

Analisis Kerusakan Pelat Penahan Inti Transformator Daya Saat Transportasi Kapal Laut Menggunakan Metoda *Response Spectrum*

Asep Dharmanto^{1*}, Wilarso¹, Asep Saepudin¹, Hilman Sholih¹, Djoko Wahyu K², Achmad Husen²

*Email corresponding author: wilarso09@gmail.com

^{1*} Universitas Muhammadiyah Cileungsi, Cileungsi, Bogor, Jawa Barat, Indonesia. Jl. Anggrek No.25, Perum. PTSC, Cileungsi, Kec. Cileungsi, Kabupaten Bogor, Jawa Barat 16820

² Institut Sains Teknologi Nasional, Jakarta, Indonesia, Jl. Moch. Kahfi II No.30, Srengseng Sawah, Kec. Jagakarsa, Kota Jakarta Selatan, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 12630

Article history: Received: 15 Februari 2025 | Revised: 20 April 2025 | Accepted: 29 April 2025

Abstract. Core power transformer are placed in the tank with the conditions press fit 4 sides at the bottom of the tank and 4 the upper side in the crutch of the four directions of the longitudinal- transverse motion then 2 pedestals above the core transformer pressed with the tank lid at the bottom. At the time of sea transportation in transformer is experiencing the impact of recorded amounted to 3.9g, then from visible visual investigation the retaining plate was loss and there was shifting transformer core and damage. So the transformer must be manufactured back in the factory. Dynamics analysis using finite element method is required to determine whether a failure has occurred cantilever because of 1g acceleration value, so the value of 3.9g is a clash of core transformer to the tank. 3D modeling of shell wall made of original modeling for the support and tanks, while the transformer core model simplifies to a box shape shell for easy meshing. The input parameters using High Required Response Spectrum 0.5g of IEEE std 693-2005 while the measured dynamic parameter is the size range of vibration, the phenomenon of resonance and tension (stress) plate. Yield data dynamic analysis using finite element method, namely transformer might resonate with the deck of the ship, or in the event of impact on the hull due to acceleration 1g of the sway wave then the retaining plate has experienced tension over its tensile strength.

Keywords - Transformer core, retaining plate, shell, meshing, resonance, impact

Abstrak. Inti transformator daya diletakkan di dalam tangki dengan kondisi pressfit 4 sisi di bagian dasar tangki dan 4 bagian sisi atas ditopang dari 4 arah terhadap gerakan longitudinal - transversal kemudian 2 pedestal atas inti transformer ditekan dengan tutup tangki di bagian bawahnya. Pada waktu transportasi di laut transformator ini mengalami impak yang terekam sebesar 3.9g, kemudian dengan penyidikan visual terlihat lepasnya pelat penahan dan inti transformator mengalami pergeseran dan kerusakan sehingga transformator harus dimanufaktur kembali di pabriknya. Analisa dinamika menggunakan metoda elemen hingga (finite element method) diperlukan untuk mengetahui apakah kegagalan penopang sudah terjadi di atas nilai percepatan 1g, sehingga nilai 3.9g adalah benturan inti transformator ke tangkinya. Pemodelan dibuat 3D shell wall modeling orisinal untuk penopang dan tangki, sedangkan model inti transformator bentuknya disederhanakan menjadi kotak shell untuk memudahkan meshing. Parameter input menggunakan High Required Response Spectrum 0.5g dari IEEE std 693-2005 sedangkan parameter dinamik yang diukur adalah besarnya ragam getar, fenomena resonansi dan tegangan (stress) pelat. Hasil data analisa dinamik dengan menggunakan metoda elemen hingga yaitu transformator mengalami resonansi dengan dek kapal, atau bila terjadi impak di badan kapal akibat goyangan ombak di percepatan di atas 1g maka pelat penahan telah mengalami tegangan di atas kekuatan tariknya.

Kata Kunci - Inti transformator, pelat penahan, shell, meshing, resonansi, impak

PENDAHULUAN

Transportasi tangki transformator daya di atas 60 MVA, tangki transformator biasanya dikirim tanpa menggunakan oli untuk mengurangi beban alat transportasi. Beberapa aksesoris transformator besar seperti radiator dan konservator dikirim terpisah dari tangki. Dalam kondisi transportasi laut dan darat tangki transformator terikat dengan rantai (*lashing chain*) di empat sisi atas dan bawah sehingga tangki transformator seakan-akan menyatu dengan dek atau hull kapal atau lowbed truck. Sehingga tangki transformator bergerak mengikuti landasan alat transportasi.

Pada waktu pengiriman transformator dalam kondisi *dismantling* atau aksesoris yang menempel di tangki harus dilepaskan [1]. Gambar 1 ini adalah *dismantling* tangki transformator yang sedang diangkat dari dataran sisi pelabuhan ke dalam kapal menggunakan alat angkat (*big crane*).



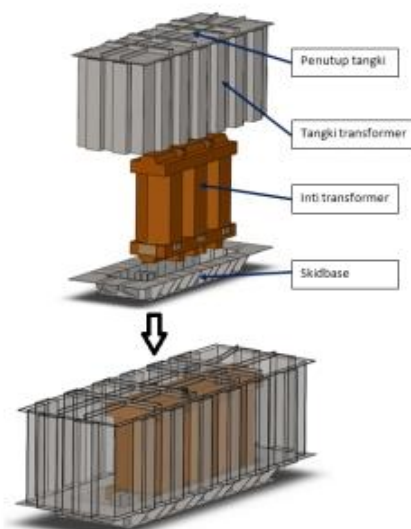
Gambar 1. Transformator diangkut ke dalam kapal.

Inti transformator daya yang terdapat di dalam tangki terdiri dari silikon steel dan lilitan tembaga yang dijepit oleh pelat baja (*yoke clamper*). Setiap lilitan fasa inti tersebut tersambung oleh sistem kabel *Cleating Lead* ke bushing-bushing terminal [2]. Setiap kabel *Cleating Lead* harus diam (*fixed*) di posisinya tidak boleh bergeser terhadap jarak minimum yang telah ditentukan [3]. Untuk membuat kondisi tetap dibuatlah sistem penopang atau pelat penahan (*guider*) yang kuat terhadap inti transformator. Ketahanan sistem penopang ini harus mampu menahan dampak, meredam getaran pada saat transportasi, saat perpindahan (*handling*) dan goyangan-getaran gempa ketika beroperasi [4].

Komponen terpenting power transformer adalah inti transformator yang terdiri dari core dan belitan tembaga (*coil assembly*) yang terletak di dalam tangki transformator [5] tidak boleh cacat atau terjadi pergeseran ketika tiba di tujuan akhir. Dalam kasus transformator ini sampai di tempat tujuan terlihat bekas benturan dalam tangki, kemudian dilakukan inspeksi bagian inti transformator terlihat lepasnya pelat penahan [6][7]. Inti transformator dan kabel-kabel penghubungnya mengalami kerusakan dan dislokasi. Berdasarkan data alat *shocklog recorder* terekam peristiwa dampak 3.9g dengan waktu kejadian ada di transportasi laut. Penelitian ini membahas penyebab lepasnya pelat penahan atas tersebut [8].

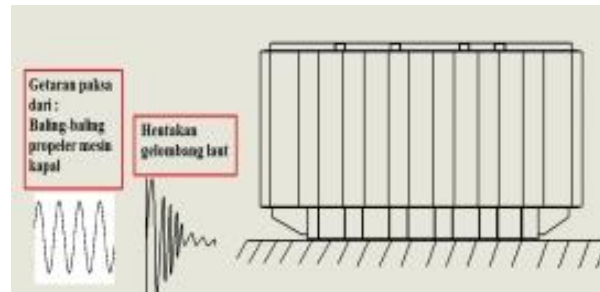
Struktur dinding tangki transformator terbuat dari baja konstruksi, inti transformator baja silikon dan tembaga [9]. Pemasangan inti transformator sebagai berikut, inti transformator pertama kali diletakkan di bagian bawah tangki (*skid base*) dengan posisi terjepit (*pressfit*) keempat sisinya melalui perantara kayu atau material isolasi non konduktor. Kemudian penutup tangki menekan inti transformator bagian atas dengan blok kayu, sedangkan untuk pergerakan horizontal bagian atas dijaga oleh pelat pelat penahan (*guider*) sebanyak 4 buah dengan perantara kayu [10].

Gambar 2 ilustrasi perakitan inti dan tangki transformator dengan sistem *loose cover type* adalah sebagai berikut: a) Bagian bawah tangki (*skid base*) disiapkan. b) Inti transformator diangkat dan diturunkan diletakkan di *skid base*, kondisi inti transformator pada bagian kayu harus *pressfit* terhadap dinding vertikal dalam *skid base*. c) Penutup tangki diletakkan dengan menekan blok kayu atas inti transformator. Posisi *guider* yang ada di bagian bawah penutup harus disesuaikan *pressfit* terhadap bagian atas inti transformator.



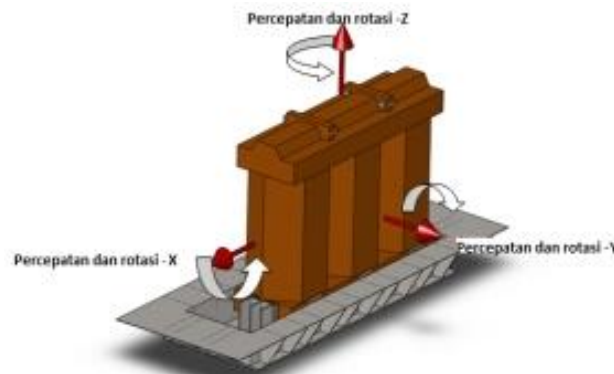
Gambar 2. Ilustrasi transformator dan intinya

Ketika operasional tangki transformator di angkur ada landasan konkrit dengan sejumlah baut angkur. Sedangkan ketika transportasi tangki transformator diikat dengan sejumlah tali baja *lashing* dan *anti shear* di bagian bawah, sehingga rangka transformator menjadi diam (*rigid*) dengan fondasi pengangkutnya [11]. Dalam perjalanan transformator mengalami gaya-gaya percepatan atau perlambatan yang diakibatkan oleh gerakan truk pengangkut, getaran mesin kapal ataupun goyangan kapal laut akibat gelombang ombak. Jadi transformator rentan mengalami gaya dampak gelombang laut dan resonansi jika frekuensi natural kapal dan frekuensi natural transformator adalah sama (Gambar 3).



Gambar 3. Eksitasi luar yang diterima transformator

Dalam hal hentakan atau dampak karena gelombang laut yang mengakibatkan terjadinya percepatan dan perlambatan pada fondasi (dek kapal), bagian inti transformator mengalami inersia massa gaya-gaya horizontal dan vertikal. Dengan kata lain berlaku hukum Newton II, $F = MA$. Gaya-gaya dan getaran yang terjadi di pusat gravitasi (*center of gravity*) inti transformator.



Gambar 4. Gaya yang terjadi pada inti transformator.

Ilustrasi pada Gambar 4 ada tiga axis lurus gaya yaitu gaya X, Y dan Z juga ada tiga gaya rotasi X, Y dan Z. Semua gaya-gaya tersebut ditahan oleh guider pelat penahan (*guider*).

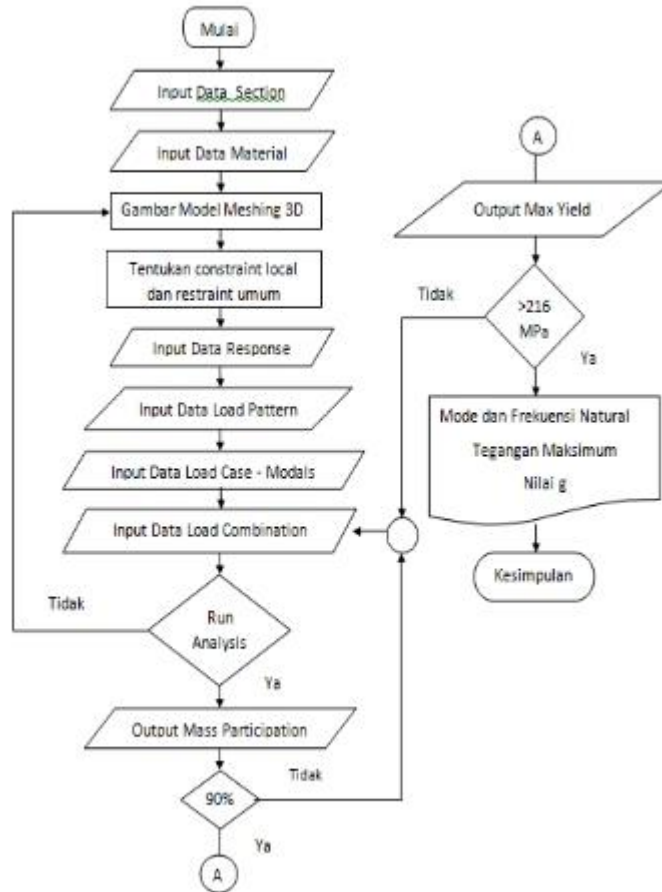


Gambar 5. Gaya dorong inti transformator ke pelat penahan.

Posisi pelat penahan (*guider*) seperti pada Gambar 5 menjaga agar inti transformator tetap diam, di antara pelat penahan dan inti transformator ada kayu yang berfungsi sebagai isolator dan peredam.

METODE

Proses diagram alir penelitian dengan menggunakan perangkat lunak SAP2000 dengan metoda *Response Spectrum*. [Gambar 6](#) adalah langkah-langkah penelitian menggunakan perangkat lunak SAP2000 untuk mencari nilai SMax dan SMin dengan metoda pembebanan kombinasi pada modal analisis konstruksi. Iterasi partisipasi massa adalah 90% dengan batasan tegangan adalah 0.9 *Yield Stress* atau 216 MPa.



[Gambar 6](#). Diagram alir penelitian

HASIL DAN DISKUSI

Parameter Analisis.

Pemodelan dalam perangkat lunak adalah tangki transformator dan inti menggunakan *shell*, kayu penopang menggunakan *frame*. Dalam [Tabel 1](#) data-data yang diperlukan untuk masukan spesifikasi material pada perangkat lunak di antaranya massa, jenis material berdasarkan massa jenis, *young modulus* dan *poison ratio*. Material data tangki transformator adalah sebagai berikut.

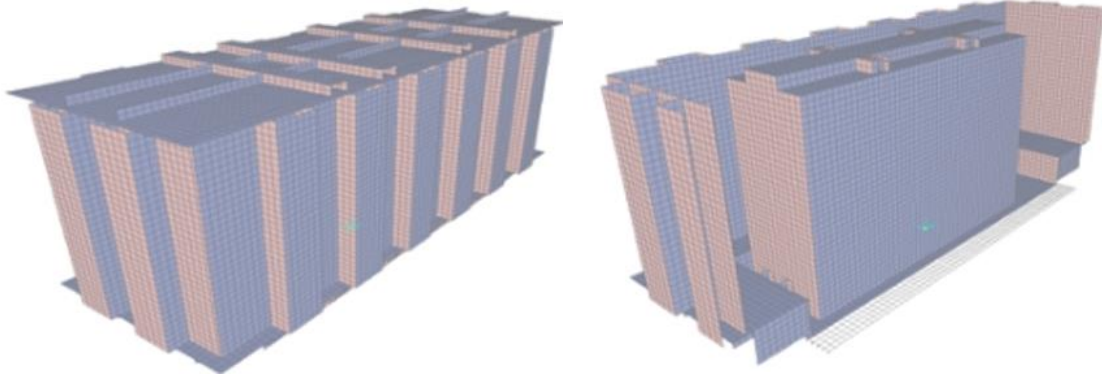
[Tabel 1](#). Dimensi dan massa

Komponen	Ukuran terbesar (mm) (PanjangxLebarxTinggi)	Massa (kg)	Material	Massa Jenis (kg/m ³)	Young Modulus (N/mm ²)	Rasio Poison
Tangki transformator	8700x2780x4200	28500	ST37	7850	200000	0.3
Inti	5060x1500x4030	100000	CRGO+Cu+Steel	2500		0.3
Kayu transformator	bervariasi		KP20224	1100	1000	

Pembebanan

Model yang akan disimulasikan adalah gerakan horizontal (Arah X + Arah Y) dan gerakan vertikal (Arah Z) dari Response Spectrum. Beban kombinasi berdasarkan IEEE 693-2005

1. Comb 12: Dead + Impak Horizontal (Arah X + Arah Y).
2. Comb 13: Dead + Impak Horizontal (Arah X + Arah Y) + Impak Vertikal (Arah Z)



Gambar 7. 3D model shell

Pada Gambar 7 pemodelan 3 dimensi untuk tangki transformator dan bagian inti transformator. Beberapa bagian inti transformator telah disederhanakan untuk memudahkan proses dinamik *Finite Element*, tetapi pada bagian tertentu pelat penahan (*guider*) dengan model yang sama sesuai aslinya. Karena pada bagian pelat penahan inilah tujuan analisis penelitian utama.

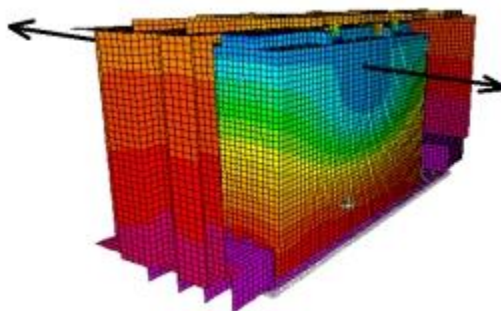
Kriteria Desain

Pemeriksaan dilakukan melalui kriteria sebagai berikut:

- a) Natural frekuensi di dek dan lambung kapal berkisar antara 4 Hz sampai 10 Hz sebagai frekuensi eksitasi. Sehingga jika natural frekuensi transformator berkisar di antara nilai tersebut kemungkinan bisa terjadi resonansi yang mengakibatkan dislokasi komponen transformator.
- b) Maksimum tegangan (*stress*) konstruksi tangki yang terjadi tidak boleh melebihi batas *Ultimate Limit State* untuk tegangan *Von Misses (Principle Stress)* material ST37 adalah sebesar 216 MPa ($0.9 \times \text{Yield Stress } 240 \text{ MPa}$).
- c) Maksimum percepatan horizontal tidak boleh melebihi 1g seperti yang telah ditentukan oleh IEC 60076-1
- d) Koefisien damping sistem keseluruhan transformator adalah 2 persen, seperti yang telah disyaratkan oleh IEEE 693-2005.

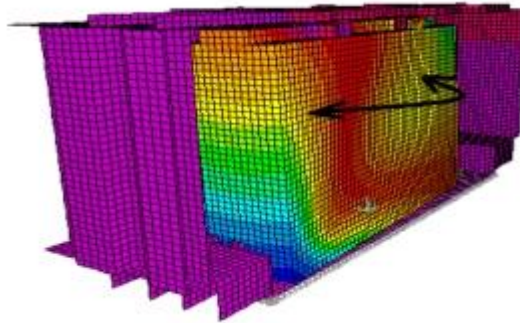
Output Modal

Setiap bentuk mode adalah variasi Bergeraknya keseluruhan tangki dan intinya. Bentuk ragam getar mode pertama adalah seperti Gambar 8 ($f_{n1} = 6.6076 \text{ Hz}$), gambar ditampilkan dengan salah satu dinding dihilangkan agar mudah terlihat bagian inti. Urutan warna grafik adalah warna ungu defleksi kecil dan warna biru adalah untuk defleksi besar. Pada mode pertama, ragam gerakan berbentuk goyangan ke samping dinding lebar tangki. Goyangan inti atas bergerak ke samping lebih cepat dari gerakan tangkinya, sehingga terlihat inti bagian atas seperti mendorong pelat penahan samping atas pada tangki. Terlihat pula deformasi pelat penahan atas cukup besar.



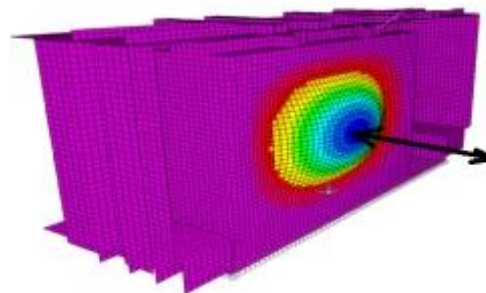
Gambar 8. Mode ke-1

Pada mode kedua [Gambar 9](#) ($f_{n2} = 8.911\text{Hz}$) ragam gerakan terbesar berputarnya inti transformator. Dengan desain penahan inti di bagian tengah, maka pelat penahan atas di bawah penutup tangki adalah bagian yang terberat dari menerima beban putar inti transformator. Terlihat pula deformasi pelat penahan atas cukup besar.

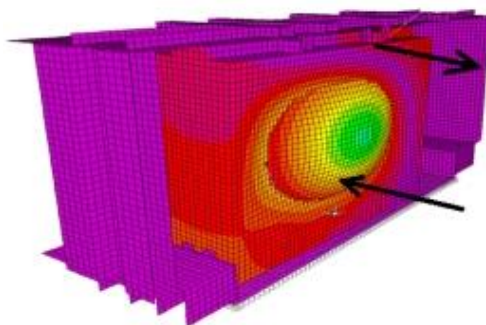


[Gambar 9](#). Mode ke-2

Pada mode ketiga [Gambar 10](#) ($f_{n3} = 10.652\text{ Hz}$) ragam gerakan terbesar adalah bergerak horizontal pada pusat inti transformator ke arah lebar transformator. Di mode ketiga ini, pusat deformasi hanya bagian pusat inti transformator dan sedikit mempengaruhi pelat-pelat penahannya [\[12\]](#). Pada mode keempat [Gambar 11](#) ($f_{n4} = 11.127\text{ Hz}$) ragam gerakan terbesar adalah bergerak horizontal pusat inti dan bagian atas inti dengan arah berlawanan dan masing masing ke arah lebar transformator. Di mode keempat ini, goyangan inti atas cukup mempengaruhi deformasi pelat penahan atas inti transformator [\[13\]](#). Pembahasan ragam gerakan dicukupkan pada 4 mode saja dari ragam gerakan mode yang berjumlah 85. Karena dari keempat mode ini sudah terlihat total partisipasi massa 70 persen keempat kolom SUM UY dengan arah Y atau ke arah lebar tangki.



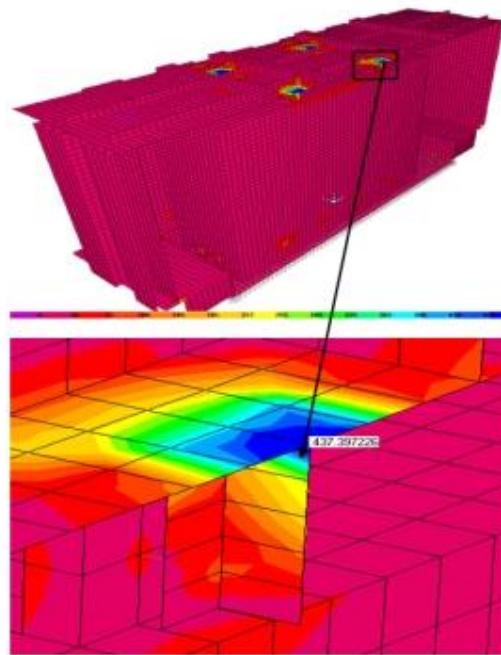
[Gambar 10](#). Mode ke-3



[Gambar 11](#). Mode ke-4

Output Response Spectrum

Tegangan *shell* diperoleh melalui analisis modal yang dilanjutkan dengan simulasi response spectrum berdasarkan percepatan vs frekuensi dengan aplikasi axis x, y dan z secara bersamaan kemudian hasilnya digabung dengan algoritma SRSS [\[14\]](#). Perangkat lunak ini mampu memberikan informasi tegangan *shell* seperti tegangan normal (*normal stress*), tegangan geser (*shear stress*). Penelitian dilakukan dengan melakukan tiga kali percobaan input response spectrum, kemudian output tegangan difokuskan pada shell pelat atas nomor 19130 seperti terlihat pada [Gambar 12](#). Input dan output analisis perhitungan metode elemen hingga.



Gambar 12. Tegangan pada shell plat penahan

1. *High Response Spectrum* (HRS) 0,5g dengan maksimum percepatan horizontal 1,62g dan percepatan vertikal 1,29g untuk rentang 1-10 Hz. Tegangan pada shell nomor 19130 adalah tegangan normal x (σ_x) 437,4 MPa, tegangan normal y (σ_y) 463,6 MPa dan tegangan geser xy (τ_{xy}) 144,7 MPa. *Total principle stress* 595,8 MPa.
2. *Moderate Response Spectrum* (MRS) 0,25g dengan maksimum percepatan horizontal 0,82g dan percepatan vertikal 0,65g untuk rentang 1-10 Hz. Tegangan pada shell nomor 19130 adalah tegangan normal x (σ_x) 199,9 MPa, tegangan normal y (σ_y) 215,9 MPa dan tegangan geser xy (τ_{xy}) 71 MPa. *Total principle stress* 279,3 MPa
3. *Response Spectrum* 0,325g (interpolasi antara yang HRS dan MRS), dengan maksimum percepatan 1,06g dan percepatan vertikal 0,85g. Tegangan pada shell nomor 19130 adalah tegangan normal x (σ_x) 293,8 MPa, tegangan normal y (σ_y) 215,9 MPa dan tegangan geser xy (τ_{xy}) 99,6 MPa. *Total principle stress* 361,8 MPa

KESIMPULAN

Natural frekuensi transformator berada frekuensi rendah pada mode ke 1 – 6,6 Hz, mode ke 2 – 8,9 Hz dan mode ke 3 – 10,6 Hz. Frekuensi tersebut sama dengan frekuensi eksitasi dari luar, yang besarnya berkisar 4Hz sampai 10Hz yaitu frekuensi natural kapal untuk bagian dek dan lambung (yang mana biasa Transformator diletakan di kapal pada waktu transportasi). Dengan koefisien damping (damping rasio) sebesar 2% telah terjadi resonansi selama perjalanan di laut. Hal itulah yang menyebabkan terjadinya patahnya pelat penahan dan terjadi dislokasi sistem kabel di dalam transformator. Pada input response spectrum dengan percepatan 1,06g di frekuensi 1-10 Hz, tegangan pada shell nomor 19130 adalah tegangan normal x (σ_x) 293,8 MPa, tegangan normal y (σ_y) 215,9 MPa dan tegangan geser xy (τ_{xy}) 99,6 MPa. *Total principle stress* adalah 361,8 MPa. Nilai ini untuk konstruksi baja material ST37 berarti telah terjadi patah. Kekuatan struktur transformator yang diakibatkan oleh hempasan atau ayunan gelombang ombak hanya mampu berkisar di 0,82g dengan tegangan lokal di pelat penahan sebesar 279,3 MPa. Nilai ini tersebut juga belum memenuhi persyaratan mencapai 1g dengan tegangan dibawah tegangan leleh *Ultimate Limit State* 216 MPa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan banyak terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Cileungsi dan Institut Sains Teknologi Nasional yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] A. Dharmanto, M Shokeh, " Construction of Power Transformer Tank Against Against High Seismic Required Response Spectrum", Bangkok CEPIS2016 : Conference of The Electric Power Supply Industry 2016.
- [2] H. U. Chirag Parekh, Chetan Kotwal, "Aspect of Power Transformer Design and Optimization," Trends Electr. Eng., vol. 7, no. 1, 2017, doi: <https://doi.org/10.37591/.v7i1.3242>. <https://doi.org/10.37591/.v7i1.3242>
- [3] A. Saepudin, "Optimalisasi Material Utama Pada Auto Transformator 100 MVA," TEKNOSAINS J. Sains, Teknol. dan Inform., vol. 7, no. 1, pp. 1–7, 2020, doi: 10.37373/tekno.v7i1.2. <https://doi.org/10.37373/tekno.v7i1.2>
- [4] J. C. Olivares-Galvan, E. Campero-Littlewood, J. L. Hernandez-Avila, R. Escarela-Perez, S. M. Adame, and A. D. Theocharis, "Evaluation of stray losses in throats of distribution transformers using finite element simulation," Proc. 6th Andean Reg. Int. Conf. Andescon 2012, pp. 7–10, 2012, doi: 10.1109/Andescon.2012.12. <https://doi.org/10.1109/Andescon.2012.12>
- [5] A. S. Saepudin, "Analisa Stray Losses Pada Struktur Transformator Daya Satu Fasa 275 Kv 83.3 MVA," JTTM J. Terap. Tek. Mesin, vol. 1, no. 1, 2020, doi: 10.37373/msn.v1i1.13. <https://doi.org/10.37373/msn.v1i1.13>
- [6] Widiyanto, Power Transformer Design Aspect. Jakarta: Areva, 2003.
- [7] M. J. H, CEng, and FIEE, The J & P Transformer Book, Twelfth ed. England: Johnson & Philips Ltd, 1998.
- [8] A. Saepudin, A. Dharmanto, and W. Wilarso, "The Pressure Relief Venting for Air Insulation Cable Box at Power Transformer," in AIP Conference Proceedings, 2022. doi: 10.1063/5.0116405. <https://doi.org/10.1063/5.0116405>
- [9] E. Hoagland, M. Golovkov, C. Maurice, K. Sellars, and S. Klausning, "Measurements, Observations, and Implications of Moving Electrical-Arc Behavior and Effect of Reclosure Events on Overhead Lines and Worker Protection," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 52, no. 4, 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2546232. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2546232>
- [10] K. Kulasek et al., "Towards net zero emissions-The role of circularity in transformers," Transform. Mag. | Vol. 7, Issue 4 |, pp. 51–58, 2020, [Online]. Available: www.transformers-magazine.com
- [11] N. L. H.-T. Neisius, I. Dzafic, S. Henselmeyer, D. Ablakovic, "Modeling of auto-transformers for load flow calculations," 2012, doi: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465850. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2012.6465850>
- [12] D. Satrijo, A. Suprihanto, and A. Kholil, "Simulasi dan analisa modus getar pada mesin Freis type vertical milling dengan menggunakan program bantu MSC Nastran," Rotasi, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 2005.
- [13] Z. Guan et al., "Comparison and Research on Seismic Design Practice for Elec-tric Substation Equipment in China, Japan, USA and Europe," IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 153, no. 4, pp. 0–9, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/153/4/042017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/153/4/042017>
- [14] Reyolando MLRF, "Dynamics of Civil Structures Under Seismic Excitattion", Brazilian Conference on Dynamics, June 2010.
- [15] A. Dharmanto, A Saepudin, "Fatigue Life Prediction of 180 Ton Lifting Spreader Construction Material ST43 Using S-N Curve", Journal of Physics: Conference Series, 1764(1) (2021) 012183. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1764/1/012183>