

# Metode Estimasi Suhu Minyak pada Transformator Tenaga melalui Pengukuran Suhu Body Berbasis IoT

Rizal Alfa Rizki<sup>1</sup>, Dista Yoel Tadeus<sup>2</sup>, Fakhrudin Mangkusasmito<sup>2</sup>, Heru Winarno<sup>1</sup>, Eko Ariyanto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> STr. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi Undip, Semarang, Indonesia

<sup>2</sup> STr. Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi Undip, Semarang, Indonesia  
[distayoel@gmail.com](mailto:distayoel@gmail.com), [fakhm17@lecturer.undip.ac.id](mailto:fakhm17@lecturer.undip.ac.id)

Diterima 14 Oktober 2020  
Disetujui 11 November 2020

**Abstract**—Oil cooled power transformer has important role in the electricity distribution system. Its windings were immersed in oil as an insulating medium and also as a cooler. This oil would be heated up due to several things, the most significant was heat generated by winding's power loss. The monitoring of oil temperature on the transformer was always done routinely every day to maintain its performance and health condition. IoT based measurements could improved efficiency and minimized manpower resources. To realize this the indirect non-destructive measurement method was proposed to estimate transformer's temperature oil. It will correlate the oil temperature and body temperature through a constant calibration factor derived from calculations. Conducted experiment applied to specific existing transformer and followed by calculations resulted a calibration factor = 1.7749. The smallest average of estimated temperature error was lied in the range of 40 - 90 degrees Celcius.

**Index Terms**— Oil Temperature, Transformer, Non-destructive Measurement

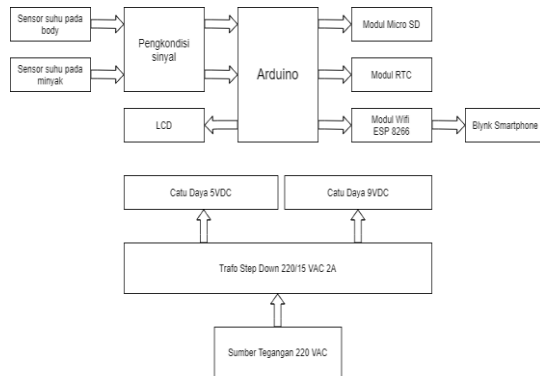
## I. PENDAHULUAN

Dalam sistem transmisi, gardu induk merupakan komponen pokok dalam proses penyaluran tenaga listrik. Salah satu alat yang penting dalam gardu induk adalah transformator tenaga [1]. Pada sistem tegangan ekstra tinggi (500kV) di Indonesia menggunakan Interbus Transformer (IBT) untuk menyalurkan listrik ke sistem tegangan tinggi (150kV) yang kemudian ditransmisikan atau ditransformasikan lagi untuk didistribusikan ke pelanggan [2], [3]. Salah satu bagian utama dalam transformator tenaga adalah minyak transformator. Seluruh bagian belitan-belitan dan inti transformator tenaga direndam dalam minyak transformator, terutama transformator tenaga yang berkapasitas besar. Hal itu dikarenakan minyak transformator mempunyai sifat sebagai isolasi dan media pemindah panas, sehingga minyak transformator tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi, juga sebagai penahan korosi. Minyak pada transformator sering kali memanas dikarenakan beberapa hal salah satunya yang paling signifikan

adalah karena panasnya belitan [4], [5]. Oleh karena itu pengawasan atau pemantauan suhu minyak pada transformator selalu dilakukan rutin setiap harinya. Pemantauan suhu minyak dilakukan pada semua transformator di gardu induk, artinya akan sangat banyak transformator yang perlu dipantau pada GITET (Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi) karena 1 bay IBT saja terdiri dari 3 transformator. Ini mengakibatkan pembacaan suhu minyak kurang efisien dan tidak dapat terpantau setiap waktu dengan mudah. Untuk mengatasi persoalan tersebut, diperlukan suatu sistem pengukuran suhu minyak trafo berbasis IoT yang dapat diakses dari ruang kontrol sehingga pekerjaan pemeliharaan transformator dapat menjadi lebih efektif dan efisien dalam hal waktu dan tenaga. Namun sistem pengukuran suhu minyak trafo berbasis IoT tersebut menimbulkan persoalan lain, yaitu sulitnya menempatkan sensor suhu di dalam minyak transformator *existing* yang akan mengarah pada *destructive measurement* [6],[7] karena dibutuhkan modifikasi mekanis pada badan transformator untuk memasukkan sensor. Hal ini tentu tidak dapat dilakukan dengan mudah dan berisiko tinggi. Artikel ini memaparkan suatu metode estimasi suhu minyak transformator dengan cara non-destructive yang lebih mudah dan aman yaitu melalui pengukuran suhu badan trafo. Data akuisisi suhu badan trafo digunakan untuk menyusun model termal matematis lalu dilanjutkan dengan perhitungan faktor kalibrasi, sehingga suhu minyak transformator dapat ditentukan secara langsung melalui suhu badan transformator.

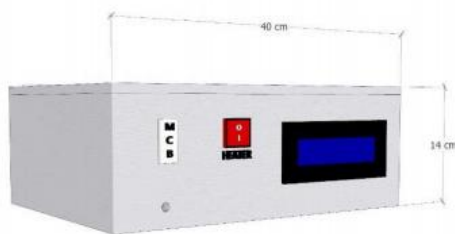
II. METODOLOGI

A. Blok Diagram

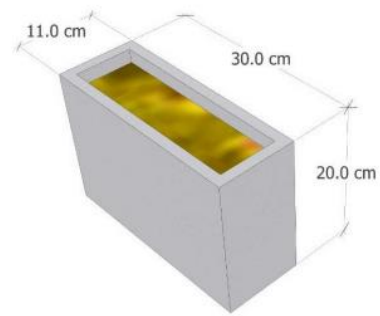


Gambar 1. Blok Diagram Rangkaian

Gambar 1 menunjukkan diagram blok perangkat keras alat. Sumber tegangan PLN 220 VAC digunakan sebagai masukan transformator step down diturunkan menjadi 15 VAC. Tegangan 15 VAC diparalel untuk digunakan sebagai masukan untuk catu daya 9 V dan 5 V. Catu daya 9 VDC digunakan sebagai suplai arduino yang kemudian arduino akan mensuplai modul RTC DS3231, modul Micro SD dan modul wifi ESP8266 melalui tegangan keluaran 3,3 V dari arduino. Catu daya 5 VDC digunakan sebagai suplai kedua sensor thermocouple dan LCD I2C. Sensor thermocouple digunakan untuk mengukur suhu pada body dan minyak transformator. Untuk pengukuran suhu pada minyak transformator digunakan sensor thermocouple jenis waterproof dan anti korosi. Modul wifi ESP8266 digunakan untuk menghubungkan arduino dengan jaringan internet serta sebagai modul transfer data ke Blynk [8][9][10]. Module RTC DS3231 digunakan sebagai pencatat waktu pada proses data logging. Module Micro SD digunakan untuk mengakses Micro SD sebagai penyimpan data pada proses data logging. Smartphone digunakan untuk memonitor suhu pada minyak transformator dan menampilkan trendline suhu melalui aplikasi Blynk seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5. Adapaun bentuk desain body alat ditunjukkan oleh Gambar 2.



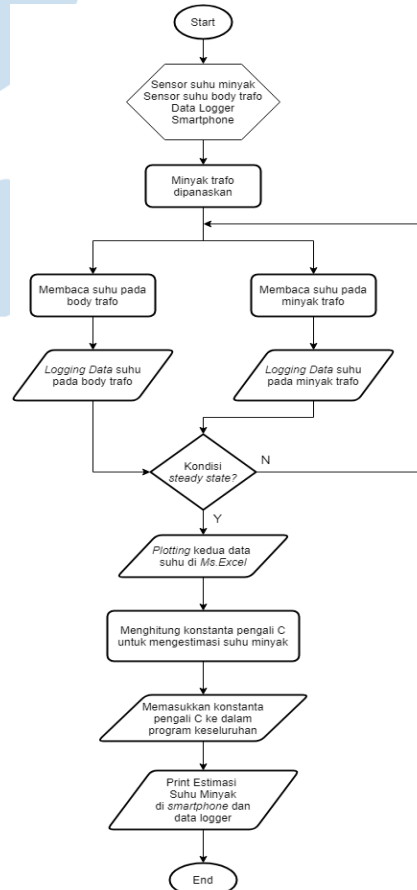
Gambar 2. Desain tampak depan alat



Gambar 3. Bentuk wadah minyak trafo

Gambar 4 menunjukkan diagram alir cara kerja alat. Sensor suhu pada minyak akan membaca suhu awal minyak dan juga sensor suhu pada body akan membaca suhu awal wadah (body trafo) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3. Heater elektrik akan memanaskan minyak pada wadah sampai kedua suhu steady (tidak berubah). Suhu body dan suhu minyak transformator selama proses pemanasan dari awal sampai steady state akan termuat pada data logger dalam interval 1 detik. Menghitung konstanta pengali untuk mengestimasi suhu minyak melalui suhu body. Didapatkan konstanta pengali dari data kedua suhu dan memasukkan konstanta pengali ke dalam program arduino. Estimasi suhu minyak akan ditampilkan secara real time di aplikasi Blynk.

B. Diagram Alir



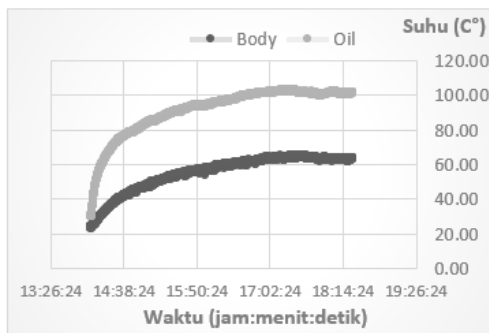
Gambar 4. Diagram Alir



Gambar 5. Bentuk tampilan akusisi temperature minyak pada aplikasi Blynk

III. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian dilakukan dengan cara memanaskan minyak pada wadah kemudian mengambil data suhu body dan suhu minyak menggunakan data logger. Minyak dipanaskan sampai suhu minyak dan suhu body steady (tidak lagi terjadi kenaikan suhu). Gambar 6 menunjukkan grafik hasil eksperimen.



Gambar 6. Grafik kondisi steady suhu body dan oil

Langkah-langkah mengidentifikasi model orde 1 dengan metode ini adalah sebagai berikut [11]:

1. Sistem orde 1

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) = \frac{K}{Ts+1} \tag{1}$$

Transformasi balik Laplace memberikan hasil keluaran dalam fungsi waktu [11]:

$$C(t) = K (R(t) - e^{-t/T}) \tag{2}$$

2. Mencari response dengan mengetahui besar *input step* (dalam kasus ini *input step* berupa *power heater* yaitu 90 Watt).

3. Menghitung parameter K (*gain*)

$$\begin{aligned} \Delta \text{ oil} &= \text{Suhu saat steady state} - \text{Suhu terendah} \\ &= 101 - 30 \\ &= 71 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{ body} &= \text{Suhu saat steady state} - \text{Suhu terendah} \\ &= 63 - 23 \\ &= 40 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \text{Perubahan magnitude steady state pada input} \\ &= 90 - 0 \\ &= 90 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K \text{ oil} &= \frac{\Delta}{\delta} \\ &= \frac{71}{90} \\ &= 0.78888 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K \text{ body} &= \frac{\Delta}{\delta} \\ &= \frac{40}{90} \\ &= 0.44444 \end{aligned}$$

4. Menghitung nilai 63%Δ

$$\begin{aligned} 63\% \Delta \text{ oil} &= \text{Suhu terendah} + 0.63 \Delta \\ &= 30 + 44.73 \\ &= 74.73 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 63\% \Delta \text{ body} &= \text{Suhu terendah} + 0.63 \Delta \\ &= 23 + 25.2 = 47.2 \end{aligned}$$

5. Menghitung T (*time constant*) yaitu t saat 63%Δ

$$\begin{aligned} T \text{ oil} &= t \text{ saat suhu oil } 74.73 \\ &= 1376 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T \text{ body} &= t \text{ saat suhu body } 47.2 \\ &= 2638 \text{ s} \end{aligned}$$

6. Didapatkan solusi untuk model oil dan body

- Solusi model suhu *oil*  
Suhu *oil* (t) = 0.788 (90 - e<sup>-t/1376</sup>) (3)

- Solusi model suhu *body*  
Suhu *body* (t) = 0.444 (90 - e<sup>-t/2638</sup>) (4)

Memeriksa suhu body dan oil terhadap waktu menggunakan model yang didapat. Mencari konstanta pengali C yang didapat dari hubungan

$$\begin{aligned} C &= \frac{\text{Suhu body}}{\text{Suhu oil}} \\ &= \frac{0.788 (90 - e^{-t/1376})}{0.444 (90 - e^{-t/2638})} \end{aligned} \tag{5}$$

Pada kondisi *steady state* maka e<sup>-t/T</sup> menjadi ≈ 0. Maka didapatkan :

$$C = \frac{0.788}{0.444} = 1.7749 \tag{6}$$

Dikarenakan terlalu banyak data yang termuat dalam proses pengambilan data (12697 detik), berikut beberapa sampel data hasil estimasi suhu minyak melalui pengukuran suhu *body* menggunakan konstanta pengali C dalam rentang suhu minyak 40 – 90 derajat celcius seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Estimasi Suhu Minyak

| Suhu Body (°C) | Suhu Oil (°C) | Estimasi Suhu Oil (°C) | Selisih (°C) (Estimasi - Suhu Oil) | Error % (Selisih / Suhu Oil) |
|----------------|---------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 25.00          | 41            | 44.36                  | 3.36                               | 8.20                         |
| 25.50          | 43.25         | 45.25                  | 2.00                               | 4.62                         |
| 26.00          | 45            | 46.14                  | 1.14                               | 2.53                         |
| 26.50          | 47            | 47.03                  | 0.03                               | 0.06                         |
| 26.50          | 48            | 47.03                  | 1.03                               | 2.15                         |
| 26.75          | 49.5          | 47.47                  | 2.03                               | 4.10                         |
| 27.25          | 50.25         | 48.36                  | 1.89                               | 3.76                         |
| 28.00          | 51.75         | 49.69                  | 2.06                               | 3.98                         |
| 28.25          | 52.75         | 50.13                  | 2.65                               | 5.02                         |
| 29.50          | 55.75         | 52.35                  | 3.4                                | 6.10                         |
| 30.00          | 57            | 53.24                  | 3.76                               | 6.60                         |
| 30.75          | 58.25         | 54.57                  | 3.68                               | 6.32                         |
| 31.00          | 59.25         | 55.02                  | 4.23                               | 7.14                         |
| 31.50          | 60            | 55.91                  | 4.09                               | 6.82                         |
| 32.50          | 61.5          | 57.68                  | 3.82                               | 6.21                         |

|                   |       |       |      |      |
|-------------------|-------|-------|------|------|
| 32.75             | 62.25 | 58.12 | 4.13 | 6.63 |
| 33.25             | 62.75 | 59.01 | 3.74 | 5.96 |
| 34.25             | 64.75 | 60.79 | 3.96 | 6.12 |
| 34.00             | 64.5  | 60.34 | 4.16 | 6.45 |
| 34.50             | 65    | 61.23 | 3.77 | 5.80 |
| 35.00             | 66    | 62.12 | 3.88 | 5.88 |
| 35.75             | 67.25 | 63.45 | 3.80 | 5.65 |
| 37.00             | 68.25 | 65.67 | 2.58 | 3.78 |
| 37.50             | 69.5  | 66.55 | 2.95 | 4.24 |
| 37.75             | 70.25 | 67.00 | 3.25 | 4.63 |
| 38.25             | 71    | 67.89 | 3.11 | 4.38 |
| 39.25             | 72.25 | 69.66 | 2.59 | 3.58 |
| 40.25             | 73    | 71.43 | 1.57 | 2.15 |
| 41.25             | 74.25 | 73.21 | 1.04 | 1.40 |
| 41.50             | 74.5  | 73.65 | 0.85 | 1.14 |
| 41.00             | 75.25 | 72.77 | 2.48 | 3.30 |
| 42.00             | 76    | 74.54 | 1.46 | 1.92 |
| 42.50             | 77    | 75.43 | 1.57 | 2.04 |
| 43.25             | 77    | 76.76 | 0.24 | 0.31 |
| 43.25             | 77.25 | 76.76 | 0.49 | 0.63 |
| 43.00             | 78    | 76.32 | 1.68 | 2.15 |
| 43.50             | 78    | 77.20 | 0.80 | 1.03 |
| 44.00             | 78.25 | 78.09 | 0.16 | 0.20 |
| 44.25             | 78.5  | 78.53 | 0.03 | 0.04 |
| 44.50             | 79    | 78.98 | 0.02 | 0.03 |
| 44.50             | 79.75 | 78.98 | 0.77 | 0.97 |
| 45.00             | 80    | 79.86 | 0.14 | 0.18 |
| 45.50             | 80.75 | 80.75 | 0.00 | 0.00 |
| 45.75             | 81    | 81.20 | 0.20 | 0.25 |
| 46.00             | 81.75 | 81.64 | 0.11 | 0.13 |
| 46.25             | 82.25 | 82.08 | 0.17 | 0.21 |
| 47.00             | 83    | 83.41 | 0.41 | 0.49 |
| 47.50             | 84    | 84.30 | 0.30 | 0.36 |
| 47.75             | 84.75 | 84.75 | 0.00 | 0.00 |
| 48.00             | 85    | 85.19 | 0.19 | 0.22 |
| 49.50             | 86    | 87.85 | 1.85 | 2.15 |
| 50.00             | 87.25 | 88.74 | 1.49 | 1.71 |
| 50.75             | 88.25 | 90.07 | 1.82 | 2.06 |
| 51.75             | 90.25 | 91.84 | 1.59 | 1.76 |
| Rata – Rata Error |       |       | 1.89 | 3.03 |

Setelah didapatkan hasil pengujian pada rentang suhu minyak 40 – 90 derajat, dapat dijabarkan rata-rata *error* pada rentang suhu tertentu seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Rata-rata *error* pada rentang suhu tertentu

| Rentang Suhu | Rata-rata <i>error</i> (%) |
|--------------|----------------------------|
| 40 – 50      | 3.51                       |
| 50 – 60      | 6.00                       |
| 60 – 70      | 5.58                       |
| 70 – 80      | 1.50                       |
| 80 – 90      | 0.85                       |

Diketahui bahwa pengukuran suhu minyak menggunakan metode ini memiliki hasil pengukuran yang terbaik pada rentang suhu 80 – 90 derajat celsius

dengan rata-rata *error* 0,85 persen. Hal tersebut dikarenakan perhitungan menggunakan konstanta pengali (C) pada kondisi *steady state* sehingga yang paling mendekati kondisi *steady state* adalah suhu minyak pada rentang suhu 80 – 90 derajat.

Dari analisa di atas, metode yang telah dijabarkan dalam artikel ini dapat dengan mudah diaplikasikan di lapangan pada transformator *existing*. Konstanta pengali (C) dapat ditentukan langsung dengan membandingkan suhu *steady state* minyak pada transformator (indikator *oil* pada relay thermal) dan suhu pada *body* transformator. Bilamana konstanta pengali (C) diketahui maka secara praktis suhu minyak dapat diestimasi dari suhu *body* transformator dengan cara mengalikan langsung konstanta pengali (C) dengan suhu *body*.

#### IV. SIMPULAN

Setelah dilakukan uji kenaikan suhu *body* dan *oil* sampai dengan kondisi *steady state* pada kedua suhu, didapatkan konstanta pengali (C) = 1.7749. Adapun berdasarkan hasil perhitungan, estimasi suhu minyak efektif/optimal pada rentang suhu 40 – 90 derajat celsius karena kesalahan yg didapat cenderung kecil yaitu dengan rata-rata selisih suhu minyak dengan hasil estimasinya adalah 1.89 derajat celsius. Pada pengujian minyak diatas digunakan wadah yang terbuka yang mana kurang sesuai dengan kondisi aslinya maka dari itu disarankan untuk melakukan pengujian di transformator tenaga pada gardu induk untuk mengetahui hasil secara langsung (*real*). Kemudian disarankan juga untuk melakukan pengujian dengan menggunakan minyak trafo baru untuk dapat membandingkan hasilnya.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Sistem Kontrol, Departemen Teknologi Industri, Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. F. Fahmani, and M. Karnoto ST, "Transformator daya," *Anal. PENGUKURAN DAN PEMELIHARAAN Transform. DAYA PADA*, 2011.
- [2] I. A. Prastowo, W. Winarso, and A. J. Taufiq, "Analisis Kinerja Sistem Proteksi Transformator Tenaga Berdasarkan Frekuensi Gangguan Di Gardu Induk 150KV Kalibakal," *J. Ris. Rekayasa Elektro*, 2020, doi: 10.30595/jre.v1i2.5258.
- [3] J. B. Haryanto and Karnoto, "Pemeliharaan Trafo Arus (CT) pada Gardu Induk 150kV PT. PLN (Persero) P3B JB Region Jawa Tengah dan DIY," *J. Tek. Elektro*, 2011.
- [4] D. Nugroho, "Kegagalan Isolasi Minyak Trafo," *Media Elektr. ISSN 1979-7451*, 2010.
- [5] H. Sayogi, "Analisis Mekanisme Kegagalan Isolasi Pada Minyak Trafo Menggunakan Elektroda Berpolaritas Berbeda Pada Jarum – Bidang," *Diponegoro Univ.*, 2011.
- [6] S. N. Jha *et al.*, "Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods-a review," *Journal of Food Science and Technology*. 2011, doi: 10.1007/s13197-011-0263-x.

- [7] W. Y. Kunto Wibowo and A. Syakur, "Analisis karakteristik breakdown voltage pada dielektrik minyak shell diala b pada suhu 30 0 C-130 0 C," *Dipenogoro Univ.*, 2011.
- [8] Blynk, "Blynk," *Startups - IEEE Internet Things*, 2015.
- [9] Arafat. S.Kom. M.Kom, "Sistem Pengaman Pintu Rumah berbasis Internet of Things ( IoT ) Dengan ESP8266," *J. Ilm. Fak. Tek. "Technologia,"* 2016.
- [10] O. Chieochan, A. Saokaew, and E. Boonchieng, "Internet of things (IOT) for smart solar energy: A case study of the smart farm at Maejo University," 2017, doi: 10.1109/ICCAIS.2017.8217588.
- [11] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2005, doi: 10.1109/TCST.2005.847331.

