

ANALISIS PENGARUH BENTUK STIFFENER TERHADAP KEKUATAN MAIN-TANK PADA TRANSFORMATOR TENAGA 60MVA

Khoirudin ⁽¹⁾

⁽¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Buana Perjuangan Karawang
Jl. HS. Ronggowaluyo Telukjambe Timur, Karawang 41361.

email: khoirudin@ubpkarawang.ac.id

ABSTRAK

Transformator adalah perangkat statis yang digunakan untuk mentransfer energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain melalui induksi elektromagnetik tanpa perubahan frekuensi. Salah satu komponen utama transformator tenaga adalah tangki transformator. Struktur tangki transformator harus bisa menahan beban tekanan, vacuum, lifting, jacking, dan transportasi. Untuk mengurangi beban tekanan dan lendutan maka tangki transformator dipasang stiffener pada semua sisi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan tangki transformator dengan pendekatan numerik. Tangki transformator dipasang stiffener dengan tiga variasi yaitu tipe flat, tipe T dan tipe box dengan variasi tekanan yaitu sebesar 133 Pa dan 98 kPa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tegangan, regangan, dan deformasi pada masing-masing desain tangki transformator tenaga 150/20 kV 60 MVA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain tangki transformator dengan stiffener tipe T mempunyai tegangan (stress) dan regangan (strain) paling rendah dibanding desain yang lain. Pada tekanan 133 Pa tegangan (stress) yang terjadi pada tangki transformator dengan stiffener tipe T sebesar 0,255 MPa dan regangan (strain) sebesar 0,0000009, sedangkan pada tekanan 98 kPa tegangan (stress) yang terjadi sebesar 188 MPa dan regangan (strain) sebesar 0,000664. Desain tangki transformator dengan stiffener tipe box mempunyai deformasi (displacement) paling rendah dibanding dengan desain yang lain. Pada tekanan 133 Pa deformasi yang terjadi pada tangki transformator dengan stiffener tipe box sebesar 0,0049 mm, sedangkan pada tekanan 98 kPa sebesar 3,63 mm.

Kata kunci: transformator tenaga, tangki transformator, tegangan, regangan, deformasi.

ABSTRACT

Transformer is a static device used to transfer electrical energy from one circuit to another through electromagnetic induction without changes in frequency. One of the main components of a power transformer is a transformer tank. The transformer tank structure must be able to withstand pressure, vacuum, lifting, jacking and transportation loads. To reduce the pressure and deflection load, transformer tanks are installed with stiffener on all sides. This research was conducted to determine the strength of the transformer tank with a numerical approach. Transformer tank mounted stiffener with three variations of type namely flat type, T-type and box type with pressure variations that are 133 Pa and 98 kPa. This study aims to determine the stress, strain, and deformation in each 150/20 kV 60 MVA power transformer tank design. The results showed that the design of the transformer tank with T-type stiffener has the lowest stress and strain compared to other designs. At a pressure of 133 Pa the stress that occurs in a transformer tank with a T-type stiffener is 0.255 MPa and strain is 0.0000009, while at pressure 98 kPa the stress occurs at 188 MPa and strain is 0.000664. Transformer tank design with box type stiffener has the lowest deformation compared to other designs. At a pressure of 133 Pa, the deformation that occurs in a transformer tank with a box-type stiffener is 0.0049 mm, while at a pressure of 98 kPa is 3.63 mm.

Keywords: power transformer, transformer tank, stress, strain, deformation.

PENDAHULUAN

Dalam aplikasi tenaga listrik, perangkat transformator tenaga diperlukan untuk transfer energi listrik. Transfer energi listrik berlangsung antara dua atau lebih sirkuit karena induksi elektromagnetik. Trafo digunakan

untuk menaikkan atau menurunkan tegangan. Transformator 60MVA umumnya digunakan pada gardu induk 150 kV.

Salah satu komponen utama transformator tenaga adalah tangki transformator. Tangki transformator memiliki struktur yang kompleks

dengan 10-15% dari total berat transformator. Dalam kondisi operasi transformator harus diisi dengan oli yang memberikan tekanan pada dinding tangki [1]. Tangki transformator biasanya terbuat dari *steel plate*. Struktur tangki transformator harus bisa menahan beban tekanan, *vacuum*, *lifting*, *jacking*, dan transportasi. Untuk mengurangi beban tekanan dan lendutan maka tangki transformator dipasang *stiffener* pada semua sisi. Bentuk *stiffener* bervariasi disesuaikan dengan beban pada tangki transformator.

Penelitian sebelumnya tentang tangki transformator antara lain :

- a) Desain transformator tahan gempa [2]. Dalam penelitiannya, skema baru berdasarkan metode elemen hingga telah dikembangkan untuk desain transformator daya tahan gempa. Kriteria kinerja untuk transformator ditentukan sebelum tahap desain berdasarkan fungsinya. Transformator memenuhi syarat seismik menggunakan teknik canggih yang melibatkan kedua analisis seismik untuk memastikan bahwa transformator aman dari gempa bumi.
- b) Metode numerik untuk analisis deformasi dan pecahnya tangki transformator daya karena *internal arcing fault* [3]. Dalam penelitiannya disajikan alat komputasi numerik 3-D untuk mensimulasikan perilaku dinamis struktural karena tekanan berlebih di dalam tangki transformator. Metode yang digunakan adalah *arcing fault* sebesar 17,3 MJ dan 6,3 MJ pada transformator jenis *oil immersed* 360 MVA/220 kV. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa peningkatan tekanan dan distribusi tegangan mekanis tidak seragam dan tegangan cenderung berkonsentrasi pada bagian penghubung tangki. Model teoritis dan metode simulasi numerik yang dilakukan dapat digunakan sebagai

pengganti untuk uji lapangan yang berisiko dan dengan biaya mahal.

- c) Desain dan finite element analysis pada tangki transformator 15 MVA [4]. Penelitian dilakukan untuk meningkatkan rasio kekuatan terhadap berat. Metode yang digunakan adalah dengan melakukan simulasi terhadap 12 kasus berbeda dengan variasi ketebalan dinding tangki dan penampang *stiffener*. *Finite element analysis* (FEA) dari semua 12 kasus dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS workbench 17.0. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ditemukan alternatif desain terbaik dengan nilai *stress* 194.86 mPa dan deformasi 4.74 mm berada di area dinding samping dan penutup atas dan pelat bawah.

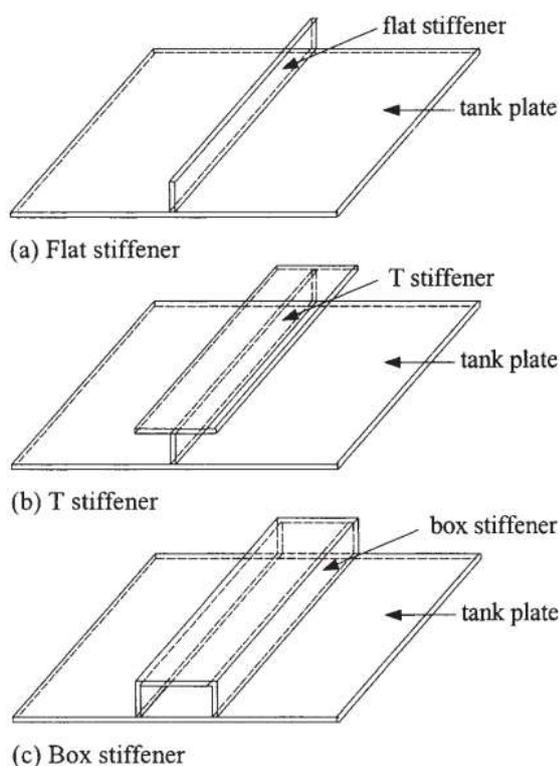
Berlatar belakang beberapa referensi yang ada maka peneliti akan melakukan analisis pada tangki transformator 150/20 kV 60 MVA dengan melakukan variasi pada *stiffener*. Dari hasil optimasi diharapkan akan menghasilkan desain tangki transformator dengan *stress* dan deformasi yang optimum.

Landasan Teori

Transformator adalah perangkat statis yang digunakan untuk mentransfer energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain melalui induksi elektromagnetik tanpa perubahan frekuensi[5]. Salah satu komponen utama transformator adalah tangki transformator. Tangki transformator berfungsi untuk menempatkan komponen lain seperti *winding*, *core*, oli, dan beberapa komponen lainnya [6].

Tangki transformator adalah struktur tertutup yang dibuat oleh pelat baja. Tangki transformator memiliki struktur yang kompleks dengan 10-15% dari total berat sebuah transformator [1]. Tangki transformator dirancang untuk tekanan yang lebih tinggi dari tekanan operasi pada transformator [7]. Salah satu cara untuk memperkuat struktur tangki transformator adalah dengan menambahkan *stiffener*. *Stiffener* biasanya dipasang di semua

sisi dan juga di penutup atas tangki untuk mengurangi tekanan dan lendutan dari berbagai jenis beban. Biasanya *stiffener* dipasang *vertical*, tetapi terkadang ada yang dipasang *horizontal*. *Stiffener* dirancang untuk bisa mendistribusikan beban angkat yang benar dan lebih seragam. Pemasangan *stiffener* tidak hanya mempertimbangkan kekuatan tetapi juga mempertimbangkan berbagai asesoris yang harus dipasang pada tangki transformator [7]. Pada umumnya *stiffener* mempunyai 3 model yaitu *flat stiffener*, *T stiffener*, dan *box stiffener*.



Gambar 1. Tipe *stiffener* [7]

Stress analisis pada tangki transformator dapat dilakukan dengan dua metode yaitu metode analitik dan metode numerik. Metode analitik digunakan untuk menentukan persyaratan pengerasan untuk membatasi tegangan dan lendutan pada konstruksi tangki sederhana. Bentuk tangki transformator biasanya kompleks dan penerapan metode analitis sulit dilakukan. Misalnya, jika tangki tidak persegi panjang dan jika ada banyak kantong (struktur ekstrusi) atau bukaan, metode

numerik seperti *Finite Element Method* (FEM) digunakan untuk menentukan tegangan dan lendutan dalam berbagai kondisi beban [7]. Metode elemen hingga atau *Finite Element Method* (FEM) adalah alat analisis numerik yang sangat efektif untuk simulasi komponen struktural dalam berbagai kondisi pembebanan. Analisis FEM dapat digunakan untuk optimisasi material, peningkatan keandalan, analisis kegagalan dan tindakan korektif, verifikasi desain baru, dll. Sebelum munculnya FEM, banyak perkiraan harus dibuat dalam metode analitik untuk geometri tangki kompleks, dan itu adalah hampir mustahil untuk memprediksi kinerja struktur yang tepat dalam kondisi pembebanan yang diberikan. Tidak mungkin bagi desainer untuk mengetahui margin atau faktor keamanan untuk desain baru. Karena faktor ketidaktahuan ini, perancang harus meletakkan bahan tambahan sehingga meningkatkan biaya transformator. Menggunakan analisis FEM, dimungkinkan untuk mendeteksi zona *stress* tinggi dan mengambil tindakan korektif / *preventif* yang sesuai. Analisis FEM dapat digunakan untuk menyelidiki masalah seperti getaran, tekuk, perilaku non-linear, dll [7].

Domain masalah yang diberikan dibagi menjadi beberapa elemen, yaitu garis lurus untuk domain 1-D, elemen segitiga atau segiempat untuk domain 2-D, dan elemen tetrahedral atau kubus untuk domain 3-D. Tangki transformator dapat dianggap sebagai 2-D dan dapat didiskritisasi menjadi elemen 2-D. Fungsi solusi yang diperlukan diperkirakan lebih dari satu elemen dengan interpolasi antara nilai-nilai pada *node*-nya. Fungsi interpolasi dapat berupa polinomial linier atau lebih tinggi. maka u_i dan v_i menjadi komponen perpindahan x dan y masing-masing pada *node* elemen segitiga ($i = 1, 2, 3$). Vektor $U = (u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3)^T$ kemudian mewakili perpindahan nodal. Perpindahan ke seluruh area elemen adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} U \quad (1)$$

Dimana $N_i(x,y)$ adalah fungsi interpolasi. Menggunakan simbol standar, vektor regangan $\epsilon = (\epsilon_x \ \epsilon_y \ \gamma_{xy})^T$, maka persamaanya menjadi sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix} U$$

atau

$$\epsilon = [B]U \tag{2}$$

Energi potensial dari elemen (e) tergantung pada *displacements* dari area elemen. Sesuai persamaan 1, ini menjadi fungsi dari nodal displacement vector U . Dengan tidak adanya gaya internal, regangan awal dan tegangan awal, maka persamaanya menjadi :

$$E = \frac{1}{2} \int_v (\epsilon^T D \epsilon) dV - F^T U = \frac{1}{2} \int_v (U^T B^T D B U) dV - F^T U \tag{3}$$

Dimana D adalah matriks elastisitas yang sifat material, F adalah vektor beban nodal, dan V adalah volume elemen, maka persamaanya dapat disederhanakan menjadi :

$$\partial E / \partial U = [K]^{(e)} U - F = 0 \tag{4}$$

Dimana $[K]^{(e)} = \int_v B^T D B dV$

Semua persamaan elemen tersebut digabungkan terlebih dahulu kemudian jumlah nodal elemen digantikan dengan dengan jumlah

nodal global yang sesuai, dan menambahkan semua persamaan elemen. Ini akan membentuk persamaan linear sebagai berikut :

$$K \bar{U} = \bar{F} \tag{5}$$

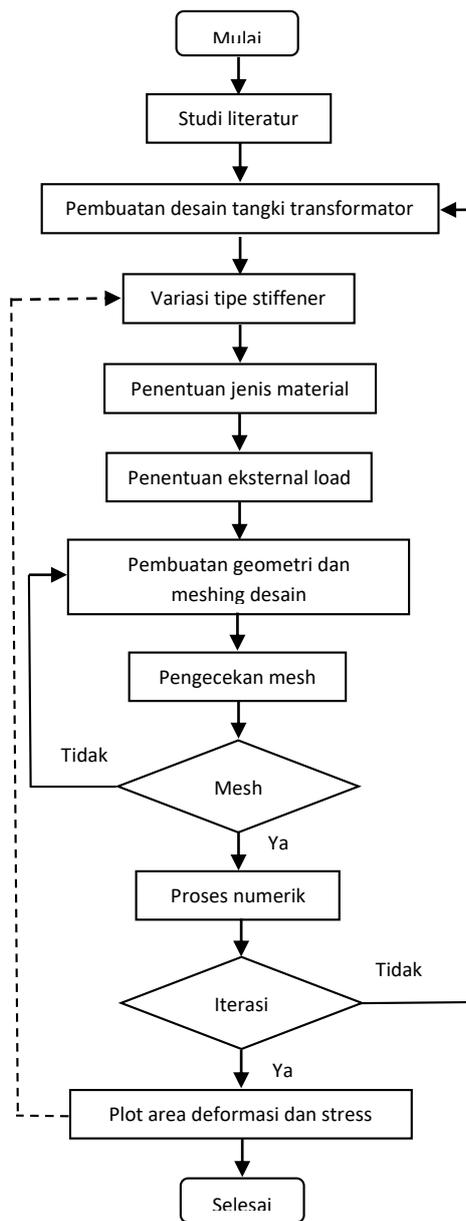
METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam analisa kekuatan tangki transformator dilakukan dengan pendekatan numerik.

Penelitian ini memerlukan beberapa tahapan sebagai berikut :

- a. Pengumpulan informasi melalui studi pustaka yang berkaitan dengan tangki transformator. Berdasarkan studi pustaka tersebut juga ditentukan variabel-variabel apa saja yang akan digunakan untuk perhitungan.
- b. Desain tangki transformator tenaga 150/20 kV 60 MVA dengan spesifikasi sebagai berikut :
 1. Dimensi :
 - Panjang : 6000 mm
 - Lebar : 2200 mm
 - Tinggi : 3200 mm
 2. Material menggunakan *carbon steel* setara ST37 atau SS400 dengan ketebalan sebagai berikut:
 - Dinding : 10mm
 - Bawah : 30mm
 - Atas : 25mm
- c. Analisis desain tangki transformator jika tidak menggunakan *stiffener* untuk mendapatkan data kekuatan tangki transformator.
- d. Optimasi desain tangki transformator yaitu sebagai berikut :
 1. Desain tangki transformator dipasang *stiffener* tipe *flat*.
 2. Desain tangki transformator dipasang *stiffener* tipe T.
 3. Desain tangki transformator dipasang *stiffener* tipe *box*.
- e. Penulisan laporan.

Penelitian ini menggunakan langkah-langkah sebagai berikut :



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini merupakan penelitian yang dilakukan dengan variasi tipe *stiffener* yaitu tipe *flat*, tipe T, dan tipe *box*.

Simulasi dilakukan pada kondisi *static* untuk mengetahui besaran tegangan, regangan dan deformasi pada dinding transformator tenaga.

Data yang diperoleh adalah data tegangan, regangan, dan deformasi pada tangki

transformator tenaga. Data hasil analisis dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 1. Data tegangan (*stress*) pada dinding tangki transformator tenaga

Data tegangan (<i>stress</i>) pada tangki transformator (MPa)				
	Tanpa <i>stiffener</i>	<i>Stiffener</i> tipe Flat	<i>Stiffener</i> tipe T	<i>Stiffener</i> tipe Box
133 pa	2.27E+00	6.53E-01	2.55E-01	2.81E-01
98kpa	1.61E+03	4.77E+02	1.88E+02	2.07E+02

Tabel 2. Data regangan (*strain*) pada dinding transformator tenaga

Data regangan (<i>strain</i>) pada tangki transformator				
	Tanpa <i>stiffener</i>	<i>Stiffener</i> tipe Flat	<i>Stiffener</i> tipe T	<i>Stiffener</i> tipe Box
133 pa	7.11E-06	3.00E-06	9.00E-07	1.10E-06
98kpa	5.12E-03	2.19E-03	6.64E-04	8.11E-04

Tabel 3. Data deformasi (*displacement*) pada dinding transformator tenaga

Data deformasi (<i>displacement</i>) pada tangki transformator (mm)				
	Tanpa <i>stiffener</i>	<i>Stiffener</i> tipe Flat	<i>Stiffener</i> tipe T	<i>Stiffener</i> tipe Box
133 pa	3.16E-01	5.06E-03	6.57E-03	4.91E-03
98kpa	2.33E+02	3.73E+00	4.84E+00	3.63E+00

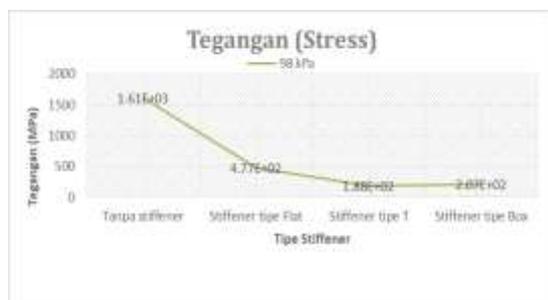
Pada tabel 1 dapat dilihat bahwa pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) 133 Pa, tegangan (*stress*) tertinggi terjadi pada tangki transformator tanpa *stiffener* yaitu sebesar 2,27E+00 MPa atau 2,27 MPa. Sedangkan tegangan (*stress*) paling rendah terjadi pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe T yaitu sebesar 2,55E-01 MPa atau 0,255 MPa. Pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) 133 Pa, pengaruh bentuk *stiffener* terhadap besarnya tegangan (*stress*) dapat dilihat pada grafik 1.

Pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan 98 kPa, tegangan (*stress*) tertinggi terjadi pada tangki transformator tanpa *stiffener* yaitu sebesar 1,61E+03 MPa atau 1610 MPa. Sedangkan tegangan (*stress*) paling rendah

terjadi pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe T yaitu sebesar $1,88E+02$ MPa atau 188 MPa. Pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan 98 kPa, pengaruh bentuk *stiffener* terhadap besarnya tegangan (*stress*) dapat dilihat pada grafik 2.



Grafik 1. Pengaruh bentuk *stiffener* terhadap tegangan (*stress*) pada tangki transformator tenaga dengan *negative pressure* sebesar 133 Pa.



Grafik 2. Pengaruh bentuk *stiffener* terhadap tegangan (*stress*) pada tangki transformator tenaga dengan *positif pressure* sebesar 98 kPa.

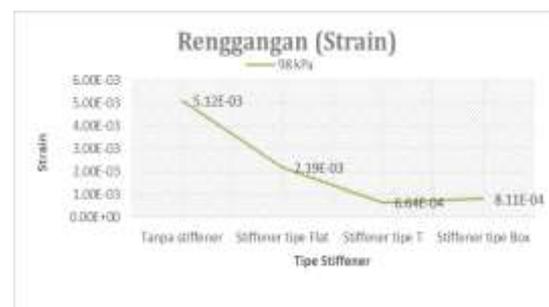
Pada tabel 2 dapat dilihat bahwa pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) 133 Pa, regangan (*strain*) tertinggi terjadi pada tangki transformator tanpa *stiffener* yaitu sebesar $7,11E-06$ atau 0,00000711. Sedangkan regangan (*strain*) paling rendah terjadi pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe T yaitu sebesar $9,00E-07$ atau 0,0000009. Pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) 133 Pa, pengaruh bentuk *stiffener* terhadap besarnya regangan (*strain*) pada tangki transformator dapat dilihat pada grafik 3.

Pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan 98 kPa, regangan (*strain*) tertinggi

terjadi pada tangki transformator tanpa *stiffener* yaitu sebesar $5,12E-03$ MPa atau 0,00512 MPa. Sedangkan regangan (*strain*) paling rendah terjadi pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe T yaitu sebesar $6,64E-4$ MPa atau 0,000664 MPa. Pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan 98 kPa, pengaruh bentuk *stiffener* terhadap besarnya regangan (*strain*) pada tangki transformator dapat dilihat pada grafik 4.



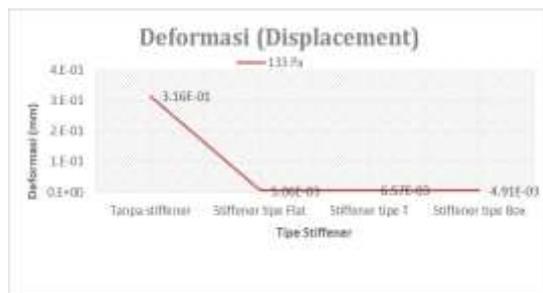
Grafik 3. Pengaruh bentuk *stiffener* terhadap rengangan (*strain*) pada tangki transformator tenaga dengan *negative pressure* sebesar 133 Pa.



Grafik 4. Pengaruh bentuk *stiffener* terhadap regangan (*strain*) pada tangki transformator tenaga dengan *positif pressure* sebesar 98 kPa.

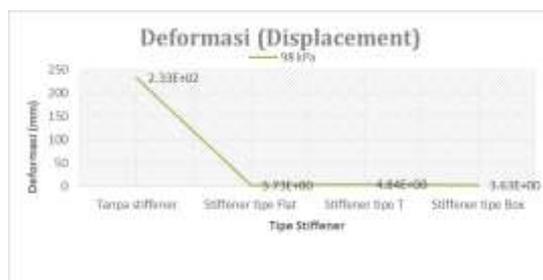
Pada tabel 3 dapat dilihat bahwa pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) 133 Pa, deformasi (*displacement*) tertinggi terjadi pada tangki transformator tanpa *stiffener* yaitu sebesar $3,16E-01$ mm atau 0,316 mm. Sedangkan deformasi (*displacement*) paling rendah terjadi pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe box yaitu sebesar $4,91E-03$ mm atau 0,0049 mm. Pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) 133 Pa, pengaruh bentuk *stiffener* terhadap besarnya

deformasi (*displacement*) pada tangki transformator dapat dilihat pada grafik 5.



Grafik 5. Pengaruh bentuk *stiffener* terhadap deformasi (*displacement*) pada tangki transformator tenaga dengan *negative pressure* sebesar 133 Pa.

Pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan 98 kPa, deformasi (*displacement*) tertinggi terjadi pada tangki transformator tanpa *stiffener* yaitu sebesar 2,33E+03 mm atau 233,13 mm. Sedangkan deformasi (*displacement*) paling rendah terjadi pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe *box* yaitu sebesar 3,63E+00 mm atau 3,63 mm. Pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan 98 kPa, pengaruh bentuk *stiffener* terhadap besarnya deformasi (*displacement*) pada tangki transformator dapat dilihat pada grafik 6.

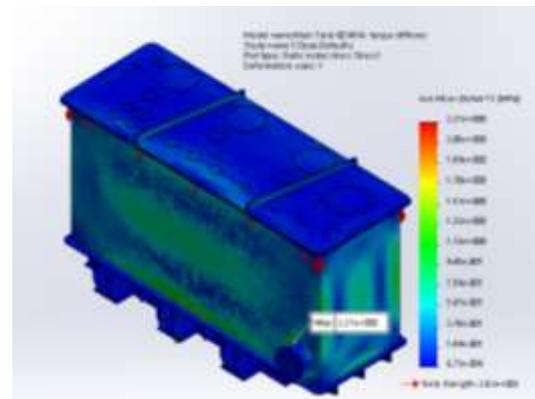


Grafik 6. Pengaruh bentuk *stiffener* terhadap deformasi (*displacement*) pada tangki transformator tenaga dengan *positif pressure* sebesar 98 kPa.

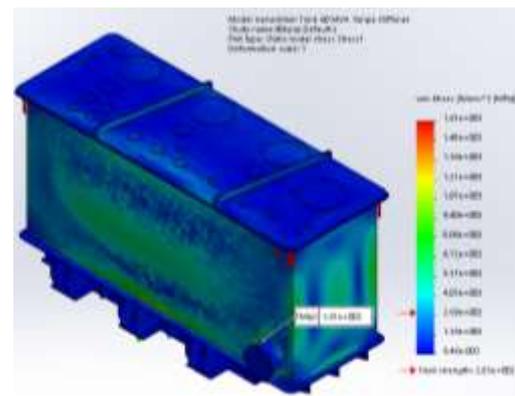
Untuk lebih jelasnya profil tegangan (*stress*), regangan (*strain*), dan deformasi (*displacement*) pada tangki transformator dapat dilihat pada gambar 3.

Pada gambar 3 di atas dapat dilihat bahwa pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) sebesar 133 Pa, tangki transformator

mengalami tegangan (*stress*) tertinggi terjadi pada sambungan tubular yaitu sebesar 2,27E+00 MPa atau 2,27 MPa. Tegangan tersebut masih dibawah dari *yield strength* material yaitu sebesar 2,827E+02 MPa atau 282,7 MPa.

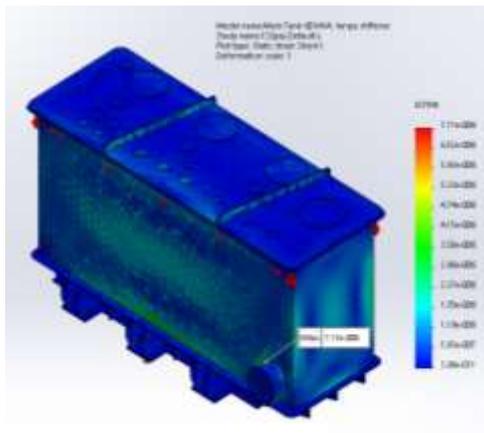


Gambar 3. Profil distribusi tegangan (*stress*) pada tangki transformator tanpa *stiffener* dengan *negative pressure* sebesar 133 Pa.



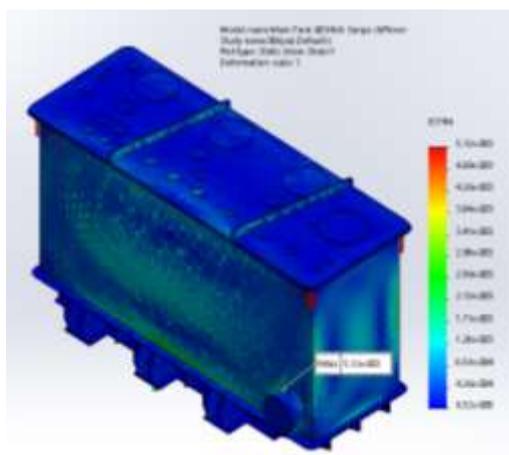
Gambar 4. Profil distribusi tegangan (*stress*) pada tangki transformator tanpa *stiffener* dengan *positif pressure* sebesar 98 kPa.

Pada gambar 4 di atas dapat dilihat bahwa pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan sebesar 98 kPa, tangki transformator mengalami tegangan (*stress*) tertinggi terjadi pada sambungan tubular yaitu sebesar 1,61E+03 MPa atau 1610 MPa. Tegangan tersebut bisa menyebabkan keretakan karena lebih besar dari *yield strength* material yaitu sebesar 2,827E+02 MPa atau 282,7 MPa.



Gambar 5. Profil distribusi regangan (*strain*) pada tangki transformator tanpa *stiffener* dengan *negative pressure* sebesar 133 Pa.

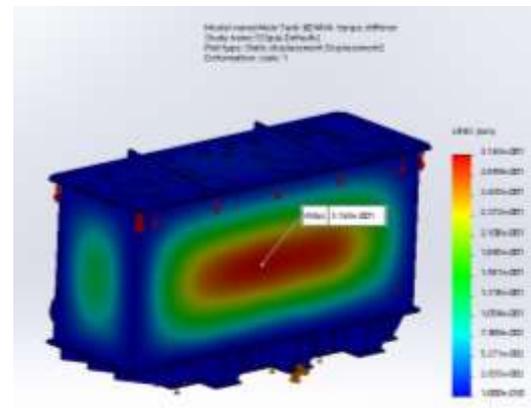
Pada gambar 5 di atas dapat dilihat bahwa pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) sebesar 133 Pa, tangki transformator mengalami regangan (*strain*) tertinggi terjadi pada sambungan tubular yaitu sebesar $7,11E+06$ atau 7110000.



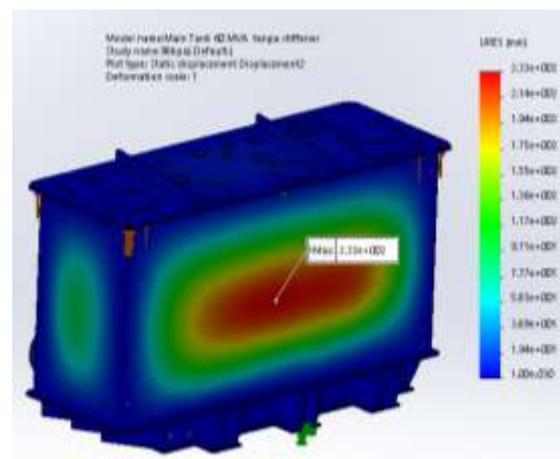
Gambar 6. Profil distribusi regangan (*strain*) pada tangki transformator tanpa *stiffener* dengan *positif pressure* sebesar 98 kPa.

Pada gambar 6 di atas dapat dilihat bahwa pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan sebesar 98 kPa, tangki transformator mengalami regangan (*strain*) tertinggi terjadi pada sambungan tubular yaitu sebesar $5,12E+03$ atau 512.

Pada gambar 7 dapat dilihat bahwa pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) sebesar 133 Pa, tangki transformator mengalami deformasi (*displacement*) tertinggi terjadi pada dinding tangki transformator yaitu sebesar $3,16E+01$ mm atau 31,6 mm.



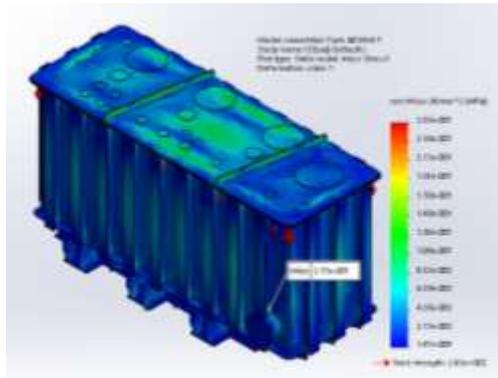
Gambar 7. Profil distribusi deformasi (*displacement*) pada tangki transformator tanpa *stiffener* dengan *negative pressure* sebesar 133 Pa.



Gambar 8. Profil distribusi deformasi (*displacement*) pada tangki transformator tanpa *stiffener* dengan *positif pressure* sebesar 98 kPa.

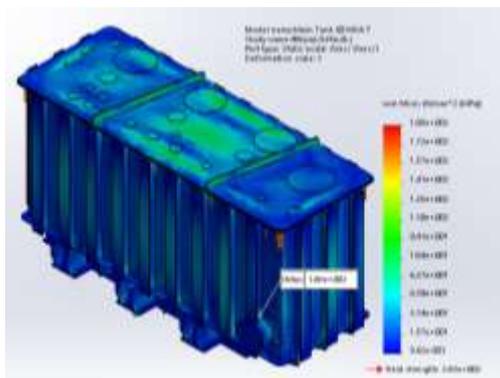
Pada gambar 8 di atas dapat dilihat bahwa pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan sebesar 98 kPa, tangki transformator mengalami deformasi (*displacement*) tertinggi

terjadi pada dinding tangki transformator yaitu sebesar $2,33E+02$ mm atau 233 mm.



Gambar 9. Profil distribusi tegangan (*stress*) pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe T dengan *negative pressure* sebesar 133 Pa.

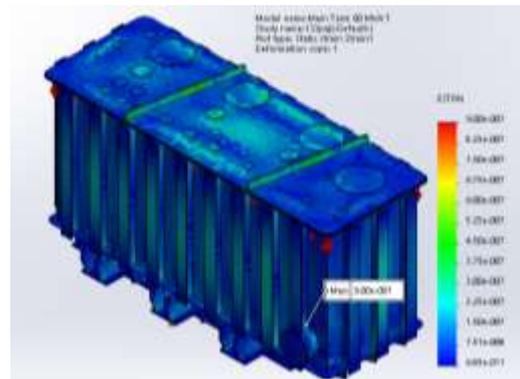
Pada gambar 9 di atas dapat dilihat bahwa pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) sebesar 133 Pa, tangki transformator mengalami tegangan (*stress*) tertinggi terjadi pada sambungan tubular yaitu sebesar $2,55E+01$ MPa atau 25,5 MPa. Tegangan tersebut masih dibawah dari *yield strength* material yaitu sebesar $2,827E+02$ MPa atau 282,7 MPa.



Gambar 10. Profil distribusi tegangan (*stress*) pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe T dengan *positif pressure* sebesar 98 kPa.

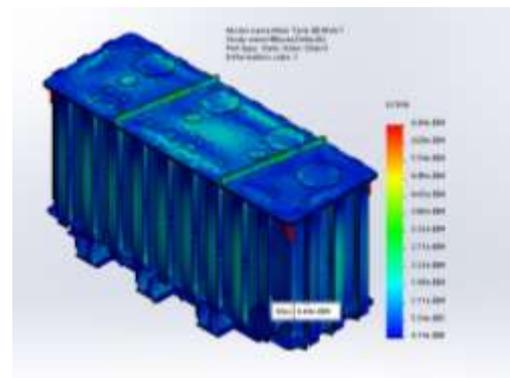
Pada gambar 10 di atas dapat dilihat bahwa pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan sebesar 98 kPa, tangki transformator mengalami tegangan (*stress*) tertinggi terjadi pada sambungan tubular yaitu sebesar

$1,88E+02$ MPa atau 188 MPa. Tegangan tersebut masih dibawah dari *yield strength* material yaitu sebesar $2,827E+02$ MPa atau 282,7 MPa.



Gambar 11. Profil distribusi regangan (*strain*) pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe T dengan *negative pressure* sebesar 133 Pa.

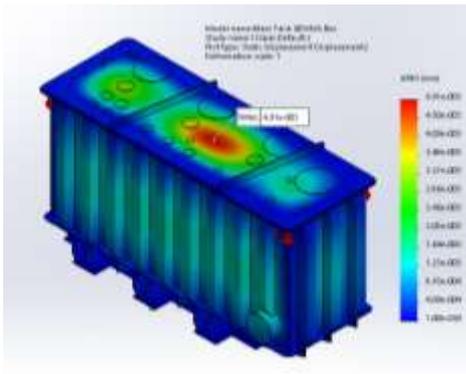
Pada gambar 11 di atas dapat dilihat bahwa pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) sebesar 133 Pa, tangki transformator mengalami regangan (*strain*) tertinggi terjadi pada sambungan tubular yaitu sebesar $9,00E-07$ atau 0,0000009.



Gambar 12. Profil distribusi regangan (*strain*) pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe T dengan *positive pressure* sebesar 98 kPa.

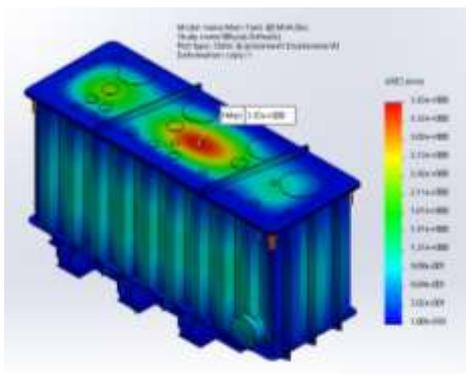
Pada gambar 12 di atas dapat dilihat bahwa pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan sebesar 98 kPa, tangki transformator mengalami regangan (*strain*) tertinggi terjadi

pada sambungan tubular yaitu sebesar $6,64E-04$ atau $0,000664$.



Gambar 13. Profil distribusi deformasi (*displacement*) pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe *box* dengan *negative pressure* sebesar 133 Pa.

Pada gambar 13 di atas dapat dilihat bahwa pada perlakuan *negative pressure* atau disedot (*vacuum*) sebesar 133 Pa, tangki transformator mengalami deformasi (*displacement*) tertinggi terjadi pada *cover tank* yaitu sebesar $4,91E-03$ mm atau $0,00491$ mm.



Gambar 14. Profil distribusi deformasi (*displacement*) pada tangki transformator dengan *stiffener* tipe *box* dengan *positif pressure* sebesar 98 kPa.

Pada gambar 14 di atas dapat dilihat bahwa pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan sebesar 98 kPa, tangki transformator mengalami deformasi (*displacement*) tertinggi terjadi pada *cover tank* yaitu sebesar $3,63E+00$ mm atau $3,63$ mm.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Pada perlakuan *negative pressure* atau di sedot (*vacuum*) sebesar 133 Pa, desain tangki transformator dengan *stiffener* tipe T mempunyai tegangan (*stress*) paling rendah dibanding dengan desain yang lain yaitu sebesar $0,255$ MPa.
- Pada perlakuan *negative pressure* atau di sedot (*vacuum*) sebesar 133 Pa, desain tangki transformator dengan *stiffener* tipe T mempunyai regangan (*strain*) paling rendah dibanding dengan desain yang lain yaitu sebesar $0,0000009$.
- Pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan 98 kPa, desain tangki transformator dengan *stiffener* tipe T mempunyai tegangan (*stress*) paling rendah dibanding dengan desain yang lain yaitu sebesar 188 MPa.
- Pada perlakuan perlakuan *positif pressure* atau ditekan 98 kPa, desain tangki transformator dengan *stiffener* tipe T mempunyai regangan (*strain*) paling rendah dibanding dengan desain yang lain yaitu sebesar $0,000664$.
- Pada perlakuan *negative pressure* atau di sedot (*vacuum*) sebesar 133 Pa, desain tangki transformator dengan *stiffener* tipe *box* mempunyai deformasi (*displacement*) paling rendah dibanding dengan desain yang lain yaitu sebesar $0,0049$ mm
- Pada perlakuan *positif pressure* atau ditekan 98 kPa, desain tangki transformator dengan *stiffener* tipe *box* mempunyai deformasi (*displacement*) paling rendah dibanding dengan desain yang lain yaitu sebesar $3,63$ mm.

REFERENSI

- [1] A. Ranade, E. Rajkumar, and S. Gaikwad, "Transformer tank optimization using design of experiments," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 34, pp. 1–7, 2016, doi: 10.17485/ijst/2016/v9i34/101003.
- [2] A. D. Shendge, "Earthquake resistant design of a transformer," *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 81, no. WIT Transactions on The Built Environment, pp. 395–404, 2005.
- [3] C. Yan, Z. Hao, S. Zhang, B. Zhang, and T. Zheng, "Numerical methods for the analysis of power transformer tank deformation and rupture due to internal arcing faults," *PLoS One*, vol. 10, no. 7, pp. 1–17, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0133851.
- [4] D. A. Gajjar, S. P. Joshi, and R. R. Patel, "DESIGN AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF A 15 MVA TRANSFORMER," vol. 2, no. 3, pp. 4068–4073, 2016.
- [5] G. D. Ashokbhai, P. R. R. Patel, and P. S. P. Joshi, "DESIGN AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF A TRANSFORMER TANK A," no. 3, pp. 789–794, 2016.
- [6] F. Heathcote, Martin J. CEing, *The J & P Transformer Book J & P Books*, Twelfth ed. oxford: Newnes, 1998.
- [7] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics*. New York, NY 10016, U.S.A.: MARCEL DEKKER, INC., 2004.