tingkat tegangan lainnya tanpa mengubah frekuensi sistem. Dalam sistem tenaga listrik, transformator berperan sebagai penghubung antara proses pembangkitan, transmisi, dan distribusi sehingga kontinuitas penyaluran energi listrik dapat dipertahankan. Keandalan transformator sangat dipengaruhi oleh kondisi sistem isolasi yang terdiri atas isolasi padat dan isolasi cair. Kerusakan pada sistem isolasi menjadi salah satu penyebab utama kegagalan operasi transformator karena dapat memicu terjadinya hubung singkat internal maupun pelepasan muatan listrik (*electrical discharge*). Oleh sebab itu, kondisi media isolasi harus dipantau secara berkala untuk menjamin umur operasi transformator tetap optimal^[1].

B. Minyak Transformator

Pada transformator berpendingin minyak, minyak isolasi memiliki dua fungsi utama, yaitu sebagai media isolasi listrik dan sebagai media pendingin. Sebagai media isolasi, minyak harus mampu menahan tegangan listrik yang muncul di antara bagian-bagian bertegangan sehingga tidak terjadi kegagalan dielektrik. Sebagai media pendingin, minyak berfungsi menyerap panas yang dihasilkan oleh belitan dan inti transformator selama proses operasi kemudian mengalirkannya menuju sistem pendingin^[2].

Selama masa operasi, kualitas minyak dapat mengalami penurunan akibat pengaruh temperatur, proses oksidasi, kelembapan, kontaminasi partikel padat, maupun umur pemakaian. Degradasi tersebut menyebabkan perubahan sifat fisik dan kimia minyak sehingga kemampuan isolasi serta pendinginan menjadi berkurang. Oleh karena itu, evaluasi kualitas minyak transformator menjadi bagian penting dalam program pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition Based Maintenance*).

C. Parameter Evaluasi Kualitas Minyak

Kondisi minyak transformator dapat dievaluasi melalui beberapa parameter yang mewakili karakteristik dielektrik, fisik, dan kimia minyak.

a) Breakdown Voltage

Breakdown Voltage (BDV) merupakan parameter utama yang menunjukkan kemampuan minyak transformator dalam menahan tegangan listrik sebelum

terjadi kegagalan isolasi. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan AC secara bertahap pada dua elektroda yang dicelupkan ke dalam minyak hingga terjadi loncatan bunga api. Semakin tinggi nilai tegangan tembus, semakin baik kemampuan dielektrik minyak dalam mempertahankan fungsi isolasinya. Sebaliknya, penurunan nilai BDV mengindikasikan adanya kontaminasi atau degradasi minyak akibat kadar air, partikel padat, maupun produk oksidasi.

b) Viskositas

Viskositas merupakan ukuran hambatan aliran minyak selama proses sirkulasi di dalam transformator. Parameter ini berkaitan langsung dengan kemampuan minyak dalam memindahkan panas dari belitan menuju radiator. Nilai viskositas yang terlalu tinggi dapat mengurangi efektivitas pendinginan sehingga temperatur operasi transformator meningkat dan mempercepat proses penuaan isolasi.

c) Kadar Air

Keberadaan air di dalam minyak transformator merupakan salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap kualitas isolasi. Air dapat berasal dari proses kondensasi, kebocoran sistem, maupun degradasi isolasi selulosa. Meningkatnya kadar air akan menurunkan tegangan tembus, mempercepat pembentukan senyawa asam, serta meningkatkan risiko kegagalan isolasi ketika transformator beroperasi pada temperatur tinggi.

d) Resistivitas dan Konduktivitas

Resistivitas menunjukkan kemampuan minyak dalam menghambat aliran arus listrik, sedangkan konduktivitas menggambarkan kemudahan minyak menghantarkan arus listrik akibat keberadaan ion atau kontaminan. Kedua parameter tersebut saling berhubungan secara berbanding terbalik. Penurunan resistivitas yang diikuti peningkatan konduktivitas mengindikasikan adanya penurunan kualitas minyak sebagai media isolasi.

e) Keasaman

Keasaman (*Acid Number*) digunakan untuk mengevaluasi tingkat oksidasi minyak transformator. Selama proses operasi, minyak akan mengalami reaksi oksidasi yang menghasilkan senyawa asam organik. Peningkatan angka keasaman dapat mempercepat pembentukan lumpur (*sludge*), menurunkan kemampuan pendinginan, serta mempercepat degradasi isolasi padat di dalam transformator.

D. Hubungan antar parameter kualitas minyak

Karakteristik minyak transformator tidak dapat dievaluasi hanya menggunakan satu parameter karena setiap parameter saling memengaruhi. Kadar air yang meningkat akan menyebabkan penurunan tegangan tembus sekaligus menurunkan resistivitas minyak. Penurunan resistivitas akan diikuti oleh peningkatan konduktivitas akibat bertambahnya jumlah ion bebas di dalam minyak. Di sisi lain, proses oksidasi menyebabkan angka keasaman meningkat yang selanjutnya mempercepat pembentukan produk degradasi dan memperburuk karakteristik dielektrik minyak. Oleh karena itu, evaluasi kualitas minyak transformator perlu dilakukan secara menyeluruh melalui kombinasi seluruh parameter pengujian

agar kondisi aktual minyak dapat diketahui secara lebih akurat[8].

III. METODE PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada transformator distribusi yang beroperasi di PT. Pertamina EP Zona 9 Asset 5 Regional 3 Sangasanga Field, Kec. Saangasanga, Kab. Kutai Kartanegara. Pengambilan sampel minyak dilakukan secara langsung pada transformator yang menjadi objek penelitian, sedangkan pengujian karakteristik minyak dilaksanakan di laboratorium pengujian minyak transformator menggunakan peralatan yang telah memenuhi standar pengujian minyak isolasi. Seluruh proses penelitian dilaksanakan mulai dari observasi lapangan, pengambilan sampel, pengujian laboratorium, analisis data, hingga penyusunan rekomendasi pemeliharaan.

B. Objek Penelitian

Objek penelitian berupa minyak isolasi dari tiga transformator yang digunakan pada sistem kelistrikan PT Pertamina EP Asset 5 Sangasanga Field serta satu sampel minyak transformator baru sebagai pembanding. Sampel penelitian terdiri atas:

TABEL 1
SAMPEL PENELITIAN

Kode Sampel	Keterangan
ST-K01	Minyak transformator operasi
ST-632	Minyak transformator operasi
ST-19B	Minyak transformator operasi
Minyak Baru	Sampel pembanding

Untuk objek sample yang digunakan sebagai penelitian terdiri dari :

TABEL 2
OBJEK SAMPEL PENELITIAN

NO	Sampel	Parameter	Keterangan
1	Trafo EE English ST – K01	Kapasitas	400kVA
		Tegangan Primer Penggunaan	6300-3150 V 10 tahun
2	Trafo B&D ST-632	Kapasitas	350 kVA
		Tegangan Primer Penggunaan	6600 V 5 tahun dengan indikasi Short
3	Trafo B&D ST-19B	Kapasitas	250 kVA
		Tegangan Primer Penggunaan	6600 V 5 tahun

C. Pengambilan sampel

Pengambilan sampel minyak dilakukan secara langsung melalui katup pengambilan minyak (*oil sampling valve*) pada masing-masing transformator. Sebelum pengambilan sampel, katup dibersihkan untuk menghindari kontaminasi dari lingkungan sekitar. Selanjutnya minyak dialirkan beberapa saat guna membuang endapan atau partikel yang berada di dalam saluran pengambilan.

Minyak kemudian dimasukkan ke dalam botol khusus yang bersih, kering, dan kedap udara agar karakteristik minyak tidak berubah selama proses penyimpanan. Setiap sampel diberi label sesuai kode transformator untuk memudahkan proses identifikasi selama pengujian.

Prosedur pengambilan sampel dilakukan secara hati-hati agar tidak terjadi pencampuran udara maupun masuknya kelembapan yang dapat memengaruhi hasil pengujian laboratorium

D. Parameter Pengujian

Evaluasi kualitas minyak dilakukan melalui enam parameter utama yang mewakili karakteristik dielektrik, fisik, dan kimia minyak transformator.

a) Breakdown Voltage (BDV)

Breakdown Voltage merupakan parameter utama yang menunjukkan kemampuan minyak transformator dalam menahan tegangan listrik sebelum terjadi kegagalan dielektrik. Pengujian dilakukan menggunakan alat Breakdown Voltage Tester dengan jarak elektroda 2,5 mm. Tegangan AC dinaikkan secara bertahap hingga terjadi loncatan listrik (*electrical breakdown*). Pengujian dilakukan beberapa kali pada setiap sampel dan nilai rata-ratanya digunakan sebagai hasil pengujian.

Nilai BDV dibandingkan dengan standar IEC 60156 yang mensyaratkan tegangan tembus minimum sebesar 30 kV/2,5 mm untuk minyak transformator yang masih layak digunakan[3].

b) Pengujian Viskositas

Pengujian viskositas dilakukan menggunakan Viscosimeter Ostwald. Parameter ini digunakan untuk mengetahui kemampuan minyak dalam mengalir dan memindahkan panas selama proses pendinginan transformator.

Semakin tinggi viskositas menunjukkan aliran minyak semakin lambat sehingga efektivitas pendinginan transformator dapat menurun. Sebaliknya, nilai viskositas yang sesuai standar menunjukkan kemampuan sirkulasi minyak masih optimal[4].

c) Pengujian Kadar Air

Kadar air diukur menggunakan metode Karl Fischer Titration sesuai standar. Metode ini dipilih karena memiliki tingkat akurasi tinggi dalam menentukan kandungan air hingga satuan ppm.

Air merupakan salah satu kontaminan utama yang dapat menurunkan kekuatan dielektrik minyak transformator. Oleh karena itu, hasil pengujian kadar air digunakan sebagai salah satu indikator utama dalam mengevaluasi kondisi minyak[5].

d) Pengujian Resistivitas

Pengujian resistivitas dilakukan menggunakan alat uji resistivitas minyak isolasi. Parameter ini menunjukkan kemampuan minyak dalam menghambat aliran arus listrik.

Semakin tinggi nilai resistivitas menunjukkan kualitas minyak semakin baik karena kandungan ion bebas di dalam minyak relatif rendah[6].

e) Pengujian Konduktivitas

Konduktivitas merupakan kebalikan dari resistivitas dan menunjukkan kemampuan minyak menghantarkan arus listrik.

Nilai konduktivitas yang tinggi mengindikasikan adanya peningkatan jumlah ion akibat proses oksidasi maupun kontaminasi sehingga kualitas minyak sebagai media isolasi mengalami penurunan[6].

f) Pengujian Keasaman

Angka keasaman diuji menggunakan metode titrasi sesuai standar Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui jumlah senyawa asam yang terbentuk akibat proses oksidasi minyak selama transformator beroperasi.

Peningkatan angka keasaman menunjukkan proses degradasi minyak telah berlangsung sehingga dapat mempercepat pembentukan lumpur (*sludge*) dan memperburuk karakteristik isolasi minyak[7].

E. Variabel operasional

Seluruh hasil pengujian dibandingkan dengan standar internasional yang digunakan sebagai acuan penilaian kualitas minyak transformator

TABEL 3
STANDAR ACUAN PENELITIAN

Parameter	Standar Acuan
Breakdown Voltage	IEC 60156
Densitas	IEC 60296
Viskositas	IEC 60296
Kadar air	IEC 60296
Resistivitas	IEC 60296
konduktivitas	IEC 60296
Keasaman	IEC 60296
Evaluasi Operasi	SPLN

Perbandingan terhadap standar dilakukan untuk menentukan apakah minyak transformator masih memenuhi persyaratan sebagai media isolasi dan pendingin serta untuk mengidentifikasi tingkat degradasi yang terjadi.

F. Teknik Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif kuantitatif melalui beberapa tahapan. Tahap pertama adalah merekapitulasi hasil pengujian setiap parameter pada seluruh sampel minyak transformator. Tahap kedua dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian terhadap batas standar IEC dan SPLN untuk menentukan tingkat kelayakan masing-masing sampel.

Selanjutnya dilakukan analisis hubungan antarparameter yang meliputi hubungan antara kadar air dengan *breakdown voltage*, kadar air dengan resistivitas, kadar air dengan

konduktivitas, resistivitas dengan konduktivitas, angka keasaman dengan resistivitas, serta viskositas dengan *breakdown voltage*. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui mekanisme degradasi minyak transformator dan pengaruh setiap parameter terhadap kemampuan dielektrik minyak.

Berdasarkan hasil analisis tersebut dilakukan evaluasi kondisi setiap transformator dan klasifikasi tingkat risiko operasional. Tahap akhir penelitian adalah penyusunan rekomendasi pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition Based Maintenance*) yang meliputi tindakan filtrasi minyak, *vacuum dehydration*, pemantauan kualitas minyak secara berkala, dan penjadwalan ulang pengujian laboratorium untuk mempertahankan keandalan transformator[2].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

TABEL 4
TABEL HASIL PENGUJIAN

Parameter	ST-K01	ST-632	ST-19B	Minyak Baru
Breakdown Voltage Maksimum (kV)	39,04	48,62	43,94	54,88
Resistivitas (MΩ)	111,9	59,5	61,9	120,3
Konduktivitas (S/m)	0,008936	0,016806	0,016155	0,008312
Kadar Air (%)	0,070	0,301	0,373	0,094
Viskositas	3,09	4,44	3,98	4,66
Kinematik (cSt)				
Angka Asam (mg KOH/g)	0,11	0,05	0,05	0,03
Warna Minyak	Kuning terang	Kuning muda	Kuning muda	Kuning pucat
IFT (dynes/cm)	24	27	27	45
pH	5	5	5	5

A. Hasil Pengujian Sample ST-K01

Transformator ST-K01 menunjukkan kondisi minyak yang masih baik meskipun telah digunakan dalam operasi. Nilai Breakdown Voltage (BDV) sebesar 39,04 kV berada di atas batas minimum IEC 60156 sehingga kemampuan dielektrik minyak masih memenuhi persyaratan sebagai media isolasi. Nilai tersebut memang merupakan yang terendah dibandingkan sampel operasi lainnya, tetapi masih berada pada kategori layak operasi.

Nilai resistivitas sebesar 111,9 MΩ merupakan yang tertinggi di antara ketiga minyak transformator yang telah digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa minyak masih memiliki kemampuan yang baik dalam menghambat aliran arus listrik akibat rendahnya kandungan ion bebas. Kondisi tersebut juga didukung oleh nilai konduktivitas yang rendah sebesar 0,008936 S/m, sehingga minyak masih mempunyai karakteristik isolasi yang baik.

Hasil pengujian kadar air sebesar 0,070% merupakan nilai terendah di antara seluruh minyak transformator operasi. Rendahnya kandungan air menunjukkan bahwa sistem

transformator masih bekerja dengan baik sehingga kontaminasi kelembapan dapat diminimalkan. Kondisi ini berkontribusi terhadap tingginya resistivitas dan masih baiknya kemampuan dielektrik minyak.

Nilai viskositas 3,09 cSt menunjukkan bahwa minyak masih mampu mengalir dengan baik sehingga proses perpindahan panas dari belitan menuju radiator berlangsung secara efektif. Dari sisi pendinginan, minyak ST-K01 masih memenuhi karakteristik yang dipersyaratkan.

Pada parameter kimia, ST-K01 memiliki angka keasaman sebesar 0,11 mg KOH/g, yang merupakan nilai tertinggi di antara seluruh sampel. Meskipun demikian, nilai tersebut masih berada dalam batas operasional sehingga belum menunjukkan proses oksidasi yang berbahaya. Warna minyak yang masih kuning terang, nilai IFT sebesar 24 dynes/cm, dan pH 5 menunjukkan bahwa minyak masih layak digunakan meskipun mulai mengalami proses penuaan alami.

Secara keseluruhan, minyak transformator ST-K01 masih berada pada kondisi baik, dengan kualitas isolasi yang masih tinggi. Pemeliharaan yang direkomendasikan adalah monitoring rutin tanpa memerlukan tindakan filtrasi atau penggantian minyak dalam waktu dekat.

B. Hasil Pengujian Sampel ST-632

Minyak transformator ST-632 memiliki Breakdown Voltage sebesar 48,62 kV, yang menunjukkan kemampuan dielektrik sangat baik dan lebih tinggi dibandingkan ST-K01 maupun ST-19B. Nilai ini menunjukkan bahwa minyak masih mampu menahan tegangan tinggi sebelum terjadi kegagalan isolasi.

Namun, parameter lain menunjukkan adanya indikasi awal degradasi. Nilai resistivitas sebesar 59,5 M Ω merupakan yang terendah di antara sampel operasi, sedangkan konduktivitas sebesar 0,016806 S/m merupakan yang tertinggi. Kedua hasil tersebut menunjukkan bahwa jumlah ion bebas di dalam minyak meningkat akibat adanya kontaminasi selama operasi.

Hasil pengujian kadar air sebesar 0,301% memperkuat indikasi tersebut. Kandungan air yang lebih tinggi dibandingkan ST-K01 dapat menyebabkan penurunan kemampuan isolasi apabila terus meningkat. Walaupun nilai BDV masih tinggi, peningkatan kadar air merupakan indikator awal yang perlu mendapat perhatian.

Nilai viskositas sebesar 4,44 cSt masih berada dalam batas yang dipersyaratkan sehingga kemampuan pendinginan minyak tetap baik. Dari sisi kimia, angka keasaman sebesar 0,05 mg KOH/g, warna kuning muda, IFT sebesar 27 dynes/cm, dan pH 5 menunjukkan bahwa minyak belum mengalami degradasi akibat oksidasi yang signifikan.

Secara keseluruhan, ST-632 masih layak beroperasi, tetapi memerlukan program pemantauan berkala dan filtrasi minyak apabila tren peningkatan kadar air terus berlanjut.

C. Hasil Pengujian Sampel ST-19B

Transformator ST-19B memiliki Breakdown Voltage sebesar 43,94 kV, yang masih berada di atas batas minimum standar IEC 60156. Hal ini menunjukkan bahwa minyak masih memiliki kemampuan dielektrik yang baik.

Namun, hasil pengujian menunjukkan bahwa ST-19B memiliki kadar air tertinggi, yaitu 0,373%. Nilai ini mengindikasikan bahwa minyak telah mengalami kontaminasi kelembapan yang lebih besar dibandingkan sampel lainnya. Kelembapan tersebut berpotensi mempercepat penurunan kualitas minyak apabila tidak dilakukan tindakan pemeliharaan.

Nilai resistivitas sebesar 61,9 M Ω dan konduktivitas sebesar 0,016155 S/m menunjukkan bahwa kandungan ion di dalam minyak meningkat sehingga kemampuan isolasinya mulai mengalami penurunan dibandingkan minyak baru. Walaupun demikian, karakteristik listrik minyak masih berada pada tingkat yang dapat diterima untuk operasi transformator.

Nilai viskositas sebesar 3,98 cSt menunjukkan bahwa minyak masih mampu melakukan proses pendinginan secara efektif. Pada parameter kimia, angka keasaman sebesar 0,05 mg KOH/g, IFT sebesar 27 dynes/cm, warna kuning muda, dan pH 5 menunjukkan bahwa proses oksidasi belum menjadi penyebab utama penurunan kualitas minyak.

Secara keseluruhan, ST-19B merupakan transformator yang memerlukan prioritas pemeliharaan tertinggi, terutama karena kadar airnya paling tinggi. Rekomendasi yang diberikan adalah melakukan vacuum dehydration, filtrasi minyak, pemeriksaan sistem *breather*, dan pemantauan berkala terhadap kualitas minyak.

D. Hasil Pengujian Sampel Minyak Baru

Minyak baru digunakan sebagai sampel pembanding. Hasil pengujian menunjukkan bahwa minyak baru memiliki kualitas terbaik hampir pada seluruh parameter.

Nilai Breakdown Voltage sebesar 54,88 kV merupakan yang tertinggi, menunjukkan kemampuan isolasi listrik yang sangat baik. Nilai resistivitas sebesar 120,3 M Ω juga merupakan yang tertinggi, sedangkan konduktivitas sebesar 0,008312 S/m merupakan yang terendah. Hal ini menunjukkan bahwa minyak baru masih sangat murni dan belum mengalami kontaminasi ion maupun degradasi selama operasi.

Nilai kadar air sebesar 0,094% relatif rendah, sedangkan viskositas sebesar 4,66 cSt masih memenuhi persyaratan untuk proses pendinginan transformator.

Pada parameter kimia, minyak baru memiliki angka keasaman paling rendah sebesar 0,03 mg KOH/g, IFT tertinggi sebesar 45 dynes/cm, warna kuning pucat, dan pH 5. Seluruh parameter tersebut menunjukkan bahwa minyak masih berada dalam kondisi awal dan belum mengalami proses penuaan maupun oksidasi.

Dengan demikian, minyak baru dapat dijadikan acuan kualitas dalam mengevaluasi kondisi minyak transformator yang telah digunakan. Perbandingan terhadap minyak baru menunjukkan bahwa penurunan kualitas pada ST-K01, ST-632, dan ST-19B masih berada pada tahap awal hingga sedang, sehingga tindakan pemeliharaan preventif lebih tepat dibandingkan penggantian minyak secara menyeluruh.

E. Hasil Hubungan antar Parameter

Evaluasi kualitas minyak transformator tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan satu parameter pengujian. Setiap parameter memiliki keterkaitan yang menunjukkan mekanisme degradasi minyak selama masa operasi. Oleh karena itu, analisis

hubungan antara *Breakdown Voltage* (BDV), kadar air, resistivitas, konduktivitas, viskositas, dan angka keasaman dilakukan untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi aktual minyak transformator

a) Pada Minyak Transformator ST-K01.

Berdasarkan hasil pengujian, minyak transformator ST-K01 memiliki nilai *Breakdown Voltage* (BDV) sebesar 39,04 kV, yang menunjukkan bahwa kemampuan dielektrik minyak masih memenuhi standar IEC 60156. Nilai BDV tersebut didukung oleh kadar air yang paling rendah, yaitu 0,070%, sehingga jumlah molekul air yang dapat membentuk jalur konduktif di dalam minyak relatif sedikit. Kondisi ini menyebabkan minyak masih mampu mempertahankan kekuatan isolasinya.

Parameter resistivitas sebesar 111,9 M Ω juga menunjukkan bahwa minyak masih memiliki kemampuan yang baik dalam menghambat aliran arus listrik. Nilai resistivitas yang tinggi berbanding terbalik dengan konduktivitas sebesar 0,008936 S/m, yang merupakan salah satu nilai terendah di antara sampel operasi. Hal ini mengindikasikan bahwa kandungan ion bebas di dalam minyak masih rendah sehingga karakteristik dielektrik tetap terjaga.

Dari aspek fisik, viskositas sebesar 3,09 cSt menunjukkan bahwa minyak masih memiliki kemampuan mengalir yang baik sehingga proses perpindahan panas dari belitan transformator menuju radiator tetap berlangsung secara efektif. Dengan demikian, kondisi pendinginan transformator tidak mengalami gangguan akibat perubahan karakteristik minyak.

Pada parameter kimia, ST-K01 memiliki angka keasaman sebesar 0,11 mg KOH/g, yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan sampel lainnya. Akan tetapi, nilai tersebut masih berada di bawah batas standar sehingga belum menyebabkan penurunan resistivitas maupun BDV secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa proses oksidasi minyak belum menjadi faktor utama yang memengaruhi kualitas minyak. Dengan demikian, kualitas minyak ST-K01 lebih dipengaruhi oleh rendahnya kadar air dibandingkan oleh peningkatan angka keasaman.

Secara keseluruhan, hubungan antarparameter pada ST-K01 menunjukkan bahwa rendahnya kadar air menyebabkan resistivitas tetap tinggi, konduktivitas rendah, dan BDV tetap baik, sedangkan peningkatan angka keasaman yang masih rendah belum memberikan dampak yang berarti terhadap performa minyak transformator.

b) Pada Minyak Transformator ST-632

Minyak transformator ST-632 memiliki *Breakdown Voltage* sebesar 48,62 kV, yang merupakan nilai tertinggi di antara minyak transformator yang telah digunakan. Nilai ini menunjukkan bahwa kemampuan dielektrik minyak masih sangat baik.

Namun demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar air mencapai 0,301%, lebih tinggi dibandingkan ST-K01. Peningkatan kadar air ini menyebabkan resistivitas turun menjadi 59,5 M Ω , sedangkan konduktivitas meningkat menjadi 0,016806

S/m. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar air, semakin banyak ion bebas yang terbentuk di dalam minyak sehingga kemampuan minyak menghambat arus listrik menjadi berkurang.

Walaupun resistivitas mengalami penurunan, nilai BDV masih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi penelitian, peningkatan kadar air belum cukup besar untuk menurunkan kekuatan dielektrik secara signifikan. Kemungkinan minyak masih memiliki tingkat kemurnian yang cukup baik sehingga masih mampu mempertahankan tegangan tembus yang tinggi.

Nilai viskositas sebesar 4,44 cSt menunjukkan bahwa karakteristik aliran minyak masih baik sehingga proses pendinginan transformator tetap optimal. Selain itu, angka keasaman sebesar 0,05 mg KOH/g menunjukkan bahwa proses oksidasi minyak masih sangat rendah. Oleh karena itu, penurunan resistivitas pada ST-632 lebih dipengaruhi oleh kontaminasi kelembapan dibandingkan degradasi kimia akibat oksidasi.

Secara keseluruhan, hubungan antarparameter pada ST-632 menunjukkan bahwa peningkatan kadar air menyebabkan resistivitas menurun dan konduktivitas meningkat, namun belum menyebabkan penurunan kemampuan dielektrik yang signifikan karena nilai BDV masih tinggi.

c) Pada Minyak Transformator ST-19B

Transformator ST-19B memiliki *Breakdown Voltage* sebesar 43,94 kV, yang masih memenuhi standar IEC 60156. Akan tetapi, sampel ini memiliki kadar air tertinggi, yaitu 0,373%, sehingga menunjukkan tingkat kontaminasi kelembapan yang paling besar dibandingkan sampel lainnya.

Peningkatan kadar air tersebut diikuti oleh penurunan resistivitas menjadi 61,9 M Ω dan peningkatan konduktivitas menjadi 0,016155 S/m. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa keberadaan air meningkatkan jumlah ion bebas di dalam minyak sehingga kemampuan isolasinya mulai mengalami penurunan.

Meskipun demikian, nilai BDV masih berada di atas standar sehingga minyak masih mampu menjalankan fungsinya sebagai media isolasi. Hal ini menunjukkan bahwa degradasi minyak masih berada pada tahap awal dan belum menyebabkan kegagalan dielektrik.

Nilai viskositas sebesar 3,98 cSt masih menunjukkan kemampuan pendinginan yang baik. Selain itu, angka keasaman sebesar 0,05 mg KOH/g masih tergolong rendah sehingga proses oksidasi belum menjadi penyebab utama penurunan kualitas minyak.

Hubungan antarparameter pada ST-19B memperlihatkan bahwa kadar air merupakan faktor dominan yang memengaruhi resistivitas dan konduktivitas, sedangkan perubahan angka keasaman belum memberikan pengaruh yang nyata terhadap karakteristik listrik minyak.

Berdasarkan keseluruhan parameter, ST-19B merupakan transformator yang paling membutuhkan tindakan pemeliharaan karena menunjukkan indikasi degradasi paling tinggi akibat kontaminasi air.

d) Pada Minyak Baru

Minyak baru digunakan sebagai sampel referensi untuk menggambarkan karakteristik minyak transformator sebelum digunakan pada sistem tenaga listrik.

Minyak baru memiliki Breakdown Voltage sebesar 54,88 kV, yang merupakan nilai tertinggi pada penelitian ini. Nilai tersebut didukung oleh resistivitas sebesar 120,3 M Ω , yang menunjukkan kemampuan isolasi listrik yang sangat baik. Sebaliknya, konduktivitas hanya sebesar 0,008312 S/m, yang menunjukkan bahwa kandungan ion bebas di dalam minyak masih sangat rendah.

Nilai kadar air sebesar 0,094% juga tergolong rendah sehingga tidak memberikan pengaruh terhadap karakteristik dielektrik minyak. Rendahnya kandungan air menyebabkan minyak mampu mempertahankan resistivitas yang tinggi sekaligus menjaga nilai BDV tetap optimal.

Selain itu, viskositas sebesar 4,66 cSt masih memenuhi persyaratan IEC 60296 sehingga proses perpindahan panas berlangsung secara optimal. Pada parameter kimia, minyak baru memiliki angka keasaman paling rendah sebesar 0,03 mg KOH/g, IFT tertinggi sebesar 45 dynes/cm, dan warna minyak yang masih kuning pucat. Kondisi ini menunjukkan bahwa minyak belum mengalami proses oksidasi maupun kontaminasi selama penggunaan.

Secara keseluruhan, hubungan antarparameter pada minyak baru menunjukkan kondisi yang ideal, yaitu kadar air rendah menghasilkan resistivitas tinggi, konduktivitas rendah, angka keasaman sangat kecil, dan nilai BDV tertinggi. Oleh karena itu, minyak baru digunakan sebagai acuan (baseline) dalam mengevaluasi tingkat degradasi minyak transformator yang telah beroperasi.

Analisis hubungan antarparameter menunjukkan bahwa kadar air merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap penurunan kualitas minyak transformator. Peningkatan kadar air diikuti oleh penurunan resistivitas dan peningkatan konduktivitas, yang pada akhirnya dapat menurunkan kemampuan dielektrik minyak. Sebaliknya, angka keasaman belum menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik listrik minyak karena nilainya masih berada pada tingkat yang rendah. Sementara itu, viskositas masih memenuhi standar operasional sehingga belum menjadi faktor pembatas dalam kinerja minyak sebagai media pendingin.

F. Analisis Risiko Operasi

Berdasarkan evaluasi seluruh parameter, seluruh sampel minyak transformator masih memenuhi persyaratan IEC 60156, IEC 60296, dan SPLN, sehingga masih layak digunakan sebagai media isolasi dan pendingin transformator, terdapat perbedaan kualitas antar sampel.

Minyak baru menunjukkan karakteristik terbaik pada seluruh parameter karena belum mengalami proses penuaan maupun kontaminasi. ST-K01 juga masih memiliki kualitas yang baik meskipun angka keasamannya sedikit lebih tinggi

dibandingkan sampel lainnya. Sementara itu, ST-632 dan ST-19B menunjukkan indikasi awal penurunan kualitas akibat peningkatan kadar air yang berdampak pada penurunan resistivitas dan peningkatan konduktivitas. Walaupun kondisi tersebut belum menyebabkan kegagalan isolasi, kedua transformator tersebut memerlukan program Condition Based Maintenance (CBM) berupa filtrasi minyak, *vacuum dehydration*, pemeriksaan sistem *breather*, serta pemantauan kualitas minyak secara berkala agar keandalan transformator tetap terjaga selama masa operasi.

G. Prioritas Pemeliharaan

Berdasarkan hasil pengujian *Breakdown Voltage* (BDV), viskositas, kadar air, resistivitas, konduktivitas, dan angka keasaman, seluruh sampel minyak transformator masih memenuhi persyaratan operasional berdasarkan standar IEC dan SPLN. Namun demikian, hasil evaluasi menunjukkan adanya variasi kualitas minyak pada setiap transformator. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan yang diterapkan tidak hanya berorientasi pada penggantian minyak, tetapi lebih mengutamakan Condition Based Maintenance (CBM), yaitu pemeliharaan yang didasarkan pada kondisi aktual minyak transformator.

Pendekatan ini memungkinkan tindakan pemeliharaan dilakukan secara tepat waktu sesuai tingkat degradasi minyak, sehingga biaya operasional dapat ditekan tanpa mengurangi tingkat keandalan transformator.

1) Penentuan Prioritas Pemeliharaan

Prioritas pemeliharaan ditentukan berdasarkan hasil evaluasi seluruh parameter pengujian. Penentuan prioritas dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi dielektrik, kandungan air, karakteristik kelistrikan, serta tingkat degradasi kimia minyak transformator.

TABEL 5
PRIORITAS PEMELIHARAAN TRANSFORMATOR

Transformator	Kondisi Hasil Pengujian	Tingkat Prioritas	Rekomendasi
ST-19B	Kadar air tertinggi, resistivitas relatif rendah, konduktivitas meningkat	Prioritas I (Tinggi)	Filtrasi minyak, <i>vacuum dehydration</i> , inspeksi <i>breather</i> , monitoring berkala
ST-632	Kadar air tinggi, resistivitas menurun, konduktivitas meningkat	Prioritas II (Sedang)	Filtrasi minyak dan monitoring kualitas minyak
ST-K01	Seluruh parameter masih baik, angka keasaman sedikit lebih tinggi namun masih memenuhi standar	Prioritas III (Rendah)	Pemantauan rutin sesuai jadwal
Minyak Baru	Seluruh parameter terbaik	Tidak Memerlukan Tindakan	Monitoring berkala sebagai data pembanding

Transformator ST-19B menjadi prioritas utama karena memiliki kadar air paling tinggi di antara transformator operasi. Kadar air yang tinggi berpotensi menurunkan kemampuan isolasi minyak apabila tidak segera dikendalikan.

Transformator ST-632 juga memerlukan perhatian karena menunjukkan kecenderungan degradasi yang serupa, meskipun tingkatnya lebih rendah dibandingkan ST-19B.

ST-K01 masih menunjukkan karakteristik minyak yang baik. Walaupun angka keasamannya sedikit lebih tinggi, nilainya masih berada dalam batas standar sehingga belum memerlukan tindakan korektif.

2) Strategi Condition Based Maintenance (CBM)

Pendekatan Condition Based Maintenance (CBM) dilakukan berdasarkan kondisi aktual minyak transformator, bukan berdasarkan umur operasi.

TABEL 6
STRATEGI CBM

Parameter	Kondisi	Tindakan
Breakdown Voltage menurun	<40 kV	Filtrasi minyak dan pengujian ulang
Kadar air meningkat	Lebih tinggi dibanding hasil sebelumnya	<i>Vacuum dehydration</i> dan pemeriksaan kebocoran
Resistivitas menurun	menurun	Pemeriksaan kontaminasi minyak
Konduktivitas meningkat	meningkat	Analisis penyebab kontaminasi
Angka keasaman meningkat	meningkat	Regenerasi atau penggantian minyak bila diperlukan

Pendekatan CBM memiliki beberapa keunggulan dibandingkan pemeliharaan berbasis waktu (*time-based maintenance*), yaitu:

- Tindakan pemeliharaan dilakukan berdasarkan kondisi aktual minyak
- Mencegah penggantian minyak yang belum diperlukan
- Mendeteksi penurunan kualitas minyak lebih dini
- Meningkatkan keandalan transformator dan
- Mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang.

Berdasarkan hasil penelitian, penerapan CBM dinilai lebih sesuai karena seluruh transformator masih memenuhi standar operasional, sehingga tindakan korektif cukup difokuskan pada unit yang menunjukkan penurunan kualitas.

3) Jadwal Monitoring yang Direkomendasikan

Berdasarkan kondisi masing-masing transformator, jadwal pemantauan kualitas minyak dapat disusun sebagai berikut

TABEL 7
JADWAL PEMANTAUAN

Transformator	Pemeriksaan Visual	Pengujian Minyak	Evaluasi Menyeluruh
ST-19B	Setiap 1 bulan	Setiap 3 bulan	Setiap 6 bulan

ST-632	Setiap 1 bulan	Setiap 6 bulan	Setiap 12 bulan
ST-K01	Setiap 3 bulan	Setiap 12 bulan	Setiap 12 bulan
Minyak Baru	Sebelum digunakan	Setelah pengisian awal	Sesuai program pemeliharaan

Pada setiap periode pengujian disarankan dilakukan pemeriksaan terhadap:

1. *Breakdown Voltage* (BDV).
2. Kadar air.
3. Resistivitas.
4. Konduktivitas.
5. Angka keasaman.
6. Viskositas.
7. Warna minyak.
8. Kebersihan *breather*.
9. Kondisi sistem konservator.
10. Kebocoran transformator.

4) Manfaat Implementasi Rekomendasi

Penerapan rekomendasi pemeliharaan berdasarkan hasil penelitian diharapkan memberikan beberapa manfaat sebagai berikut.

TABEL 8
MANFAAT PROGRAM PEMELIHARAAN

Program	Dampak
Monitoring kadar air	Mencegah penurunan kemampuan isolasi
Filtrasi minyak	Mengurangi kandungan kontaminan
<i>Vacuum dehydration</i>	Menurunkan kadar air dalam minyak
Monitoring resistivitas	Mempertahankan karakteristik dielektrik
Monitoring BDV	Menjamin kemampuan isolasi tetap memenuhi standar
Pemeriksaan <i>breather</i>	Mengurangi masuknya kelembapan
Evaluasi berkala	Memperpanjang umur minyak dan transformator

Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh minyak transformator masih memenuhi persyaratan operasional, sehingga penggantian minyak secara menyeluruh belum diperlukan. Strategi yang lebih tepat adalah melakukan Condition Based Maintenance (CBM) dengan fokus pada pemantauan berkala dan tindakan preventif pada unit yang menunjukkan indikasi awal degradasi.

Dari hasil evaluasi, ST-19B menjadi prioritas utama karena memiliki kadar air tertinggi dan kecenderungan penurunan karakteristik kelistrikan. ST-632 menjadi prioritas kedua karena menunjukkan pola degradasi yang serupa, sedangkan ST-K01 masih berada pada kondisi yang relatif stabil. Dengan menerapkan filtrasi minyak, *vacuum dehydration*, pemeriksaan sistem *breather*, serta pemantauan parameter utama secara berkala, kualitas minyak dapat dipertahankan sehingga risiko kegagalan isolasi dapat diminimalkan dan umur operasi transformator dapat diperpanjang.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis kualitas minyak transformator pada transformator distribusi PT Pertamina EP Zona 9 Asset 5 Sangasanga Field yang meliputi pengujian tegangan tembus (*Breakdown Voltage*), densitas, viskositas, kadar air, resistivitas, konduktivitas, dan keasaman, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Kualitas minyak transformator berdasarkan hasil pengujian *Breakdown Voltage* (BDV), viskositas, kadar air, konduktivitas, resistivitas, dan keasaman menunjukkan bahwa seluruh sampel masih memenuhi persyaratan kelayakan operasi berdasarkan standar IEC 60156, IEC 60296, dan pedoman SPLN. Nilai tegangan tembus seluruh sampel berada di atas batas minimum 30 kV, viskositas masih mendukung proses pendinginan, serta angka keasaman masih berada di bawah batas yang dipersyaratkan. Namun demikian, transformator ST-19B dan ST-632 menunjukkan indikasi kualitas minyak yang mulai mengalami penurunan dibandingkan minyak baru dan transformator ST-K01, ditandai dengan kadar air yang lebih tinggi serta nilai resistivitas yang lebih rendah.
2. Faktor utama yang mempengaruhi penurunan kualitas minyak transformator pada penelitian ini adalah meningkatnya kadar air yang menyebabkan penurunan sifat dielektrik minyak, ditunjukkan dengan menurunnya resistivitas dan meningkatnya konduktivitas. Sehingga berpotensi menurunkan kemampuan isolasi, meningkatnya arus bocor, *partial discharge*, percepatan penuaan isolasi kertas, dan kenaikan temperatur operasi transformator.
3. Berdasarkan hasil analisis, transformator ST-19B menjadi prioritas utama untuk dilakukan tindakan pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition Based Maintenance*), seperti filtrasi minyak, *vacuum dehydration*, dan pemantauan kualitas minyak secara berkala. Transformator ST-632 juga memerlukan pemantauan dan pemeliharaan preventif, sedangkan transformator ST-K01 masih berada dalam kondisi operasi yang baik dan cukup dilakukan monitoring berkala untuk menjaga kondisi transformator.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Pertamina EP Asset 5 Sangasanga Field atas kesempatan, dukungan, dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, serta masukan selama proses penelitian dan penyusunan ini. Apresiasi turut disampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] K. F. H. Putra, L. S. Patras, and M. Tuegeh, "Analysis of transformer oil testing at PT PLN (Persero) Skyline Substation," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 15, no. 2, pp. 1–7, 2023.
- [2] PT PLN (Persero), *Pedoman Pemeliharaan Transformator*, revisi KEPDIR No. 0520 K/DIR/2014, 2024.
- [3] C, Widyastuti dan R, Wisnuaji, "Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator Di PT, PLN (Persero) Bogor," *Elektron J, Ilm.*, vol. 11, hlm, 75–78, Des 2019, doi: 10.30630/eji,11,2,128,
- [4] E, Suherman dan M, Akbar, "Analisis Karakteristik Minyak Transformator Starlite 400 Kva Terhadap Tegangan Tembus," no, 1, 2020,
- [5] C, Widyastuti, T, Darmana, dan O, Handayani, "Pengaruh Kadar Air Terhadap Tegangan Tembus Minyak Transformator Distribusi," *Energi Kelistrikan*, vol. 10, no, 2, hlm, 129–136, Jan 2019, doi: 10.33322/energi,v10i2,232\
- [6] N, M, Seniari, I, F, Citarsa, dan A, Ningsih, "Korelasi Antara Sifat Listrik Dengan Sifat Fisika Dan Sifat Kimia Dari Minyak Transformator: Corelation Oil Transformer properties," *DIELEKTRIKA*, vol. 8, no, 2, hlm, 118–125, Agu 2021,
- [7] A, Siswanto, A, Rohman, S, Suprijadi, M, Baehaqi, dan A, Arifudin, "Analisis Karakteristik Minyak Transformator Menggunakan Pengujian Dissolved Gas Analysis (Dga) Pada Ibt 1 Gardu Induk," *Foristek*, vol. 12, no, 1, hlm, 30–42, Mei 2022, doi: 10.54757/fs,v12i1,142,
- [8] "(PDF) Analisis Pengaruh Purifikasi (Filtering) Terhadap Kualitas Tegangan Tembus Minyak Transformator," *ResearchGate*, Agu 2025, doi: 10.26877/jeti,v2i1,110,
- [9] Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta, Indonesia: PT Gramedia, 1988.