

# Studi Perhitungan Suhu Hot Spot Pada Bushing Transformator Unit II GI Pekalongan dengan Metode Elemen Hingga

Andi Nugraha<sup>1</sup>, Afriyastuti Herawati<sup>1</sup>, M. Khairul Amri Rosa<sup>1</sup>, Alex Surapati<sup>1</sup>, Yanolanda Suzantry<sup>1</sup>,  
Ika Novia Anggraini<sup>1</sup>, Yuli Rodiah<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektro Universitas Bengkulu

[afriyastuti\\_herawati@unib.ac.id](mailto:afriyastuti_herawati@unib.ac.id)

## ABSTRACT

The reliability of the power transformer depends on the performance of the its bushing. Transformer bushings subjected to hot conditions or high temperatures for a long period of time can cause bushing failure. Bushing failure can result the damage such as bursting of the conservator tank, explosion and fire. The purpose of this study was to determine the temperature hot spot on the transformer bushing at the Unit II Pekalongan Substation (GI) in order to avoid the damage of transformer. The method that used to analyze the hot spot temperature on the transformer bushing is the finite element. The finite element method is carried out by dividing the bushing parts into small elements to be calculated so that the hot spot temperature value on the transformer bushing is obtained. The result of the highest hot spot temperature on the transformer bushing which were carried out four times using the finite element method is 59.85 °C . Based on the IEEE standard, the hot spot temperature of transformer bushing can't be more than 105 °C. This result showed that transformer bushing of Unit II Pekalongan Substation are still in the normal category.

Keywords : transformer bushing, hot spot temperature, finite element.

## I. PENDAHULUAN

Bushing transformator memiliki fungsi yaitu sebagai penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan luar. Selain itu, bushing transformator digunakan untuk menyalurkan daya elektrik dan juga digunakan sebagai isolasi. Bushing transformator sebagai isolasi digunakan untuk mengisolasi agar tegangan tetap berada di inti konduktor. Saat bushing transformator beroperasi, sebagian aliran listrik yang mengalir pada bushing menghilang dan berubah menjadi panas. Jika terjadi panas atau suhu yang tinggi pada bushing transformator dalam jangka waktu yang lama, hal ini dapat menyebabkan rusaknya isolator dan kegagalan busung transformator sehingga memperpendek umur bushing transformator dan menyebabkan kerusakan pada bushing transformator.

Kerusakan bushing transformator dapat menyebabkan pecahnya tangki, ledakan bushing dan kebakaran. Bushing

transformator menyebabkan lebih dari 15 % kegagalan dari transformator[1]. Suhu bushing sangat berpengaruh terhadap bushing transformator. Jika nilai suhu bushing transformator sudah melampaui dari standar yang telah ditentukan, maka dapat berisiko terjadi kerusakan. Oleh karena itu, analisa suhu *hot spot* sangat diperlukan supaya menghindari terjadi kerusakan pada bushing transformator. Penelitian akan dilakukan pada sistem transmisi listrik di Gardu Induk (GI) Pekalongan, Kepahiang. Transformator tenaga yang terpasang pada Gardu Induk (GI) Pekalongan ialah jenis trafo tenaga 150 KV.

Penelitian mengenai perhitungan suhu hot spot sudah dilakukan oleh beberapa peneliti. Diantaranya pada penelitian [2] menganalisa suhu *hot spot* terhadap kumparan transformator di Gardu induk Sukamerindu, Bengkulu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai suhu *hot spot* tertinggi pada saat beban 23,2 MW mencapai 105,8747 derajat celsius. Pada penelitian [3] yaitu menganalisa suhu *hot spot* terhadap bushing transformator dan penelitian dilakukan di Shiraz, Iran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa titik terpanas pada bushing transformator terletak pada flensa bushing. Pada penelitian [4] yaitu menganalisa suhu *hot spot* dan penelitian dilakukan di Istanbul, Turki. Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu maksimum terdapat pada permukaan *flange* bushing. Pada penelitian [5] yaitu menganalisa suhu *hot spot* pada bushing transformator. Hasil penelitian menjelaskan bahwa suhu *hot spot* pada bushing transformator yang didapatkan ialah sebesar 91,07 derajat celsius. Namun pada penelitian-penelitian tersebut tidak menggunakan metode elemen hingga yang dibandingkan dengan standart IEEE.

Dalam penelitian ini, digunakan metode elemen hingga untuk menganalisa suhu *hot spot* pada bushing transformator, karena metode tersebut masih belum banyak diaplikasikan di Indonesia. Selain itu metode elemen hingga dapat disimulasikan dengan menggunakan sistem perangkat lunak sehingga mempermudah dalam melakukan analisa. Hasil suhu *hot spot* yang didapatkan dengan menggunakan metode elemen hingga digunakan sebagai acuan kondisi batas suhu pada bushing transformator.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Bushing Transformator

Bushing transformator adalah sarana penghubung antara kumparan transformator dengan jaringan luar. Fungsi utama dari bushing transformator adalah untuk menyalurkan daya *electric* dan sebagai isolator. Ketika bushing transformator beroperasi, energi listrik akan mengalir pada konduktor listrik dan sebagian energi listrik yang mengalir pada konduktor tersebut akan menghilang dan menjadi panas. Bagian-bagian utama dari bushing transformator yaitu isolasi, konduktor, *flange* [6].

### B. Perpindahan Panas

Perpindahan panas merupakan proses berpindahnya energi panas dari satu tempat ke tempat lainnya. Perpindahan panas terjadi karena adanya perbedaan temperatur antar daerah-daerah tersebut sehingga energi panas akan mengalir dari daerah yang memiliki temperatur tinggi ke daerah yang memiliki temperatur rendah. Perpindahan panas dapat terjadi melalui gas dan benda padat. Ada 3 mekanisme perpindahan panas yaitu ;

#### 1. Konduksi

Konduksi adalah proses berpindahnya energi panas dari media bertemperatur tinggi ke media bertemperatur rendah dan perpindahan panas terjadi di media padat. Laju perpindahan panas konduksi dapat dinyatakan berdasarkan Persamaan 1 :

$$q = -k.A.\frac{dt}{dx} \quad (1)$$

#### 2. Konveksi

Konveksi adalah proses perpindahan energi panas yang terjadi pada permukaan dan media penghantarnya berupa cairan atau gas. Laju perpindahan panas konveksi dapat dinyatakan berdasarkan Persamaan 2 :

$$q = h.A.(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

#### 3. Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah proses berpindahnya energi panas dari temperatur tinggi ke temperatur rendah melalui gelombang elektromagnetik. Perpindahan panas radiasi terjadi tanpa melalui perantara. Laju perpindahan panas radiasi dapat dinyatakan berdasarkan Persamaan 3 :

$$q = \epsilon.\sigma.A.T^4 \quad (3)$$

Bushing transformator juga mengalami proses perpindahan panas. Mekanisme perpindahan panas yang terjadi pada bushing transformator yaitu konduksi dan konveksi. Jadi, analisa suhu *hot spot* pada bushing transformator dilakukan dengan menggunakan prinsip konduksi dan konveksi [7].

### C. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga sering digunakan untuk memecahkan permasalahan matematika fisik seperti perpindahan panas, elektromagnetik dan aliran fluida. Metode elemen hingga adalah sebuah metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah dalam persamaan diferensial. Persamaan diferensial parsial digunakan untuk memahami fenomena alam yang selanjutnya dapat memprediksi fenomena tersebut. Persamaan diferensial parsial juga dapat digunakan dalam menganalisa suhu *hot spot* pada bushing transformator. Konduksi dan konveksi merupakan dua mekanisme perpindahan panas yang terjadi pada bushing transformator sehingga dapat dilihat berdasarkan Persamaan 4 :

$$q = m.C_p.\frac{dT}{dt} + k.A_{cond}.\frac{dT}{dt} + h.A_{conv}.(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Untuk mendapatkan nilai flux panas pada bushing transformator dengan menggunakan prinsip konduksi dalam bentuk persamaan diferensial, maka dapat dihitung berdasarkan Persamaan 5 :

$$q = -k.\nabla T \quad (5)$$

Untuk menghitung energi listrik yang diubah menjadi panas dapat menggunakan Persamaan 6 :

$$q = J.E \quad (6)$$

Untuk mendapatkan nilai kerapatan arus (J), dapat dihitung berdasarkan Persamaan 7 :

$$J = \sigma.E \quad (7)$$

Untuk mendapatkan nilai kuat medan listrik (E), dapat dihitung berdasarkan Persamaan 8 :

$$E = -\nabla V \quad (8)$$

Prinsip dasar dari metode elemen hingga adalah membagi sebuah objek menjadi elemen-elemen kecil untuk dilakukan perhitungan. Setelah melakukan pembagian elemen dan melakukan perhitungan, maka akan didapatkan hasil dari analisa yang ingin dilakukan [8]. Metode elemen hingga memiliki bagian inti yang paling penting yaitu *mesh*. *Mesh* berfungsi untuk membagi elemen pada suatu benda menjadi elemen-elemen kecil untuk dilakukan perhitungan.

Secara bentuk, elemen *mesh* dibagi menjadi *mesh* teratur dan *mesh* tidak teratur [9].

### III. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan mengumpulkan parameter yang digunakan dan analisa suhu *hot spot* pada bushing transformator tenaga yang berada di Transformator Unit II Gardu Induk (GI) Pekalongan, Kepahiang. Data-data yang diperlukan untuk menganalisa suhu *hot spot* pada bushing transformator yaitu data *name plate* Transformator pada GI Pekalongan, data material dari bushing transformator, data suhu lingkungan, data *top oil temperature*, data beban listrik.

#### Tahapan Analisa Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga

Ada beberapa langkah yang akan dilakukan dalam menganalisa suhu *hot spot* pada bushing transformator dengan metode elemen hingga antara lain :

1. Menyiapkan data sekunder  
Data sekunder merupakan data yang sudah tersedia dalam berbagai bentuk. Data sekunder biasanya diperoleh dari orang telah melakukan penelitian dari sumber-sumber yang ada. Data sekunder yang digunakan untuk analisa. Suhu *hot spot* pada bushing transformator yaitu data material bushing transformator dan data spesifikasi bushing transformator.
2. Menentukan geometri bushing  
Dimensi bushing transformator digambar terlebih dahulu sebelum melakukan perhitungan. Ukuran bushing transformator ditentukan berdasarkan data bushing yang akan digunakan. Bushing transformator yang digambar yaitu tipe elemen dua dimensi. Dimensi bushing transformator digambar dengan menggunakan *software* Autocad
3. Menghitung nilai perpindahan panas konveksi  
Konveksi adalah proses membawa energi dalam bentuk gabungan dari konduksi panas, penyimpanan energi dan gerakan mencampur. Konveksi adalah mekanisme perpindahan panas yang kedua dalam menganalisa suhu *hot spot* pada bushing transformator. Nilai koefisien perpindahan panas konveksi ( $h$ ) yang digunakan yaitu 8. Nilai koefisien perpindahan panas konveksi ( $h$ ) yang digunakan berdasarkan jurnal yang berjudul "*Calculation of hot spot temperature of transformer bushing considering current fluctuation*"[11]. Nilai perpindahan panas konveksi dihitung menggunakan Persamaan (2).
4. Menghitung pemanasan *joule* (*joule heating*) ( $q$ )  
Ketika bushing dioperasikan dan arus mengalir pada bushing tersebut, maka sebagian energi listrik diubah menjadi energi panas. Energi panas ini merupakan energi listrik yang hilang ketika melewati bushing transformator. Untuk menghitung energi listrik yang diubah menjadi panas dapat menggunakan Persamaan (6).
5. Menghitung nilai kerapatan Arus ( $J$ )

Kerapatan arus adalah besarnya arus yang mengalir tiap satuan luas penghantar dengan satuan ampere per mm<sup>2</sup>. Nilai kerapatan arus dihitung untuk mendapatkan sumber panas dari konduktor. Nilai kerapatan arus dihitung dengan menggunakan Persamaan (7).

6. Menghitung nilai kuat medan listrik ( $E$ )  
Medan listrik adalah gaya yang timbul diantara dua buah partikel bermuatan yang dipisahkan. Kuat medan listrik dihitung untuk mendapatkan salah satu sumber panas dari konduktor. Kuat medan listrik dihitung dengan menggunakan Persamaan (8).
7. Pembentukan Mesh  
Mesh adalah inti dari elemen hingga. *Mesh* merupakan proses pembagian geometri menjadi bagian-bagian kecil agar penyelesaian matematis yang dilakukan sesuai dengan kondisi sesungguhnya. *Mesh* melakukan Pembagian struktur pada bushing transformator menjadi bagian-bagian kecil mendefinisikan bahwa terjadi analisis secara berulang-ulang yang dilakukan oleh system. Pada proses ini akan digunakan *software* Comsol.
8. Menghitung suhu *hot spot* pada bushing transformator  
Tahap analisa terakhir yaitu menghitung suhu *hot spot* pada bushing transformator. Nilai suhu *hot spot* pada bushing transformator didapatkan dengan bantuan *software* Comsol 5.5. Hasil suhu *hot spot* dibandingkan dengan standar IEEE. Menurut standar IEEE, suhu bushing transformator tidak boleh lebih dari 105°C

### IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan pada Gardu Induk (G1) Pekalongan, Kepahiang. Pada penelitian ini, analisa suhu *hot spot* dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga.

#### A. Nameplate Transformator Tenaga

Dari hasil pencatatan langsung pada *nameplate* transformator tenaga unit II GI Pekalongan, maka didapatkan Tabel 1.

Tabel 1. *Nameplate* trafo tenaga unit II GI Pekalongan

Merk	CG POWER
Serial Number	3011070015
Nominal rating MVA	60
Frekuensi	50 Hz
Fasa	3
Sistem pendingin	ONAN-ONAF

HV Terminal	
MVA	60
Arus	230.9 A
Kv	150
LV Terminal	
MVA	60
Arus	$285.8\sqrt{3}$ A
Kv	70

### B. Data Pembebanan pada Transformator Tenaga

Sampel data pembebanan pada transformator tenaga yang diambil untuk penelitian terhitung pada tanggal 30 Maret 2021 s.d 30 Juni 2021. Data pembebanan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data pembebanan pada transformator tenaga Unit II GI Pekalongan

Waktu (tanggal)	Transformator Tenaga Unit II			
	I (A)	V(KV)	P (MW)	Top Oil (°C)
30-03-2021	61	70	-6	57
27-04-2021	50	70	-5	57
27-05-2021	40	70	3	55
30-06-2021	76	70	-7	58

Berdasarkan Tabel 2 dapat dilihat data beban, arus, tegangan, dan *top oil* pada transformator tenaga unit II GI Pekalongan. Data hasil pengukuran dalam keadaan beban puncak yaitu pada pukul 21.00 wib. Berdasarkan Tabel 2 hasil pengukuran arus tertinggi ialah sebesar 76 A dan nilai arus terkecil ialah sebesar 40 A. Nilai tegangan sisi sekunder transformator yang digunakan ialah sebesar 70 KV. Nilai *top oil* transformator tertinggi ialah sebesar 58°C dan yang terendah ialah sebesar 55°C. Nilai arus dan nilai suhu *top oil* transformator dipengaruhi oleh beban listrik yang digunakan. Semakin besar energi listrik yang diterima atau dikirim, maka semakin besar nilai arus dan nilai suhu *top oil* transformator yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa nilai arus, suhu *top oil* transformator dan beban listrik memiliki hubungan yang linear satu sama lain.

### C. Data Suhu Bagian Luar Bushing dan Data Suhu Lingkungan

Data suhu bagian luar bushing transformator dan suhu lingkungan yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Data suhu bushing bagian luar bushing dan data suhu lingkungan

Waktu (tanggal)	Bushing Transformator	
	Suhu bagian luar bushing transformator (°C)	Suhu Lingkungan(°C)
30-03-2021	21	23
27-04-2021	25	24
27-05-2021	21	24
30-06-2021	26	23

Tabel 3 menjelaskan data pengukuran suhu bagian luar bushing dan suhu lingkungan dalam kondisi beban puncak. Suhu bagian luar bushing transformator tertinggi ialah sebesar 26°C dan suhu bagian luar bushing transformator terkecil ialah sebesar 21°C. Suhu bagian luar bushing transformator ketika beroperasi diukur dengan menggunakan alat *thermovisi*. *Thermovisi* merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur suhu pada peralatan listrik. *Thermovisi* digunakan dengan cara mengarahkan sinar laser *thermovisi* ke arah peralatan listrik yang diukur sehingga suhu akan muncul pada LCD *thermovisi*. Hasil dari pengukuran dengan menggunakan alat *thermovisi* dipengaruhi oleh suhu *top oil* transformator, beban listrik, dan suhu lingkungan. Nilai suhu lingkungan yang digunakan ialah sebesar 23°C dan 24°C. Menurut IEEE, Suhu lingkungan yang dihasilkan tidak boleh di atas nilai 40°C dan tidak boleh di bawah -30°C. Berdasarkan standar IEEE yang digunakan, maka dapat dijelaskan bahwa suhu lingkungan pada bushing transformator masih dikategorikan dalam kondisi normal.

### D. Proses Meshing

Tahapan *mesh* ini akan membagi elemen-elemen menjadi kecil untuk dilakukan perhitungan. Adapun proses *meshing* yang dilakukan pada analisa *hot spot* dapat dilihat pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2 Menunjukkan proses *meshing* yang dilakukan pada bushing transformator. *Meshing* tersebut akan menyelesaikan persamaan dan perhitungan yang digunakan dalam analisa seperti perhitungan kuat medan listrik, perhitungan kerapatan arus, dan *joule heating*. Proses *meshing* akan menyelesaikan perhitungan

pada setiap percobaan sehingga didapatkan nilai dari suhu *hot spot*.



Gambar 2. Meshing pada bushing transformator

#### E. Hasil Suhu *Hot spot* pada Bushing Transformator

Setelah melakukan simulasi suhu *hot spot* pada setiap percobaan, maka dapat dibuat Tabel data hasil suhu *hot spot* pada bushing transformator unit II GI Pekalongan. Hasil analisa suhu *hot spot* berdasarkan metode elemen hingga dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data hasil suhu *hot spot* pada bushing transformator

Waktu (tanggal)	Bushing transformator tenaga unit II			
	I (A)	Suhu Lingkungan	Top oil temperat ure (°C)	Suhu <i>hot spot</i> (°C)
30-03-2021	61	23	57	58.8
27-04-2021	50	24	57	58.8
27-05-2021	40	24	55	56.85
30-06-2021	76	23	58	59.85

Tabel 4 menjelaskan hasil analisa suhu *hot spot* pada bushing transformator dengan berdasarkan metode elemen hingga. Setelah dilakukan percobaan, maka dapat dilihat nilai suhu *hot spot* tertinggi ialah sebesar 59.85 °C dan nilai suhu *hot spot* terkecil ialah sebesar 56.8°C. Suhu *hot spot* tertinggi terdapat pada tanggal 30 Juni 2021 dan suhu *hot spot* terkecil terdapat pada tanggal 27 Mei 2021.

Menurut standar IEEE, batas suhu *hot spot* tertinggi pada bushing transformator ialah sebesar 105°C. Suhu *hot spot* yang melewati standar batas suhu yang telah ditetapkan maka dapat menyebabkan kerusakan pada bushing transformator dan bagian-bagian transformator lainnya. Penelitian ini, hasil simulasi suhu *hot spot* yang dilakukan sebanyak empat percobaan menunjukkan bahwa suhu-suhu *hot spot* yang dihasilkan masih di bawah

suhu 105°C, hasil ini menjelaskan bahwa suhu *hot spot* yang dihasilkan masih dalam keadaan normal karena masih di bawah standar suhu yang ditetapkan.

#### V. KESIMPULAN

1. Simulasi dan perhitungan yang dilakukan sebanyak empat kali percobaan dengan menggunakan metode elemen hingga dan standar IEEE 100-1995, didapatkan suhu *hot spot* tertinggi dengan menggunakan metode elemen hingga ialah sebesar 59.85°C. Suhu *hot spot* tertinggi yang dihasilkan dari kedua metode tersebut terjadi pada tanggal 30-06-2021.
2. Standar IEEE menetapkan bahwa suhu *hot spot* tidak boleh lebih dari 105°C karena dapat menyebabkan kerusakan pada bushing transformator. Suhu *hot spot* yang dihasilkan masih di bawah 105°C, hal ini menjelaskan bahwa suhu *hot spot* pada bushing transformator Unit II GI Pekalongan masih dalam kategori normal.

#### REFERENSI

- [1] Setyowibowo, Yudi, 2013. "Ini penyebab trafo PLNmeledak", <https://metro.sindonews.com/berita/790250/31/ini-penyebab-trafo-pln-meledak>, diakses pada 27 April 2021 pukul 11:32 wib.
- [2] Sofyan, 2015. "Pengaruh Pembebanan Terhadap Efisiensi dan Usia Transformator (Studi Kasus Transformator IV Gardu Induk Sukamerindu Bengkulu) Berdasarkan Standar IEC 60076-7" dalam Amplifier (ISSN: 2089-2020 vol. 5, no. 2, Nopember 2015). Bengkulu : Universitas Bengkulu.
- [3] Allahbakhshi, M. and M. Akbari, 2016. "Heat analysis of the power transformer bushings using the finite element method" dalam Applied Thermal Engineering (vol 100, May 2016 pages 714-720). Shiraz : Shiraz University.
- [4] Erdeni, I., A. Ozdemir, and S. Ilhan, 2013. "Improvement of Thermal Performance of 36 kV DAF 30 Type Bushing" dalam 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. Istanbul : Istanbul Technical University.
- [5] Yang, Z., J. Ruan., D. Huang., Z. Du., L. Tang., and T. Zhou, 2017. "Calculation of hot spot temperature of transformer bushing considering current fluctuation" dalam IEE Access (vol 7, August 2019 pages 120441 – 1204480). Wuhan : Wuhan Unive
- [6] PT. PLN (PERSERO), 2014. BUKU PEDOMANPEMELIHARANTRANSFORMATOR TENAGA.Jakarta: PT. PLN (PERSERO).

- [7] Iskandar, Soetyono, 2014. PERPINDAHAN PANAS. Yogyakarta : CV. Budi Utama.
- [8] Alie, Muhammad Z. M. dan Muhammad I, 2019. Perhitungan Kekuatan Kapal Dengan Metode Elemen Hingga. Yogyakarta : CV. Budi Utama , yogyakarta.
- [9] Hidajat, R. 2005. Teori dan Penerapan Metode Elemen Hingga. Surakarta: UNS Press.
- [10] Marpaung, Jonathan Liviera, 2019. “Implementasi Metode Elemen Hingga pada Perpindahan Panas”. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- [11] Akbari, M., M. Allahbakhshi, and R. Mahmoodian, 2017. “Heat analysis of the power transformer bushings in the transient and steady states considering the load variations,” Dalam Applied Thermal Engineering ( vol. 121, 2 may pages 999–1010) Shiraz : Shiraz University.
- [12] Tandiono, Sudirman Rakasidih, 2017. “Analisis Masalah Perpindahan Panas Tiga Dimensi Menggunakan Metode Elemen Hingga”. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sumatera Utara, Medan.