

ANALISIS PENGARUH BEBAN TERHADAP EFISIENSI DAN SUSUT UMUR TRANSFORMATOR KERING 630KVA DI MODA RAYA TERPADU JAKARTA

Raja Ali Adami, Chairul G. Irianto, Tyas Kartika Sari*) dan Ishak Kasim

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Trisakti, Jakarta, Indonesia

*) E-mail: tyas.kartika@trisakti.ac.id

Abstrak

Kehandalan suatu sistem tenaga listrik ditentukan juga oleh peralatan dalam sistem tenaga listrik. Salah satu peralatan sistem tenaga listrik yang sangat penting fungsinya adalah transformator yang digunakan untuk operasional di Moda Raya Terpadu Jakarta yaitu Transformator berjenis kering. Penelitian yang dilakukan untuk menganalisis penyusutan umur, pengaruh beban terhadap masa pakai, besarnya efisiensi dan menganalisis pengaruh pembebanan yang berlangsung pada transformator kering di stasiun MRT Lebak Bulus dan stasiun MRT Fatmawati. Penelitian ini mencakup banyak metode penelitian dengan menghitung rasio pembebanan, suhu transformator, penyusutan umur selama 24 jam serta % susut umur transformator sehingga dapat diketahui hasil sisa umur transformator. Persentase pembebanan yang didapatkan distasiun MRT Lebak Bulus dengan hasil terendah hingga tertinggi mencapai 10,57% LWBP dan 16,64% WBP sedangkan persentase pembebanan stasiun MRT Fatmawati memiliki hasil lebih tinggi yaitu 9,95% LWBP dan 18,25% WBP. Hasil penyusutan umur Stasiun MRT Lebak Bulus sebesar 0,05925% dengan sisa usia pakai transformator kering selama 14,1945 tahun. Hasil penyusutan umur transformator kering pada stasiun MRT Fatmawati sebesar 0,06% dengan sisa usia transformator kering selama 14,19 tahun. Hasil perhitungan yang didapatkan yaitu Efisiensi pada transformator kering stasiun MRT Fatmawati lebih besar dengan hasil rata-rata 96,94% dan efisiensi yang didapat pada stasiun MRT Lebak Bulus adalah 96,99%.

Kata kunci: Transformator Kering, Pembebanan Transformator, Suhu Belitan, Umur Transformator, Efisiensi Transformator.

Abstract

The reliability of an electrical power system is also determined by the equipment within the power system. One of the most important equipment is the transformer, which is used for operations in the Jakarta MRT, namely the dry-type transformer. The research was conducted to analyze the service life reduction, the effect of load on service life, the amount of efficiency, and to analyze the effect of loading that occurs in dry transformers at the Lebak Bulus MRT station and the Fatmawati MRT station. The percentage of loading obtained at the Lebak Bulus MRT station with the lowest to highest results reached 10.57% LWBP and 16.64% WBP, while the percentage of loading at the Fatmawati MRT station had higher results, namely 9.95% LWBP and 18.25% WBP. The results of the service life reduction at Lebak Bulus MRT Station were 0.05925% with the remaining service life of the dry transformer for 14.1945 years. The results of the dry transformer service life reduction at the Fatmawati MRT station were 0.06% with the remaining service life of the dry transformer for 14.19 years. The calculation results obtained are that the efficiency of the dry transformer at the Fatmawati MRT station is greater with an average result of 96.94% and the efficiency obtained at the Lebak Bulus MRT station is 96.99%.

Keywords: Dry Transformer, Transformer Loading, Winding Temperature, Transformer Life, Transformer Efficiency.

1. Pendahuluan

Transportasi publik menjadi kebutuhan yang penting dalam di masyarakat. Transportasi publik di Indonesia ada bermacam-macam salah satunya transportasi darat yaitu moda transportasi publik berbasis rel yang dapat mengangkut banyak penumpang dalam satu waktu dengan cepat dan efisien.

PT MRT Jakarta sebagai operator kereta Moda Raya Terpadu Jakarta diharapkan dapat menjadi solusi kemacetan di Ibu kota Jakarta dan menjadi andalan masyarakat Jakarta dalam bertransportasi yang cepat, aman, murah dan nyaman. Dengan upaya untuk mempertahankan kehandalan dan kestabilan suatu sistem tenaga listrik PT MRT Jakarta melakukan pengecekan dan memberikan perhatian yang penting untuk memantau kondisi dari komponen-komponen dari suatu sistem tenaga

listrik yang telah ada. Salah satu peralatan dalam penyaluran tenaga listrik yang sangat penting fungsinya adalah transformator [1].

Transformator yang digunakan untuk operasional Moda Raya Terpadu Jakarta adalah transformator yang berjenis kering (Dry Type), terdapat banyak faktor yang bisa mengakibatkan performa dari sebuah transformator menurun [2]. Salah satu faktor yang bisa menurunkan performa transformator adalah pembebanan yang berlebih yang akan berpengaruh juga terhadap efisiensi dan umur transformator [3], [4].

Penelitian ini akan menganalisa susut umur dan efisiensi transformator kering di PT MRT Jakarta pada dua tempat yaitu stasiun Lebak Bulus dan Stasiun Fatmawati sebagai indikator pertimbangan untuk mempertahankan kehandalan dan kestabilan suatu sistem tenaga listrik Moda Raya Terpadu Jakarta.

2. Metode

2.1. Transformator kering atau Dry Type Transformator

Transformator kering atau Dry Type Transformator merupakan jenis transformator yang menggunakan pendingin AN/AF (Air Natural/Air Force). Pada jenis transformator ini, rangkaian magnet dari gulungan tidak terendam dalam cairan isolasi, standar yang digunakan untuk penggunaan transformator ini adalah IEC, IEEE/ANSI, yaitu IEC 60076-11 dan IEEE C57.12.01.

Ada dua jenis transformator kering, yaitu:

2.1.1. Enclosed Dry Type Transformator

Transformator dalam kotak tertutup yang memiliki ventilasi dan didinginkan oleh sirkulasi udara dari luar.

2.1.2. Non Enclosed Dry Type Transformator

Peralatan transformator yang tidak dilengkapi dengan penutup pelindung yang didinginkan oleh ventilasi udara alami atau buatan. Ada beberapa keuntungan yang diberikan untuk penggunaan Transformator Kering, yaitu [5], [6]:

- a. Tahan Api.
- b. Kemampuan terhadap hubung singkat lebih tinggi.
- c. Moisture Proof.
- d. Maintenance Lebih Mudah.

2.2. Rasio Pembebanan

Perbandingan beban atau rasio pembebanan adalah perbandingan antara beban yang diterapkan pada transformator distribusi saat terjadi waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak (LWBP) terhadap ratingnya. Berikut ini rumus dari rasio pembebanan:

$$K = \frac{S}{S_r} \quad (1)$$

Nilai s bisa dicari dengan:

$$S = S_r \times \% \text{ Pembebanan Yang Dihasilkan}$$

Keterangan:

- K = Rasio Pembebanan Transformator
 S = Daya Beban Transformator (kVA)
 S_r = Kapasitas Transformator (kVA)

2.3. Kenaikan Suhu Hot spot (Continuous Loading)

Untuk mendapatkan lokasi paling panas pada suhu kumparan transformator dapat menggunakan [7]:

$$\theta_{HS} = \theta_{\alpha} + \Delta\theta_{HS} \quad (2)$$

Keterangan:

- θ_{HS} = Suhu tertinggi pada belitan ($^{\circ}\text{C}$)
 θ_{α} = Suhu lingkungan ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_{HS}$ = Kenaikan suhu tertinggi diatas suhu lingkungan ($^{\circ}\text{C}$)

Disaat terjadi kenaikan suhu belitan dalam kondisi beban steady state dan trafo beroperasi dapat dihitung dengan:

$$\Delta\theta_{HS} = \Delta\theta_{HS,r} \times [L]^{2m} \quad (3)$$

Keterangan:

- $\Delta\theta_{HS}$ = Kenaikan suhu tertinggi diatas suhu lingkungan ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_{HS,r}$ = Kenaikan suhu titik terpanas yang terukur diatas suhu lingkungan 1,0 per unit beban ($^{\circ}\text{C}$)
 L = Beban persatuan
 m = Konstanta Empiris

Penentuan nilai relatif usia transformator didasarkan pada suhu yang terjadi ketika transformator mengalami hotspot. Nilai ini dapat diamati atau dihitung menggunakan persamaan, sebagai berikut [8]:

$$V = \frac{\text{laju penggunaan umur disaat } \theta_h}{\text{laju penggunaan umur disaat } \theta_{cr}} \quad (4)$$

Keterangan:

- V = Nilai relative umur transformator
 θ_{cr} = 98°C

Estimasi besar penurunan usia dapat dihitung dengan menggunakan rumus, [15] sebagai berikut:

$$\text{Susut umur selama 24 jam} = (\text{susut umur LWBP} \times t) + (\text{susut umur WBP} \times t) \quad (5)$$

Keterangan:

- t = Waktu LWBP dan WBP (jam)
 LWBP = Luar Waktu Beban Puncak (05.00-16.00)
 WBP = Waktu Beban Puncak (17.00-00.00)

Setelah itu, pengolahan data yang dilakukan adalah persentase susut umur relative yang bisa dirumuskan dengan:

$$\% \text{ Susut umur relatif} = \frac{\text{Susut Umur 24 jam}}{24 \text{ jam}} \times 100\% \quad (6)$$

Maka, perkiraan sisa umur transformator bisa dicari dengan persamaan:

$$n = (\text{tahun produksi-tahun operasi}) \times \% \text{ susut umur} \quad (7)$$

Keterangan:

n = masa pakai transformator

2.4. Efisiensi Transformator

Transformator akan berkerja dengan baik atau optimal apabila memiliki efisiensi 100%, yang berarti tidak ada hilangnya daya dalam trafo tersebut. Namun, sangat jarang bahkan hampir tidak mungkin untuk menemukan transformator dengan efisiensi 100% karena ada beberapa faktor atau penyebab yang menyebabkan hilangnya daya dan kerugian dalam trafo [9], [10]. Biasanya, hal ini disebabkan oleh kehilangan inti besi dan kehilangan tembaga yang terjadi pada kumparan atau lilitan dalam trafo.

Efisiensi transformator sering kali dikenal sebagai rasio antara daya keluaran listrik (P_{out}) dan daya masukan listrik (P_{in}). Untuk menghitung efisiensi transformator, dapat digunakan menggunakan rumus [11], [12]:

$$P_{cu} = I^2 \times R \quad (8)$$

$$P_{in} = P_{out} + (P_{beban nol} + P_{cu}) \quad (9)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (10)$$

Keterangan:

- η = Efisiensi
- P_{out} = Daya keluaran (kW)
- P_{in} = Daya masukan (kW)
- $P_{beban nol}$ = Rugi beban nol
- P_{cu} = Rugi tembaga

Menurut IEC 60076-11 dan penjelasan dari PT. Trafindo Prima Perkasa, pabrik transformator tipe kering kerugiaan standar pada transformator tipe kering dibagi menjadi beberapa kategori sebagai berikut:

Tabel 1. Kategori Transformasi Kering

| Daya (kVA) | Rugi (Watt) | | Impedansi (%) | Group Vektor |
|------------|-------------|-------------|---------------|--------------|
| | Tanpa Beban | Beban Penuh | | |
| 630 | 2200 | 8000 | 4 | DYn5 |

Transformator kering yang digunakan di stasiun MRT Lebak Bulus dan Stasiun MRT Fatmawati memiliki kapasitas yang sama yaitu 630kVA.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Stasiun MRT Lebak Bulus

Berikut adalah informasi mengenai beban yang dihasilkan dari transformator distribusi kering yang akan dianalisis:

Tabel 2. Spesifikasi Transformator Kering Stasiun MRT Lebak Bulus

| Kode Nama Trafo | Distribution Transformer (Dry Type Cast Resin) |
|------------------------------|--|
| Merk | PT. Trafindo Prima Perkasa |
| Jumlah Fasa | 3 |
| Frekuensi | 50 Hz |
| Kapasitas Transformator | 630 kVA |
| Tegangan Primer | 20000 V |
| Tegangan Sekunder | 380 V |
| Arus Primer | 18,17 A |
| Arus Sekunder | 957,19 A |
| Impedansi | 4% |
| Kenaikan Temperatur Maksimum | 100°C |
| Tahun Produksi | 2017 |
| Tipe Pendingin | AN |
| Grup Vektor | Dyn-5 |
| Rugi Beban Nol | 2200 |
| Rugi Berbeban | 8000 |
| Kelas Isolasi | F |

Tabel 3. Pembedaan Transformator Kering Stasiun MRT Lebak Bulus

| Data Pembebanan Transformator Kering Stasiun MRT Lebak Bulus | | | | | |
|--|----------------|--------|-------|-------------------|--------------|
| No | Tanggal/Waktu | V (kV) | I (A) | Persen Pembebanan | P Ouput (kW) |
| 1 | 8/5/2023 1:00 | 19,77 | 1,37 | 7,44% | 41,65 |
| 2 | 8/5/2023 2:00 | 19,85 | 1,57 | 8,56% | 47,77 |
| 3 | 8/5/2023 3:00 | 20,03 | 1,59 | 8,75% | 50,09 |
| 4 | 8/5/2023 4:00 | 19,98 | 1,87 | 10,27% | 61,27 |
| 5 | 8/5/2023 5:00 | 19,93 | 1,93 | 10,57% | 62,38 |
| 6 | 8/5/2023 6:00 | 19,86 | 2,07 | 11,30% | 66,77 |
| 7 | 8/5/2023 7:00 | 19,99 | 2,09 | 11,48% | 68,64 |
| 8 | 8/5/2023 8:00 | 20,11 | 2,04 | 11,27% | 67,71 |
| 9 | 8/5/2023 9:00 | 20,07 | 2,01 | 11,09% | 66,29 |
| 10 | 8/5/2023 10:00 | 19,92 | 2,29 | 12,54% | 75,21 |
| 11 | 8/5/2023 11:00 | 20,01 | 2,33 | 12,81% | 76,06 |
| 12 | 8/5/2023 12:00 | 19,76 | 2,61 | 14,17% | 79,41 |
| 13 | 8/5/2023 13:00 | 19,82 | 2,77 | 15,09% | 83,81 |
| 14 | 8/5/2023 14:00 | 20,00 | 2,37 | 13,03% | 77,38 |
| 15 | 8/5/2023 15:00 | 20,00 | 2,33 | 12,81% | 76,04 |
| 16 | 8/5/2023 16:00 | 19,82 | 2,77 | 15,09% | 83,81 |
| 17 | 8/5/2023 17:00 | 19,91 | 3,04 | 16,64% | 97,48 |
| 18 | 8/5/2023 18:00 | 19,99 | 2,84 | 15,60% | 93,20 |
| 19 | 8/5/2023 19:00 | 20,02 | 2,81 | 15,46% | 92,09 |
| 20 | 8/5/2023 20:00 | 20,02 | 2,84 | 15,63% | 93,19 |
| 21 | 8/5/2023 21:00 | 20,02 | 2,80 | 15,41% | 91,85 |
| 22 | 8/5/2023 22:00 | 19,94 | 2,66 | 14,58% | 86,81 |
| 23 | 8/5/2023 23:00 | 20,01 | 2,27 | 12,48% | 75,53 |
| 24 | 9/5/2023 0:00 | 20,02 | 2,18 | 11,99% | 70,67 |

Pada tabel 3 merupakan hasil data pembebanan yang telah diambil di stasiun MRT Lebak Bulus pada tanggal 8 mei 2023 yang dimulai pada pukul 01.00 WIB – 00.00 WIB.

Tabel 4. Suhu Belitan Transformator Kering Stasiun MRT Lebak Bulus

| No | Tanggal/Waktu | Transformator Kering | | | Suhu Tertinggi |
|----|------------------|-------------------------|--------|--------|----------------|
| | | Stasiun MRT Lebak Bulus | | | |
| | | Suhu Belitan 3 Fasa | | | |
| R | S | T | | | |
| 1 | 08/05/2023 01:00 | 45,8°C | 46,7°C | 46,2°C | 46,7°C |
| 2 | 08/05/2023 02:00 | 46,9°C | 47,4°C | 44,3°C | 47,4°C |
| 3 | 08/05/2023 03:00 | 46,7°C | 45,3°C | 47,9°C | 47,9°C |
| 4 | 08/05/2023 04:00 | 46,9°C | 47,4°C | 48,3°C | 48,3°C |
| 5 | 08/05/2023 05:00 | 48,4°C | 46,3°C | 49,2°C | 49,2°C |
| 6 | 08/05/2023 06:00 | 49,4°C | 50,8°C | 50,1°C | 50,8°C |
| 7 | 08/05/2023 07:00 | 51,5°C | 51,3°C | 51,9°C | 51,9°C |
| 8 | 08/05/2023 08:00 | 49,3°C | 50,6°C | 49,8°C | 50,6°C |
| 9 | 08/05/2023 09:00 | 50,2°C | 49,9°C | 50,1°C | 50,2°C |
| 10 | 08/05/2023 10:00 | 51,2°C | 52,3°C | 52,3°C | 52,3°C |
| 11 | 08/05/2023 11:00 | 51,9°C | 52,2°C | 52,6°C | 52,6°C |
| 12 | 08/05/2023 12:00 | 54,6°C | 52,4°C | 53,2°C | 54,6°C |
| 13 | 08/05/2023 13:00 | 53,8°C | 51,3°C | 52,5°C | 53,8°C |
| 14 | 08/05/2023 14:00 | 51,9°C | 53,1°C | 52,7°C | 53,1°C |
| 15 | 08/05/2023 15:00 | 53,3°C | 53,1°C | 53,1°C | 53,3°C |
| 16 | 08/05/2023 16:00 | 55,4°C | 53,6°C | 54,4°C | 56,1°C |
| 17 | 08/05/2023 17:00 | 57,9°C | 54,2°C | 55,9°C | 57,9°C |
| 18 | 08/05/2023 18:00 | 55,5°C | 56,8°C | 56,3°C | 56,8°C |
| 19 | 08/05/2023 19:00 | 56,4°C | 55,9°C | 56,3°C | 56,4°C |
| 20 | 08/05/2023 20:00 | 56,2°C | 56,9°C | 56,9°C | 56,9°C |
| 21 | 08/05/2023 21:00 | 56,1°C | 56,2°C | 55,8°C | 56,2°C |
| 22 | 08/05/2023 22:00 | 53,5°C | 52,8°C | 55,9°C | 55,9°C |
| 23 | 08/05/2023 23:00 | 50°C | 49,3°C | 52,2°C | 52,2°C |
| 24 | 09/05/2023 00:00 | 49,1°C | 52°C | 51,3°C | 52°C |

Pada tabel 4 merupakan hasil data suhu belitan yang telah diambil di stasiun MRT Lebak Bulus pada tanggal 8 mei 2023 yang dimulai pada pukul 01.00 WIB – 00.00 WIB. Selanjutnya data tersebut akan diajukan acuan untuk menghitung.

3.1.1. Rasio Beban

Kondisi Luar Waktu Beban Puncak

$$K = \frac{66,59 \text{ kVA}}{630 \text{ kVA}} = 0,1056$$

Kondisi Waktu Beban Puncak

$$K = \frac{104,83 \text{ kVA}}{630 \text{ kVA}} = 0,1663$$

3.1.2. Perhitungan Temperature Hotspot

Apabila suhu naik dalam kondisi beban steady state dan transformator beroperasi dengan system pendingin mandiri, rumus perhitungan didasarkan pada berikut ini:

Kondisi LWBP:

$$\Delta\theta_{HS} = 49,2^\circ\text{C} \times [0,1056]^{2 \times 0,8} = 1,34^\circ\text{C}$$

Kondisi WBP:

$$\Delta\theta_{HS} = 57,9^\circ\text{C} \times [0,1663]^{2 \times 0,8} = 3,28^\circ\text{C}$$

Maka, bisa dicari kenaikan temperature hotspot dengan rumus sebagai berikut:

Kondisi LWBP:

$$\theta_{HS} = 31,3^\circ\text{C} + 1,34^\circ\text{C} = 32,64^\circ\text{C}$$

Kondisi WBP:

$$\theta_{HS} = 32,5^\circ\text{C} + 3,28^\circ\text{C} = 35,78^\circ\text{C}$$

3.1.3. Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif

Kondisi LWBP:

$$V = 2^{\frac{(32,64^\circ\text{C} - 98^\circ\text{C})}{6}} = 0,0005257 \text{ p.u}$$

Kondisi WBP:

$$V = 2^{\frac{(35,78^\circ\text{C} - 98^\circ\text{C})}{6}} = 0,0007556 \text{ p.u}$$

3.1.4. Menghitung Susut Umur Selama Satu Hari (24 Jam)

Susut umur selama 24 jam:

$$(0,0005257 \text{ p.u} \times 17 \text{ jam}) + (0,0007556 \text{ p.u} \times 7 \text{ Jam}) = 0,01422 \text{ jam}$$

$$\% \text{ susut umur relatif} = \frac{0,01422 \text{ jam}}{24 \text{ jam}} \times 100\% = 0,05925\%$$

$$\text{Susut Umur Trafo} = (2023 - 2017) \times 0,05925\% = 0,3555 \text{ Tahun}$$

$$\text{Masa pakai} = 20,55 \text{ tahun} - 0,3555 \text{ tahun} = 20,1945 \text{ tahun}$$

$$n = 20,1945 \text{ tahun} - 6 \text{ tahun} = 14,1945 \text{ tahun}$$

3.1.5. Efisiensi Transformator

Berdasarkan hasil dari tabel 5 perhitungan kinerja transformator dengan informasi yang telah terkumpul bisa dilakukan analisis menggunakan rumus sebagai berikut ini:

Data pada pukul 05:00 Stasiun MRT Lebak Bulus:

$$P_{in} = 62,38 \text{ kW} (2200 \text{ W} ((1,93)^2 A \times 0,01773 \Omega) W) = 64,58 \text{ kW}$$

Maka, nilai efisiensi bisa didapatkan dengan rumus:

$$n = \frac{62,38 \text{ kW}}{64,58 \text{ kW}} \times 100\% = 96,59\%$$

Tabel 5. Efisiensi Transformator Kering Stasiun MRT Lebak Bulus

| Data Stasiun MRT Lebak Bulus | | | | |
|------------------------------|------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------------|
| No | Tanggal/Waktu | P Input (kW) | Efisiensi Transformator | Rata-Rata Efisiensi Transformator |
| 1 | 08/05/2023 01:00 | 43,85 | 94,98% | 96,94% |
| 2 | 08/05/2023 02:00 | 49,97 | 95,59% | |
| 3 | 08/05/2023 03:00 | 52,59 | 95,24% | |
| 4 | 08/05/2023 04:00 | 63,47 | 96,53% | |
| 5 | 08/05/2023 05:00 | 64,58 | 96,59% | |
| 6 | 08/05/2023 06:00 | 68,97 | 96,08% | |
| 7 | 08/05/2022 07:00 | 70,84 | 96,89% | |
| 8 | 08/05/2022 08:00 | 69,91 | 96,85% | |
| 9 | 08/05/2022 09:00 | 68,49 | 96,78% | |
| 10 | 08/05/2022 10:00 | 77,41 | 97,15% | |
| 11 | 08/05/2022 11:00 | 78,26 | 97,18% | |
| 12 | 08/05/2022 12:00 | 81,61 | 97,30% | |
| 13 | 08/05/2022 13:00 | 86,01 | 97,44% | |
| 14 | 08/05/2022 14:00 | 79,58 | 97,23% | |
| 15 | 08/05/2022 15:00 | 78,24 | 97,18% | |
| 16 | 08/05/2022 16:00 | 86,01 | 97,44% | |
| 17 | 08/05/2022 17:00 | 99,68 | 97,79% | |
| 18 | 08/05/2022 18:00 | 95,4 | 97,69% | |
| 19 | 08/05/2022 19:00 | 94,29 | 97,67% | |
| 20 | 08/05/2022 20:00 | 95,39 | 97,69% | |
| 21 | 08/05/2022 21:00 | 94,05 | 97,66% | |
| 22 | 08/05/2022 22:00 | 89,01 | 97,52% | |
| 23 | 08/05/2022 23:00 | 77,73 | 97,16% | |
| 24 | 09/05/2023 00:00 | 72,87 | 96,98% | |

Didapatkan hasil sebesar 96.94% berdasarkan perhitungan rata-rata yang telah dilakukan pada tanggal 8 Mei 2023 untuk transformator kering.

3.2. Stasiun MRT Fatmawati

Tabel 6. Data Pembebanan Transformator Kering Stasiun MRT Fatmawati

| No | Tanggal/Waktu | V (kV) | I (A) | Persentase Pembebanan | P Ouput (kW) |
|----|------------------|--------|-------|-----------------------|--------------|
| 1 | 08/05/2023 01:00 | 20,06 | 1,54 | 8,49% | 48,99 |
| 2 | 08/05/2023 02:00 | 20,06 | 1,65 | 9,09% | 51,92 |
| 3 | 08/05/2023 03:00 | 20,04 | 1,63 | 8,98% | 51,64 |
| 4 | 08/05/2023 04:00 | 19,91 | 1,73 | 9,46% | 55,41 |
| 5 | 08/05/2023 05:00 | 19,78 | 1,83 | 9,95% | 59,21 |
| 6 | 08/05/2023 06:00 | 20,01 | 2,11 | 11,61% | 69,89 |
| 7 | 08/05/2023 07:00 | 19,95 | 2,32 | 12,72% | 76,54 |
| 8 | 08/05/2023 08:00 | 19,93 | 2,25 | 12,32% | 74,38 |
| 9 | 08/05/2023 09:00 | 19,98 | 2,15 | 11,81% | 71,12 |
| 10 | 08/05/2023 10:00 | 19,85 | 2,23 | 12,16% | 71,82 |
| 11 | 08/05/2023 11:00 | 19,98 | 2,25 | 12,35% | 74,38 |
| 12 | 08/05/2023 12:00 | 19,92 | 2,37 | 12,97% | 76,61 |
| 13 | 08/05/2023 13:00 | 20,02 | 2,31 | 12,71% | 73,72 |
| 14 | 08/05/2023 14:00 | 19,97 | 2,34 | 12,84% | 76,48 |
| 15 | 08/05/2023 15:00 | 19,89 | 2,52 | 13,78% | 81,93 |
| 16 | 08/05/2023 16:00 | 19,8 | 2,66 | 14,47% | 86,53 |
| 17 | 08/05/2023 17:00 | 19,82 | 3,35 | 18,25% | 105,96 |
| 18 | 08/05/2023 18:00 | 20,01 | 2,85 | 15,67% | 95,18 |
| 19 | 08/05/2023 19:00 | 19,81 | 2,77 | 15,08% | 85,56 |
| 20 | 08/05/2023 20:00 | 20,08 | 2,61 | 14,41% | 84,66 |
| 21 | 08/05/2023 21:00 | 20,01 | 2,5 | 13,75% | 83,09 |
| 22 | 08/05/2023 22:00 | 20,08 | 2,54 | 14,02% | 80,65 |
| 23 | 08/05/2023 23:00 | 19,84 | 2,26 | 12,32% | 72,92 |
| 24 | 09/05/2023 00:00 | 20,01 | 1,84 | 10,12% | 60,36 |

Pada tabel 6 merupakan hasil data pembebanan yang telah diambil di stasiun MRT Fatmawati pada tanggal 8 mei 2023 yang dimulai pada pukul 01.00 WIB – 00.00 WIB.

Tabel 7. Suhu Belitan Transformator Kering Stasiun MRT Fatmawati

| No | Tanggal/Waktu | Transformator Kering Stasiun MRT Fatmawati | | | Suhu Tertinggi |
|----|------------------|--|--------|--------|----------------|
| | | Suhu Belitan 3 Fasa | | | |
| | | R | S | T | |
| 1 | 08/05/2023 01:00 | 46,8°C | 47,3°C | 47°C | 47,3°C |
| 2 | 08/05/2023 02:00 | 46,9°C | 48°C | 47,8°C | 48°C |
| 3 | 08/05/2023 03:00 | 48°C | 48°C | 47,4°C | 48°C |
| 4 | 08/05/2023 04:00 | 47,7°C | 46,9°C | 48,1°C | 48,1°C |
| 5 | 08/05/2023 05:00 | 47,3°C | 48,2°C | 48,1°C | 48,2°C |
| 6 | 08/05/2023 06:00 | 49,2°C | 51°C | 51,9°C | 51,9°C |
| 7 | 08/05/2023 07:00 | 52,6°C | 50,3°C | 51,7°C | 52,6°C |
| 8 | 08/05/2023 08:00 | 52,4°C | 50,1°C | 50,4°C | 52,4°C |
| 9 | 08/05/2023 09:00 | 52°C | 51,8°C | 52°C | 52°C |
| 10 | 08/05/2023 10:00 | 52,3°C | 49,5°C | 51°C | 52,3°C |
| 11 | 08/05/2023 11:00 | 51,3°C | 52°C | 52,4°C | 52,4°C |
| 12 | 08/05/2023 12:00 | 52,5°C | 51,8°C | 52,7°C | 52,7°C |
| 13 | 08/05/2023 13:00 | 52,5°C | 52,5°C | 50,8°C | 52,5°C |
| 14 | 08/05/2023 14:00 | 52,1°C | 51,9°C | 52,6°C | 52,6°C |
| 15 | 08/05/2023 15:00 | 52,8°C | 53,9°C | 53,4°C | 53,9°C |
| 16 | 08/05/2023 16:00 | 55,3°C | 55,8°C | 54,1°C | 55,8°C |
| 17 | 08/05/2023 17:00 | 58,2°C | 60,2°C | 59,5°C | 60,2°C |
| 18 | 08/05/2023 18:00 | 56,9°C | 55,3°C | 56°C | 56,9°C |
| 19 | 08/05/2023 19:00 | 56°C | 55,1°C | 56°C | 56°C |
| 20 | 08/05/2023 20:00 | 55,1°C | 55,8°C | 56°C | 56°C |
| 21 | 08/05/2023 21:00 | 53,9°C | 52,2°C | 53°C | 53,9°C |
| 22 | 08/05/2023 22:00 | 53,7°C | 54,5°C | 51,4°C | 54,5°C |
| 23 | 08/05/2023 23:00 | 52,1°C | 52,2°C | 50°C | 52,2°C |
| 24 | 09/05/2023 00:00 | 47°C | 46,2°C | 48,2°C | 48,2°C |

Pada tabel 7 merupakan hasil data suhu belitan yang telah diambil di stasiun MRT Fatmawati pada tanggal 8 mei 2023 yang dimulai pada pukul 01.00 WIB – 00.00 WIB.

3.2.1. Perhitungan Rasio Pembebanan

Kondisi Luar Waktu Beban Puncak:

$$K = \frac{62,68}{630} = 0,0994$$

Kondisi Waktu Beban Puncak:

$$K = \frac{114,97}{630} = 0,1824$$

3.2.2. Perhitungan Temperature Hotspot

Suhu meningkat dalam keadaan beban steady state dan transformator beroperasi dengan sistem pendingin sendiri, maka perhitungan dapat dilakukan dengan menggunakan rumus yang diperoleh pada data sebagai berikut [13], [14], [15]:

Kondisi LWBP:

$$\Delta\theta_{HS} = 48,2 \text{ }^\circ\text{C} \times [0,0994]^{2 \times 0,8} = 1,19^\circ\text{C}$$

Kondisi WBP:

$$\Delta\theta_{HS} = 60,2 \text{ }^\circ\text{C} \times [0,1824]^{2 \times 0,8} = 3,95^\circ\text{C}$$

Maka, bisa dicari kenaikan temperature hotspot dengan rumus sebagai berikut [16]:

Kondisi LWBP:
 $\theta_{HS} = 31,3^{\circ}C + 1,19^{\circ}C\theta_{HS} = 32,49^{\circ}C$

Kondisi WBP:
 $\theta_{HS} = 32,5^{\circ}C + 3,95^{\circ}C = 36,45^{\circ}C$

3.2.3. Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif

Kondisi LWBP:

$$V = 2 \frac{(32,49^{\circ}C - 98^{\circ}C)}{6} = 0,0005167 p.u$$

Kondisi WBP:

$$V = 2 \frac{(36,45^{\circ}C - 98^{\circ}C)}{6} = 0,0008164 p.u$$

3.2.4. Menghitung Susut Umur Selama Satu Hari (24 Jam)

$$= (0,0005167 p.u \times 17 jam) + (0,0008164 p.u \times 7 jam) = 0,0144 jam$$

$$\% \text{ susut umur relative} = \frac{0,0144 jam}{24 jam} \times 100 = 0,06\%$$

$$\text{Susut Umur Trafo} = (2023 - 2017) \times 0,06\% = 0,36 \text{ Tahun}$$

$$\text{Masa Pakai} = 20,55 \text{ tahun} - 0,36 \text{ tahun} = 20,19 \text{ tahun}$$

$$n = 20,19 \text{ tahun} - 6 \text{ tahun} = 14,19 \text{ tahun}$$

3.2.5. Efisiensi Transformator

Berdasarkan hasil dari tabel 8 perhitungan kinerja transformator dengan informasi yang telah terkumpul bisa dilakukan analisis menggunakan rumus sebagai berikut ini:

Data pada pukul 05:00 Stasiun MRT Fatmawati:

$$P_{In} = 59,21 kW + (2200 W + ((1,83)^2 A \times 0,01773 \Omega)W) = 61,41 kW$$

Maka, nilai efisiensi bisa didapatkan dengan rumus:

$$n = \frac{61,41 kW}{63,91 kW} \times 100\% = 96,08\%$$

Didapatkan hasil sebesar 96,99% berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan pada pukul 05:00 WIB untuk transformator kering.

Tabel 8. Efisiensi Transformator Kering Stasiun MRT Fatmawati

| No | Tanggal/Waktu | P Input (kW) | Efisiensi Transformator | Rata-Rata Efisiensi Transformator |
|----|------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 08/05/2023 01:00 | 51,19 | 95,70% | |
| 2 | 08/05/2023 02:00 | 54,12 | 95,93% | |
| 3 | 08/05/2023 03:00 | 53,84 | 95,91% | |
| 4 | 08/05/2023 04:00 | 57,61 | 96,18% | |
| 5 | 08/05/2023 05:00 | 61,41 | 96,41% | |
| 6 | 08/05/2023 06:00 | 72,09 | 96,94% | |
| 7 | 08/05/2023 07:00 | 78,74 | 97,20% | |
| 8 | 08/05/2023 08:00 | 76,58 | 97,12% | |
| 9 | 08/05/2023 09:00 | 73,32 | 96,99% | |
| 10 | 08/05/2023 10:00 | 74,02 | 97,02% | |
| 11 | 08/05/2023 11:00 | 76,58 | 97,12% | |
| 12 | 08/05/2023 12:00 | 78,81 | 97,21% | |
| 13 | 08/05/2023 13:00 | 75,92 | 97,10% | 96,99% |
| 14 | 08/05/2023 14:00 | 78,68 | 97,20% | |
| 15 | 08/05/2023 15:00 | 84,13 | 97,38% | |
| 16 | 08/05/2023 16:00 | 88,73 | 97,52% | |
| 17 | 08/05/2023 17:00 | 108,16 | 97,96% | |
| 18 | 08/05/2023 18:00 | 97,38 | 97,74% | |
| 19 | 08/05/2023 19:00 | 87,76 | 97,49% | |
| 20 | 08/05/2023 20:00 | 86,86 | 97,46% | |
| 21 | 08/05/2023 21:00 | 85,29 | 97,42% | |
| 22 | 08/05/2023 22:00 | 82,85 | 97,34% | |
| 23 | 08/05/2023 23:00 | 75,12 | 97,07% | |
| 24 | 9/5/2023 0:00 | 62,56 | 96,48% | |

Dengan demikian, penerapan sistem pemeliharaan berbasis kondisi dapat menjadi Solusi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi dan kehandalan trafo dalam sistem transportasi MRT di masa yang akan datang.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari perhitungan diatas, kedua transformator kering ini menghasilkan data yang berbebeda. Transformator kering Stasiun MRT Lebak Bulus memiliki persentase penurunan usia pakai sebesar 0,05925% dengan usia tersisa transformator kering selama 14,1945 tahun. Sementara itu, transformator kering Stasiun MRT Fatmawati memiliki persentase penurunan usia sebesar 0,06% dengan usia transformator kering selama 14,19 tahun. Berdasarkan tahun produksi dari kedua transformator tersebut, kedua transformator kering ini diproduksi bersamaan pada tahun 2017.

Pada saat menghitung efisiensi transformator kering menjukan jika efisiensi transformator kering di Stasiun MRT Fatmawati masih lebih baik dibandingkan dengan transformator kering di Stasiun MRT Lebak Bulus dengan hasil rata-rata perhitungan yang sudah diperoleh untuk transformator kering Stasiun MRT Fatmawati sebesar 96,99%. Sementara itu, pada transformator kering Stasiun MRT Lebak Bulus didapatkan efisiensi sebesar 96,94%

Persentase beban kedua transformator kering ini sudah terlihat jelas sangat berbeda walaupun memiliki kapasitas

yang sama. Transformator kering di Stasiun MRT Lebak Bulus memiliki persen pembebanan sebesar 10,57% untuk Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) dan 16,64% hasil untuk Waktu Beban Puncak (WBP). Sedangkan transformator kering di Stasiun MRT Fatmawati memiliki persen pembebanan sebesar 9,95% untuk hasil Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) dan 18,25% hasil untuk Waktu Beban Puncak (WBP). Hasil dari kedua transformator kering ini masih tergolong dengan baik karena dibawah batas maksimum yaitu sebesar 80%. Hal ini menunjukkan bahwa, beban mempengaruhi hasil efisiensi transformator kering.

Beberapa Langkah yang dapat diambil untuk memastikan kinerja yang optimal dari trafo guna mencegah gangguan operasional antara lain: pemeriksaan rutin, pembersihan komponen dan penggantian suku cadang yang sudah aus. Selain itu, pelatihan bagi petugas pemeliharaan juga perlu dilakukan agar mereka dapat mengidentifikasi masalah sejak dini dan melakukan perbaikan yang diperlukan. Pentingnya dokumentasi setiap kegiatan pemeliharaan juga tidak boleh diabaikan, karena hal ini akan membantu dalam analisis tren kerusakan dan perencanaan pemeliharaan di masa depan. Dengan demikian, penerapan sistem pemeliharaan berbasis kondisi dapat menjadi Solusi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi dan kehandalan trafo dalam sistem transportasi MRT.

Referensi

- [1]. R. A. Diantari and V. A. Fitri, "Analysis of the Effect of Loading on Age Loss and Efficiency on Dry Type Transformer at PT MRT Jakarta," in *2022 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, IEEE, Nov. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICPERE56870.2022.10037469.
- [2]. A. L. Moreno and J. C. J. Ramirez, "Dry-Type Single-Phase Overhead Distribution Transformer," in *2024 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, IEEE, May 2024, pp. 1–4. doi: 10.1109/TD47997.2024.10556284.
- [3]. O. P. Abioye, P. Agamuthu, and A. R. Abdul Aziz, "Biodegradation of Used Motor Oil in Soil Using Organic Waste Amendments," *Biotechnol Res Int*, vol. 2012, pp. 1–8, Jun. 2012, doi: 10.1155/2012/587041.
- [4]. C. C. Obi, G. Umanu, C. P. Anozie, and H. Umar, "Biodegradation of Spent Automobile Engine Oil in Soil Microcosms Amended with Cow Dung," *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, vol. 26, no. 2, pp. 255–263, May 2022, doi: 10.4314/jasem.v26i2.13.
- [5]. G. O. Adams, I. Ehinomen, and P. Tawari-Fufeyin, "Bioremediation of Spent Oil Contaminated Soils Using Poultry Litter," *Research Journal in Engineering and Applied Sciences*, vol. 3, pp. 118–124, Feb. 2014.
- [6]. O. O. Omoniwa and A. A. Ogunjobi, "Bioremediation of Engine Oil-Contaminated Soil using Selected Indigenous Moulds," *Journal of Biochemistry, Microbiology and Biotechnology*, vol. 11, no. 2, pp. 77–81, Dec. 2023, doi: 10.54987/jobimb.v11i2.864.
- [7]. M. Aidil and M. Syukri, "Analisis Pengaruh Suhu Akibat Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Daya Di Gardu Induk Lambaro," *Jurnal Komputer, Informasi Teknologi, Dan Elektro*, vol. 3, pp. 1–8, 2018.
- [8]. I. Bayu Tiasmoro, Wirentake, and P. Ali Topan, "PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP EFISIENSI DAN SUSUT UMUR TRANSFORMATOR STEP UP 6kV / 70kV DI PLTU SUMBAWA BARAT UNIT 1 DAN 2 2x7 MW PT.PLN (PERSERO) UPK TAMBORA," *Jurnal TAMBORA*, vol. 5, no. 2, pp. 1–7, Jul. 2021, doi: 10.36761/jt.v5i2.1099.
- [9]. A. B. Ajay Katti and V. B. H. Bharati S. Meti, "Isolation and Characterisation of the Indigenous Acetic Acid Bacteria from Western Ghats Soil Samples," *Int J Curr Microbiol Appl Sci*, vol. 6, no. 9, pp. 1255–1265, Sep. 2017, doi: 10.20546/ijcmas.2017.609.151.
- [10]. A. Rani, "Exploring Actinobacteria Isolation and Screening from Soil Samples," *African Journal of Biological Sciences*, vol. 6, no. 7, pp. 1899–1906, Jun. 2024, doi: 10.48047/AFJBS.6.7.2024.1899-1906.
- [11]. R. Choirul and A. Ridho, "ANALISA SISA UMUR PAKAI TRANSFORMATOR 6,6 KV DI PT. PERTASAMTAN GAS SUNGAI GERONG," pp. 1–8, 2019.
- [12]. B. K. Mohammed Ali, W. Hasan Ali, and N. Hameed Jalil, "Employing the Cascode Methods, A Transformer-Less High Voltage Gain Step-Up DC-DC Converter," *Edison Journal for electrical and electronics engineering*, vol. 2, pp. 27–34, Jun. 2024, doi: 10.62909/ejee.2024.005.
- [13]. H. Shayeghi, R. Mohajery, M. Hosseinpour, F. Sedaghati, and N. Bizon, "A Transformer-Less High Voltage Gain DC-DC Converter Based on Cuk Converter and Voltage-Lift Technique," *Research Article Journal of Energy Management and Technology (JEMT)*, vol. 8, p. 23, 2023, doi: 10.22109/jemt.2023.416222.1470.
- [14]. C. Ringler, A. Bhaduri, and R. Lawford, "The nexus across water, energy, land and food (WELF): potential for improved resource use efficiency?," *Environmental Sustainability*, vol. 5, no. 6, pp. 617–624, Dec. 2013, Accessed: Apr. 20, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.002>
- [15]. H. Liao, Y. T. Chen, L. Chen, and J. F. Chen, "Development of a Bidirectional DC–DC Converter with Rapid Energy Bidirectional Transition Technology," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/en15134583.
- [16]. P. Balducci, K. Mongird, and M. Weimar, "Understanding the Value of Energy Storage for Power System Reliability and Resilience Applications", doi: 10.1007/s40518-021-00183-7/Published.