

Analisis Modal dan Modifikasi Struktur Pompa *Closed Drain* 510-P9002 untuk Mitigasi Getaran di Lapangan Jambaran Tiung Biru

Achmad Walid^{1*}, Irwanda Yuni Pungkiarto², Mohammad Rizanto Juliarsyah³, Khoirul Anwar⁴

¹⁻⁴ Departemen Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

Alamat: Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65141

Korespondensi penulis: achmad.walid@polinema.ac.id*

Abstract: *This study presents a modal analysis of Pertamina EP Cepu's closed drain pump 510-P9002, which operates in the condensate–water treatment unit of the Jambaran Tiung Biru field. Field vibration measurements conducted in August 2024 indicated a fundamental frequency of 25 Hz, corresponding to 1×RPM of the driving motor, with maximum amplitudes reaching 13.46 mm/s. Such excessive vibration poses risks of mechanical damage, reduced equipment service life, and potential operational failure. To address this issue, finite element analysis (FEA) was employed to examine the dynamic response of the pump, determine its natural frequencies, and identify possible resonance conditions. A CAD model of the pump–vessel assembly was developed, meshed, and analyzed under actual boundary conditions. The results showed several natural frequencies ranging between 23.16 and 26.65 Hz, which are close to the excitation frequency, suggesting a very high likelihood of resonance. Various structural modifications were then evaluated, including a half casing and two types of full casings. Among these, the full casing B design provided additional stiffness in the motor support area; however, none of the modifications effectively reduced vibration within the internal components. Based on these findings, the study recommends the implementation of a dynamic vibration absorber (DVA) tuned to the excitation frequency, along with the redesign of structural components to shift natural frequencies away from operating excitation. These solutions are expected to improve operational stability, extend equipment lifespan, and enhance overall system reliability. The outcomes of this research provide important insights for managing vibration issues in pump systems operating under similar conditions, particularly in the oil and gas industry where continuous, stable operation is critical.*

Keywords: *Closed drain pump, Finite element analysis, Modal analysis, Resonance, Vibration*

Abstrak. Studi ini menyajikan analisis modal pompa pembuangan tertutup 510-P9002 milik Pertamina EP Cepu, yang beroperasi di unit pengolahan air kondensat lapangan Jambaran Tiung Biru. Pengukuran getaran lapangan yang dilakukan pada bulan Agustus 2024 menunjukkan frekuensi dasar 25 Hz, setara dengan 1×RPM motor penggerak, dengan amplitudo maksimum mencapai 13,46 mm/s. Getaran berlebih tersebut menimbulkan risiko kerusakan mekanis, mengurangi masa pakai peralatan, dan potensi kegagalan operasional. Untuk mengatasi masalah ini, analisis elemen hingga (FEA) digunakan untuk memeriksa respons dinamis pompa, menentukan frekuensi alaminya, dan mengidentifikasi kemungkinan kondisi resonansi. Model CAD dari rakitan pompa-bejana dikembangkan, dijalin, dan dianalisis dalam kondisi batas aktual. Hasilnya menunjukkan beberapa frekuensi alami berkisar antara 23,16 dan 26,65 Hz, yang mendekati frekuensi eksitasi, menunjukkan kemungkinan resonansi yang sangat tinggi. Berbagai modifikasi struktural kemudian dievaluasi, termasuk setengah casing dan dua jenis casing penuh. Di antara semua modifikasi tersebut, desain casing B secara keseluruhan memberikan kekakuan tambahan pada area penyangga motor; namun, tidak ada modifikasi yang secara efektif mengurangi getaran di dalam komponen internal. Berdasarkan temuan ini, studi ini merekomendasikan penerapan peredam getaran dinamis (DVA) yang disesuaikan dengan frekuensi eksitasi, beserta desain ulang komponen struktural untuk menggeser frekuensi alami menjauh dari eksitasi operasi. Solusi ini diharapkan dapat meningkatkan stabilitas operasional, memperpanjang umur peralatan, dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan. Hasil penelitian ini memberikan wawasan penting untuk mengelola masalah getaran pada sistem pompa yang beroperasi dalam kondisi serupa, khususnya di industri minyak dan gas yang membutuhkan operasi yang berkelanjutan dan stabil.

Kata Kunci: Analisis elemen hingga, Analisis modal, Getaran, Pompa pembuangan tertutup, Resonansi

1. LATAR BELAKANG

Kebutuhan akan energi yang lebih bersih telah mendorong pengembangan teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan di berbagai proses industri, seperti sistem pompa dan pipa. Getaran berlebihan merupakan salah satu masalah utama dalam pengoperasian pompa industri, terutama pada sistem pompa drainase tertutup, karena hal ini dapat memengaruhi keandalan, umur pakai, dan keselamatan operasional. Getaran yang melebihi batas normal, selain dapat menyebabkan kemungkinan kegagalan mekanis pada konfigurasi internal, juga dapat menyebabkan kegagalan sistem (He et al., 2022).

Analisis getaran kini menjadi metode utama untuk memantau kondisi kerja pompa. Lima tahun terakhir telah menyaksikan penggunaan dominan Analisis Elemen Hingga (FEA) dan teknik analisis modal untuk mengidentifikasi frekuensi alami dan bentuk mode sistem pompa. Penelitian menunjukkan bahwa kekakuan penyangga, distribusi massa, dan interaksi fluida-struktur berperan penting dalam menentukan sifat dinamis pompa (Jingkuan Li, et al., 2024; Xuyang Liu, 2023).

Closed drain pump pada Gambar 1 (Tipe 510-P9002) merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pemrosesan condensate-water jambaran tiung biru field milik Pertamina EP Cepu. Keandalan dan stabilitas operasional pompa ini sangat menentukan efisiensi dan keselamatan proses secara keseluruhan. Namun, berdasarkan hasil pengukuran di lapangan, terdeteksi adanya getaran signifikan pada struktur pompa dengan frekuensi dominan sebesar 25 Hz, yang sesuai dengan 1x RPM motor penggerak. Tingkat getaran mencapai nilai puncak hingga 13.46 mm/s (diukur pada bulan Agustus 2024), yang dapat mengindikasikan potensi masalah struktural atau dinamis pada pompa dan sistem pendukungnya.



Gambar 1. Konfigurasi struktur closed drain pump

Getaran pada struktur pompa dapat menyebabkan berbagai permasalahan, seperti kerusakan pada komponen mekanis, keausan dini, dan bahkan kegagalan operasional. Jika dibiarkan, kondisi ini dapat berdampak negatif terhadap keandalan sistem secara keseluruhan, meningkatkan biaya perawatan, dan menimbulkan risiko keselamatan. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang komprehensif untuk memahami penyebab getaran tersebut dan mencari solusi yang tepat untuk mengatasinya.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menganalisis masalah ini adalah dengan melakukan studi menggunakan Finite Element Analysis (FEA). Pendekatan ini memungkinkan simulasi perilaku dinamis struktur dalam berbagai kondisi operasional, termasuk interaksi antara frekuensi eksitasi dari motor dan karakteristik modal struktur pompa.

Melalui studi ini, diharapkan dapat diperoleh informasi mendalam mengenai karakteristik getaran, potensi resonansi, dan area kritis pada struktur pompa. Hasil analisis ini akan menjadi dasar dalam merancang solusi teknis untuk mengurangi getaran, meningkatkan stabilitas operasional, serta memperpanjang masa pakai pompa dan komponen terkait.

Pada pompa yang saling terhubung seperti pompa drainase tertutup, masalah struktural cenderung muncul pada frekuensi $1 \times \text{RPM}$, yang kebetulan merupakan frekuensi alami sistem. Kondisi ini dapat menyebabkan resonansi kecuali ditangani (Bowlin, 2025). Langkah-langkah pencegahan umum meliputi modifikasi desain struktural untuk meningkatkan kekakuan, pemasangan penyerap getaran dinamis (DVA), atau perubahan jalur transmisi getaran (H.Teng, et al., 2025; Zhiwei Su, et al., 2022).

Penggunaan DVA juga telah menjadi metode ideal untuk mitigasi getaran pada peralatan berputar. Peneliti lain menunjukkan bahwa DVA yang disesuaikan frekuensi dapat mengurangi amplitudo getaran sebesar 50–80% (X.Wang, et al., 2025; Jingkuan Li, et al., 2024). Kemajuan baru bahkan mengintegrasikan konsep kekakuan negatif dan inerters ke dalam satu sistem untuk memperluas bandwidth peredaman (Jaydenshaw, 2022; R Zhiying, et al., 2024).

Namun, penelitian menunjukkan bahwa perbaikan struktural tidak selalu meningkatkan frekuensi alami kritis dalam semua kasus. Dalam kebanyakan kasus, penyebab utama deformasi berasal dari struktur internal seperti kolom pipa atau sambungan flensa internal, sehingga memperkuat hanya casing luar saja tidak cukup (Mechanical Solution, 2024). Oleh karena itu, analisis modal pada tingkat perakitan yang melibatkan motor, sambungan, pompa, dan tangki sangat penting untuk memahami perilaku dinamis secara mendalam (T Chu, et al., 2024).

Selain itu, beberapa studi menggunakan pengujian eksperimental dan simulasi numerik secara bersamaan untuk memvalidasi model prediktif. Analisis Modal Eksperimental (EMA) dan Bentuk Defleksi Operasional (ODS) merupakan kunci dalam verifikasi akurasi hasil simulasi sebelum implementasi solusi teknis dalam praktik (V. M. Pan'kin, et al., 2024).

Untuk lapangan Jambaran Tiung Biru, pompa drainase tertutup 510-P9002 mencatat tingkat getaran relatif tinggi dalam pengukuran baru dengan frekuensi dominan 25 Hz yang sesuai dengan $1 \times \text{RPM}$ motor penggerak. Kondisi ini menunjukkan kemungkinan resonansi dengan frekuensi alami sistem dan, jika tidak ditangani, akan mengurangi keandalan operasional dan memperpendek umur peralatan.

2. KAJIAN TEORITIS

Teori Getaran Mekanik pada Pompa

Getaran pada peralatan berputar, misalnya pada pompa, merupakan mode mekanis akibat gaya dinamis yang bekerja pada sistem. Getaran pada pompa dapat disebabkan oleh ketidakseimbangan massa, ketidaksejajaran poros, gaya hidraulik yang tidak seimbang, dan resonansi struktural (He et al., 2022). Standar seperti ISO 10816 menetapkan batas keamanan getaran yang dapat diterima untuk memastikan keandalan peralatan dan umur pakainya. Di atas batas-batas ini, nilai getaran dapat menyebabkan keausan bantalan, kerusakan poros, atau kegagalan sistem secara keseluruhan (Bowlin, 2025).

Analisis Modal

Analisis modal adalah metode untuk menentukan frekuensi alami (natural frequencies) dan bentuk modus getar (mode shapes) dari suatu struktur. Pada pompa, analisis modal bertujuan mengidentifikasi risiko resonansi ketika frekuensi eksitasi operasi mendekati frekuensi alami sistem (Jingkuan Li, et al., 2024). Pendekatan ini dapat dilakukan melalui uji eksperimental, seperti *Experimental Modal Analysis* (EMA), atau simulasi numerik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA).

Prinsip *Finite Element Analysis* (FEA)

FEA is a numerical computational technique used to decompose a structure into minute components with mathematical equations that can be solved using a computer. FEA in pump analysis is used to model complex geometries, establish boundary conditions, and calculate the dynamic response of a structure under an applied load (Xuyang Liu, et al., 2023). Research

shows that FEA can predict the dynamic performance of pumps well, given that the model has fluid–structure interaction (Zhiwei Su, et al., 2022).

Resonansi dan Frekuensi Alami

Resonansi adalah kondisi di mana frekuensi rangsangan eksternal mendekati atau sama dengan frekuensi alami sistem, yang mengakibatkan amplitudo getaran berlebihan. Rangsangan umum pada sistem pompa vertikal adalah $1 \times \text{RPM}$, yang akan mendekati frekuensi alami kecuali desain strukturalnya tidak tepat (Bowlin, 2025). Getaran dapat dihindari dengan mengubah kekakuan struktur atau massa sistem sehingga frekuensi alami bergeser keluar dari rentang frekuensi rangsangan (Jingkuan Li, et al., 2024b).

Dynamic Vibration Absorber (DVA)

Penyerap Getaran Dinamis (DVA) adalah perangkat pasif yang menyerap energi pada frekuensi tertentu untuk mengurangi amplitudo getaran dalam sistem mekanis. Frahm pertama kali mengusulkan konsep ini pada tahun 1909 dan menunjukkan bahwa penambahan massa tambahan dengan kekakuan tertentu dapat menciptakan sistem dengan dua derajat kebebasan, sehingga mengisolasi energi getaran dan mengurangi amplitudo dalam sistem utama (Sun dkk., 2020). Mekanisme kerja DVA didasarkan pada (penyesuaian) frekuensi alami DVA dengan frekuensi rangsangan sistem utama. Ketika keduanya cocok, DVA akan beresonansi dengan amplitudo besar, mentransfer energi dari sistem utama dan mengurangi respons getaran (Wang dkk., 2021). Namun, desain yang buruk dapat secara signifikan mengurangi efisiensi peredaman (Carrella dkk., 2022) .

Berdasarkan prinsip kerjanya, DVA dapat dikategorikan ke dalam beberapa jenis. Pertama, DVA linier menggunakan massa dan pegas konvensional dan efektif untuk meredam getaran pada satu frekuensi (Jiang et al., 2021). Kedua, DVA nonlinier menggunakan pegas nonlinier untuk memperluas rentang frekuensi redaman (Shaw et al., 2023). Ketiga, DVA berbasis inersia menggunakan komponen inersia untuk meningkatkan efisiensi peredaman dengan penambahan massa minimal (Smith dkk., 2020). Keempat, DVA kekakuan negatif, yang mengurangi kekakuan efektif untuk meningkatkan respons pada frekuensi target (Liu & Wang, 2021). Dalam aplikasi industri, pada pompa vertikal seperti pompa drainase tertutup atau pompa turbin vertikal, DVA digunakan untuk menentang resonansi pada frekuensi operasi utama, yaitu $1 \times \text{RPM}$ atau harmoniknya. Penyelidikan eksperimental menunjukkan bahwa pemasangan DVA padaudukan motor pompa mengurangi amplitudo getaran hingga 70% tanpa mengorbankan kinerja hidraulik pompa (Kim & Lee, 2021).

Kinerja DVA sangat bergantung pada parameter desain, termasuk massa DVA (m_2) relatif terhadap massa sistem utama (m_1), kekakuan pegas (k_2) untuk definisi frekuensi alami, dan rasio redaman (ζ) yang menentukan rentang frekuensi efektif (Li et al., 2022). Parameter-parameter tersebut biasanya dipilih berdasarkan teori penyesuaian optimal Den Hartog atau secara numerik melalui teknik optimasi seperti algoritma genetika (Zhao & Chen, 2023). Keuntungan DVA adalah tidak memerlukan sumber daya eksternal karena bersifat pasif, mudah dalam desain, biaya relatif lebih murah, dan efisien dalam meredam getaran pada frekuensi yang diperlukan. DVA juga memiliki beberapa kelemahan, seperti rentang frekuensi redaman yang terbatas, persyaratan ruang instalasi, dan potensi perawatan berkala untuk menjaga kinerja (Shaw et al., 2023; Zhou et al., 2022).

Penelitian terbaru berfokus pada pengembangan DVA adaptif yang dapat mengubah frekuensi alami secara otomatis menggunakan aktuator piezoelektrik atau damper magnetorheologis (Li et al., 2022). Teknologi ini memungkinkan DVA mempertahankan kinerjanya bahkan ketika kecepatan kerja sistem utama diubah (Zhao & Chen, 2023). Pada pompa industri, penguatan struktural dan DVA adaptif mulai digunakan untuk mengatasi resonansi pada peralatan yang beroperasi di bawah beban dan kecepatan lain (Kim & Lee, 2021). Dengan desain yang tepat, penerapan DVA pada pompa 510-P9002 dengan saluran pembuangan tertutup, subjek studi ini, seharusnya dapat mengurangi amplitudo getaran pada frekuensi dominan 25 Hz, memperpanjang umur peralatan, meningkatkan keandalan sistem, dan mengurangi perawatan.

Studi Terdahulu pada Pompa Closed Drain

Pompa drainase tertutup digunakan untuk memompa cairan terkondensasi atau cairan limbah dari sistem utama ke sistem pengolahan tertutup untuk mencegah kebocoran. Getaran berlebih telah diakui sebagai masalah umum oleh berbagai penelitian, yang berdampak pada masa pakai, biaya perawatan, dan keselamatan operasional (Al-Mufadi, et al., 2021). Penyebabnya adalah ketidaksejajaran poros dan motor (Ramirez, et al., 2020), ketidakseimbangan massa impeller (Wang & He, 2019), dan kekakuan pondasi yang rendah, yang memicu resonansi (Krishnan, et al., 2020).

Metode Analisis Elemen Hingga (FEA) digunakan untuk mengidentifikasi mode getaran fundamental (Zhang, et al., 2021), sementara FEA dan pengukuran lapangan meningkatkan akurasi model (Silva & Martins, 2019). Computational Fluid Dynamics (CFD)

juga digunakan untuk mensimulasikan interaksi fluida-struktur, menunjukkan bahwa turbulensi dapat menyebabkan beban dinamis meningkat lebih lanjut (Rahman, et al., 2020).

Getaran dimitigasi melalui penguatan struktural (Chen, et al., 2021) dan pemasangan Peredam Getaran Dinamis (Lee, et al., 2020), sehingga getaran berkurang secara signifikan. Kondisi operasi seperti beban fluida serta tekanan masuk memengaruhi karakteristik getaran (Patel & Singh, 2019). Penelitian yang mengintegrasikan pendekatan eksperimental dan numerik secara holistik masih terbatas, sehingga diperlukan eksperimen yang menggabungkan analisis modal, verifikasi lapangan, dan teknik mitigasi yang efektif.

Relevansi terhadap Penelitian Ini

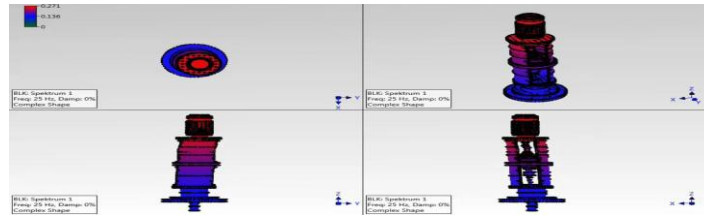
Penggunaan DVA pada pompa closed drain 510-P9002 yang diteliti dalam studi ini memiliki potensi besar untuk mengurangi amplitudo getaran pada frekuensi 25 Hz ($1 \times \text{RPM}$ motor penggerak). Dengan pemilihan parameter desain yang tepat dan validasi melalui simulasi serta pengujian lapangan, DVA diharapkan mampu memperpanjang umur pakai peralatan, meningkatkan keandalan sistem, dan mengurangi biaya perawatan.

3. METODE PENELITIAN

Analisis modal dilakukan untuk memahami bagaimana struktur pompa merespons eksitasi dinamis, khususnya pada kondisi operasionalnya. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk menentukan frekuensi natural struktur serta pola deformasi atau mode shapes yang terjadi pada setiap frekuensi tersebut. Selain itu, analisis modal bertujuan untuk mengevaluasi kemungkinan terjadinya resonansi, yaitu kondisi di mana frekuensi eksitasi operasional (25 Hz) mendekati atau sama dengan salah satu frekuensi natural struktur. Resonansi ini dapat menyebabkan peningkatan amplitudo getaran secara signifikan. Lebih lanjut, analisis ini juga digunakan untuk mengidentifikasi bagian atau elemen tertentu dari struktur yang memiliki kontribusi besar terhadap getaran yang terdeteksi, sehingga memungkinkan perbaikan yang lebih tepat sasaran.

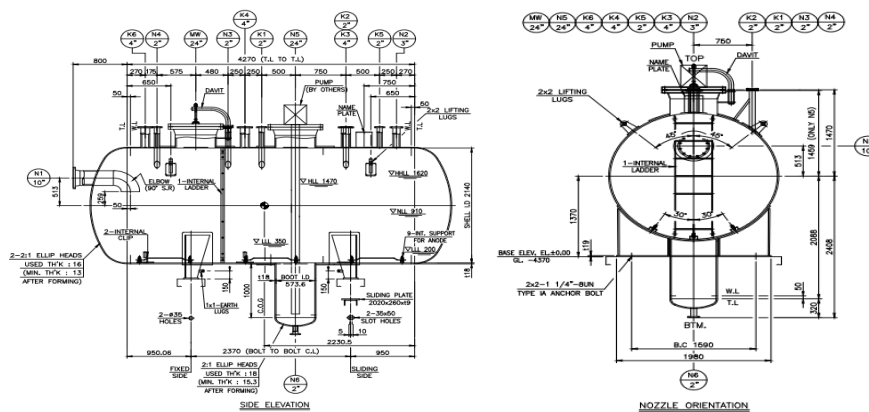
Data

Peneliti telah melakukan pengukuran getaran dan membuat visualisasi ODS closed drain pump Gambar 2 pada sisi motor dan struktur dudukannya, dimana titik dengan amplitudo tertinggi yaitu pada titik 1 axis Y dengan nilai amplitudo sebesar 0.242 in/s peak di frekuensi 25 Hz.



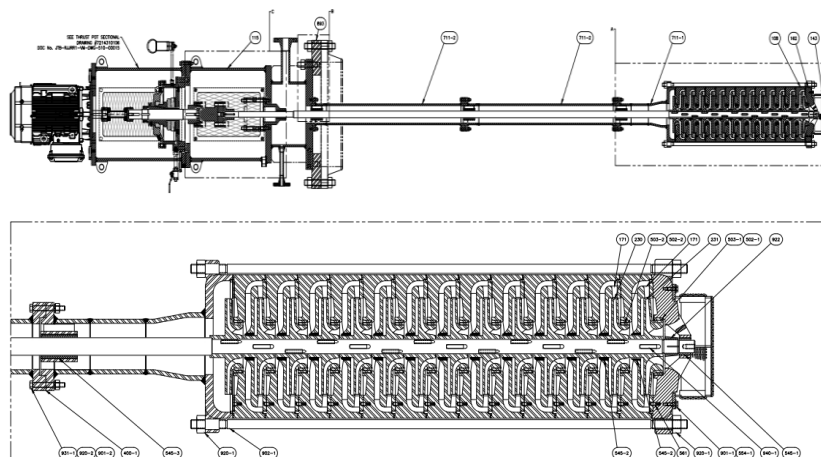
Gambar 2. Visualisasi getaran closed drain pump

Pada visualisasi ODS ini tidak memvisualisasikan struktur pompa dan dudukannya karena berada di dalam tangki vessel. Struktur tangki vessel juga tidak divisualisasikan karena keterbatasan akses ke casing tangki vessel untuk pengambilan data vibrasi ODS.



Gambar 3. Gambar closed drain vessel

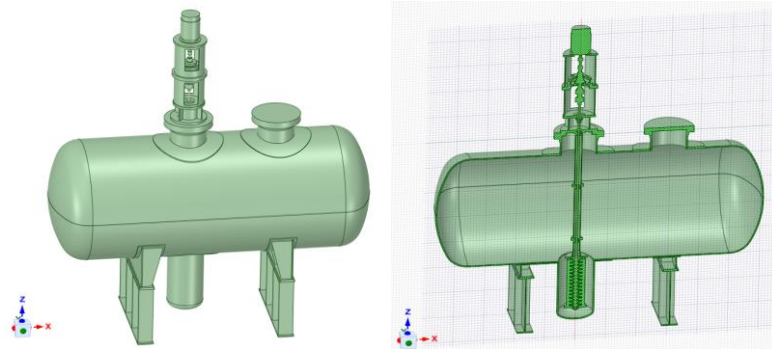
Gambar 3 adalah gambang tangki/vessel berisi condensate-water dimana closed drain pump Gambar 4 duduk di bagian atas flange vessel untuk mengalirkan cairan keluar dari vessel. Kedua gambar tersebut menjadi acuan saat pemodelan 3d yang akan dipakai untuk simulasi modal analisis.



Gambar 4. Gambar closed drain pump

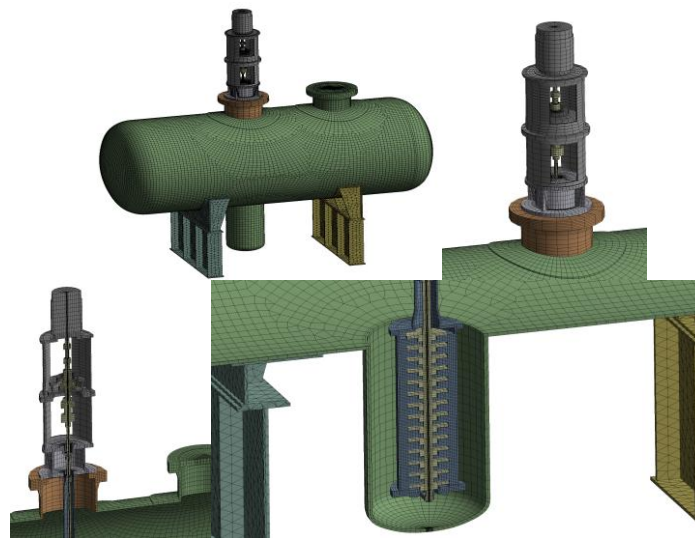
Pembuatan Model CAD / Pemodelan FEA

Model CAD dibuat dengan menggunakan software Space claim sesuai dengan gambar referensi. Model yang dibuat mencakup vessel dan assy pompa dan motor penggerak yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Model 3D pompa dan vessel

Pembuatan Mesh adalah Pemecahan model ke elemen-elemen kecil untuk simulasi. Gambar 6 adalah mesh yang dibuat secara manual dan automatic menggunakan software pointwise meliputi motor, frame support shaft, column pipe, pompa, vessel dan vessel support.

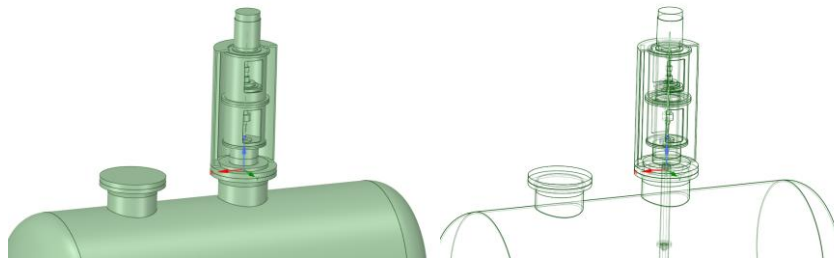


Gambar 6. Mesh pompa dan vessel

Model modifikasi

Pompa vertikal dimodifikasi untuk meningkatkan kekakuan dan mengurangi vibrasi dengan menambahkan casing yang menghubungkan flangeudukan frame pompa ke flange pompa pada Gambar 7. Dalam modifikasi ini, terdapat dua jenis casing yang dapat digunakan, yaitu full casing a (antara flangeudukan frame pompa ke flange pompa), full casing b (antara tangki ke flange pompa) dan half casing (antara flangeudukan frame pompa ke flange pompa). Full casing menutupi seluruh bagian antara flangeudukan frame pompa dan flange

pompa. Sementara itu, half casing hanya menutupi sebagian area antara flangeudukan frame pompa dan flange pompa.



Gambar 7. Modifikasi penambahan casing pada pompa untuk menaikkan kekakuan pompa.

Analisis Modal

Analisis modal dilakukan untuk menghitung karakteristik dinamis dari struktur pompa, yang mencakup perhitungan frekuensi natural dan mode shapes pada setiap frekuensi tersebut. Frekuensi natural adalah frekuensi di mana struktur cenderung bergetar secara alami tanpa adanya gaya eksternal tambahan, sementara mode shapes menunjukkan pola deformasi struktur pada masing-masing frekuensi natural. Hasil perhitungan ini kemudian dibandingkan dengan frekuensi eksitasi operasional pompa, yaitu 25 Hz. Tujuannya adalah untuk menilai potensi resonansi, yaitu kondisi ketika frekuensi eksitasi mendekati atau sama dengan salah satu frekuensi natural. Resonansi dapat menyebabkan peningkatan amplitudo getaran yang signifikan, sehingga penting untuk memastikan bahwa frekuensi eksitasi tidak bertepatan dengan frekuensi natural untuk menjaga stabilitas operasional struktur.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Frekuensi Pribadi Desain Aktual

Hasil analisis modal pada struktur pompa closed drain menghasilkan sejumlah frekuensi natural yang menunjukkan karakteristik dinamis struktur Tabel 1. Frekuensi natural teridentifikasi mulai dari 2 Hz hingga 84 Hz (20 mode shape pertama), dengan beberapa nilai yang berada di dekat frekuensi eksitasi operasional pompa, yaitu 25 Hz.

Tabel 1. Frekuensi pribadi hasil analisis modal Desain Aktual

Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural
1	2,0597	6	23,777	11	35,786	16	70,971
2	2,0843	7	26,054	12	35,794	17	71,716

3	12,067	8	26,65	13	48,593	18	74,245
4	17,237	9	33,042	14	49,776	19	79,802
5	23,157	10	33,355	15	68,936	20	84,493

Dari hasil modal analisis, terdapat beberapa frekuensi natural yang berada di sekitar frekuensi eksitasi operasional pompa, yaitu 25 Hz. Frekuensi-frekuensi ini adalah 23,157 Hz (mode 5), 23,777 Hz (mode 6), 26,054 Hz (mode 7), dan 26,65 Hz (mode 8), yang sangat dekat dengan nilai eksitasi. Frekuensi-frekuensi tersebut menjadi perhatian khusus karena adanya potensi resonansi, yang dapat menyebabkan amplifikasi getaran berlebihan dan meningkatkan risiko kerusakan struktur.

Frekuensi Pribadi Desain Modifikasi

Hasil analisis modal pada struktur pompa closed drain yang telah dimodifikasi ditunjukkan pada tabel-tabel di bawah. Dari semua modifikasi (half, full a dan full b) nilai frekuensi pribadi hampir tak banyak berubah, walaupun ada perubahan nilai frekuensinya dalam orde ± 1 Hz. Modifikasi pada bagian eksternal tanki tak efektif menaikkan kekakuan dari tangki.

Tabel 2. Frekuensi pribadi hasil analisis modal modif half casing

Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural
1	2,0601	6	24,606	11	35,787	16	71,47
2	2,0848	7	26,682	12	35,794	17	71,716
3	11,312	8	26,726	13	48,575	18	74,11
4	17,138	9	32,053	14	49,715	19	80,093
5	23,228	10	33,042	15	69,279	20	84,5

Tabel 3. Frekuensi pribadi hasil analisis modal modif full casing a

Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural
1	2,0604	6	24,68	11	35,792	16	71,6
2	2,0851	7	26,696	12	35,799	17	71,725
3	10,619	8	26,87	13	48,556	18	73,998
4	16,591	9	30,875	14	49,658	19	80,261
5	23,21	10	33,043	15	69,463	20	84,54

Tabel 4. Frekuensi pribadi hasil analisis modal modif full casing b

Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural	Mode	Frekuensi Natural
1	2,0757	6	25,406	11	35,803	16	71,724
2	2,0902	7	28,4	12	39,775	17	80,592
3	12,377	8	33,044	13	48,509	18	84,043
4	18,099	9	33,299	14	49,551	19	84,409
5	24,466	10	35,783	15	69,71,036	20	85,338

Modus Getar Desain Aktual



Gambar 8. Modus Getar ke 1 (2 Hz), 2 (2 Hz), 3 (12 Hz) dan 4 (17 Hz)

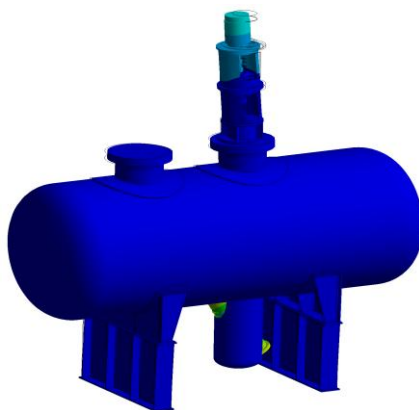
Gambar 8 (modus getar 1 dan 2) adalah mode shape struktur pompa dan motor pada frekuensi pribadi 2 Hz yang merupakan mode dengan frekuensi natural paling rendah. Modus pertama pompa bergetar pada arah Y axis dan modus kedua pada X axis. Pada frekuensi ini defleksi terbesar pada ujung pompa bagian bawah yang merupakan ujung bebas bergerak dengan amplitudo maksimum, sementara deformasi terjadi secara keseluruhan pada panjang struktur.

Defleksi terbesar pada frekuensi modus getar 3 dan 4 terjadi pada motor, dengan ujung motor bagian atas sebagai area yang menunjukkan amplitudo maksimum. Pada modus getar 3, arah vibrasi dominan berada pada sumbu Y, sedangkan pada modus getar 4, vibrasi dominan terjadi pada sumbu X. Pada kedua modus ini, deformasi menyebar secara keseluruhan sepanjang struktur, dengan ujung bebas menunjukkan gerakan terbesar.



Gambar 9. Modus Getar ke 5 (23 Hz), 6 (23 Hz), 7 (26 Hz) dan 8 (26 Hz)

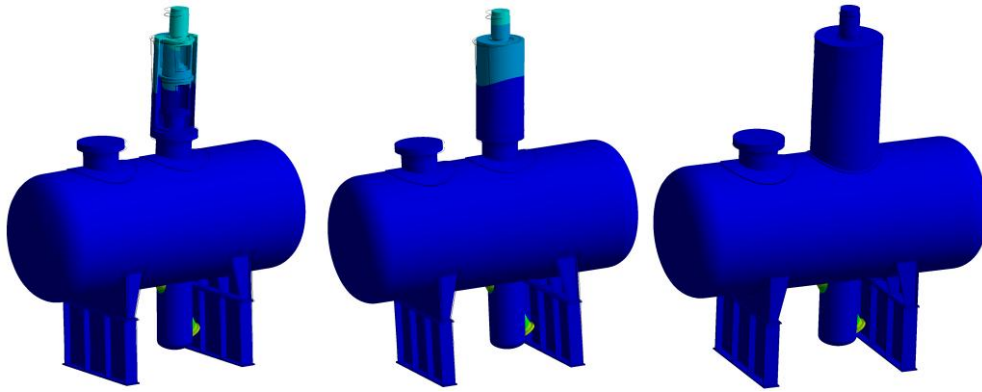
Pada modus 5-8 (frekuensi 23 dan 26 Hz, Gambar 9) defleksi terbesar adalah pada kolom struktur pipa pompa di dekat pompa bawah. Dalam mode ini, terdapat satu titik nol amplitudo (node) di sepanjang struktur, di mana tidak ada gerakan horisontal. Ujung bebas tetap memiliki amplitudo besar, namun pola deformasi lebih kompleks daripada mode sebelumnya. Pada modus-modus ini frekuensi pribadi struktur pompa-motor berada dekat dengan nilai frekuensi kerja pompa yaitu pada 25 Hz, sehingga kemungkinan terjadinya resonansi getaran cukup tinggi. Gambar 10 menunjukkan bentuk modus getar ke-7 pada frekuensi pribadi sebesar 26 Hz. Pada modus ini, pola getaran yang terjadi menggambarkan distribusi defleksi struktur tangki secara keseluruhan. Terlihat bahwa area eksternal tangki, khususnya di sekitar motor pompa, mengalami defleksi yang paling besar. Hal ini mengindikasikan bahwa area tersebut merupakan titik kritis yang rentan terhadap konsentrasi tegangan dan potensi kerusakan akibat getaran.



Gambar 10. Modus Getar ke 7 (26 Hz) desain aktual

Modus Getar Desain Modifikasi

Gambar 11 adalah modus getar dari tangki yang telah dimodifikasi pada modus getar ke 6 dengan nilai frekuensi pribadi dekat dengan frekuensi kerja pompa yaitu 25 Hz. Dari hasil modal analisis dapat kita ketahui bahwa modifikasi half dan full casing a (menghubungkan flangeudukan frame pompa ke flange pompa) tidak efektif menaikkan kekakuan dari struktur. Modus getar keduanya hampir mirip dengan modus getar dari desain aktual. Modifikasi full casing b (menghubungkan antara tangki ke flange pompa) dapat menaikkan kekakuan dari struktur namun hanya pada area atas (area motor dan dudukan), ini bisa kita lihat dari hasil modal analisis Gambar 11 bawah dimana pada area motor pompa yang telah diperkuat tidak banyak deformasi terjadi. Namun modifikasi full casing b tidak dapat mengurangi vibrasi yang terjadi pada bagian internal (pompa dan pipa) sama halnya dengan modifikasi half casing dan full casing a.



Gambar 11. Modus Getar ke 6 half casing (24.6 Hz), full casing a (24.68 Hz) dan full casing b (25.4 Hz)

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pompa closed drain 510-P9002 di Lapangan Jambaran Tiung Biru mengalami tingkat getaran signifikan dengan frekuensi dominan 25 Hz yang berpotensi beresonansi dengan frekuensi alami sistem, sehingga meningkatkan risiko kerusakan mekanis dan penurunan keandalan operasional. Analisis modal berbasis Finite Element Analysis (FEA) menunjukkan adanya beberapa frekuensi alami (23,16–26,65 Hz) yang berada sangat dekat dengan frekuensi eksitasi, menandakan probabilitas resonansi yang tinggi. Upaya modifikasi struktural, seperti penambahan half casing dan full casing tipe A maupun B, terbukti tidak efektif dalam menggeser frekuensi alami secara signifikan atau mengurangi getaran pada bagian internal pompa. Full casing tipe B hanya meningkatkan kekakuan pada area penyangga motor, namun tidak mengatasi sumber getaran utama. Oleh karena itu, strategi mitigasi yang direkomendasikan adalah penggunaan Dynamic Vibration Absorber (DVA) yang disetel pada frekuensi eksitasi serta perancangan ulang elemen struktural untuk memindahkan frekuensi alami jauh dari area resonansi. Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan stabilitas operasi, memperpanjang umur pakai peralatan, dan menurunkan biaya perawatan jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Pertamina EP Cepu atas izin dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini, khususnya dalam penyediaan data teknis dan akses ke fasilitas Lapangan Jambaran Tiung Biru. Apresiasi yang sebesar-besarnya juga diberikan kepada tim Maintenance & Reliability yang telah membantu dalam pengambilan data getaran dan melakukan koordinasi di lapangan. Terima kasih kepada rekan-rekan di Departemen

Teknik Mesin dan Laboratorium Analisis Getaran yang telah memberikan masukan berharga selama proses analisis dan validasi model. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, namun telah berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR REFERENSI

- Al-Mufadi, F., Khan, S., & Rahman, M. (2021). Vibration issues and maintenance strategies in industrial pump systems. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15(2), 123-135. <https://doi.org/10.15282/jmes.15.2.2021.10.011>
- Bowlin, K. (2025). Solving high vibration issues in vertical pumps. *Pumps & Systems*.
- Carrella, A., Brennan, M. J., & Waters, T. P. (2022). Optimal passive vibration absorbers for systems under harmonic excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 527, 116859. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.116859>
- Chen, Y., Li, H., & Zhao, W. (2021). Structural stiffening for vibration reduction in vertical pumps. *Engineering Failure Analysis*, 122, 105282. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105282>
- Chu, T., et al. (2024). A review of vibration analysis and its applications. *Mechanical Engineering Review*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26282>
- Dai, C., et al. (2021). Study on vibration characteristics of marine centrifugal pump unit. *Journal of Marine Science and Technology*. <https://doi.org/10.3390/jmse9030274>
- He, Y., et al. (2022). Vibration analysis of a high-pressure multistage centrifugal pump. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-XXXXX>
- Jaydenshaw. (2022). Finite element analysis of cooling-water pump shaft. *World Pumps*. [https://doi.org/10.12968/S0262-1762\(22\)70083-1](https://doi.org/10.12968/S0262-1762(22)70083-1)
- Jiang, Y., Li, J., & Xu, Z. (2021). Design and optimization of a linear dynamic vibration absorber for rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 156, 107616. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107616>
- Kim, H., & Lee, S. (2021). Experimental study on vibration reduction of vertical pump systems using tuned mass absorbers. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(4), 1587-1596. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0318-4>
- Krishnan, R., Kumar, A., & Sahu, R. (2020). Influence of foundation stiffness on pump vibration characteristics. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 8(5), 693-705. <https://doi.org/10.1007/s42417-019-00166-w>
- Lee, J., Park, S., & Kim, H. (2020). Application of tuned vibration absorbers to reduce pump-induced vibrations. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(6), 2321-2330. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0425-5>
- Li, D., et al. (2022). Structural dynamic vibration absorber using tuned inerter/eddy concepts. *Journal of Vibration and Control*. <https://doi.org/10.31224/2673>

- Li, J., et al. (2024). Improved calculation method for dry modal analysis of four-stage centrifugal-pump rotor system based on concentrated-mass method. PLoS ONE. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306061>
- Li, P., Wang, Y., & Zhang, D. (2022). Adaptive dynamic vibration absorber based on magnetorheological elastomers. Smart Materials and Structures, 31(7), 075018. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac7d41>
- Liu, H., & Wang, X. (2021). Negative stiffness dynamic vibration absorbers for vibration suppression. Journal of Sound and Vibration, 495, 115929. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115929>
- Liu, X., et al. (2023). Comparative study on numerical calculation of modal characteristics of pump-turbine shaft system. Journal of Fluids Engineering. <https://doi.org/10.3390/jmse11112068>
- Mechanical Solution. (2024). Meeting natural frequency separation margin requirements with FEA. Mechanical Solutions Technical Report.
- Pan'kin, V. M., et al. (2024). Dynamic vibration damper with additional stiffness calculated using specified and measured vibration parameters. Proceedings of the ASME Turbo Expo.
- Patel, R., & Singh, P. (2019). Operational factors affecting vibration behavior of centrifugal pumps. International Journal of Rotating Machinery, 2019, 7645128. <https://doi.org/10.1155/2019/7645128> PMID:38439821 PMCID:PMC10909639
- Rahman, M., Chowdhury, S., & Hossain, M. (2020). CFD investigation of unsteady flow and induced vibration in vertical pumps. Applied Mechanics and Materials, 897, 113-120. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.897.113>
- Ramirez, L., Ortega, J., & Fernandez, M. (2020). Misalignment effects on vibration amplitude in vertical pump systems. Mechanical Systems and Signal Processing, 144, 106894. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106894>
- Shaw, A. D., Penny, J. E. T., & Friswell, M. I. (2023). Nonlinear vibration absorbers: Review and state of the art. Mechanical Systems and Signal Processing, 190, 110026. = <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110026>
- Silva, F., & Martins, P. (2019). Modal analysis of vertical pumps using finite element and experimental validation. Journal of Vibration and Control, 25(7), 1743-1754. <https://doi.org/10.1177/1077546319832498>
- Smith, M. C., Papageorgiou, C., & Scheibe, F. (2020). Tuned inerter dampers for structural vibration suppression. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 476(2240), 20200661. <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0661>
- Su, Z., et al. (2022). Research on dynamic vibration absorber with negative stiffness for shaft systems. Journal of Sound and Vibration.

- Sun, H., Chen, Z., & Zhao, Y. (2020). Historical review and recent development of dynamic vibration absorbers. *Applied Sciences*, 10(7), 2477. <https://doi.org/10.3390/app10072477>
- Teng, H., et al. (2025). Design and experiment of a bellows-type dynamic vibration absorber for the oil pump. *Journal of Mechanical Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s12206-025-0501-1>
- Wang, T., & He, Y. (2019). Effects of impeller unbalance on vibration behavior of vertical centrifugal pumps. *Journal of Fluids Engineering*, 141(12), 121102. <https://doi.org/10.1115/1.4044381>
- Wang, X., et al. (2025). Experimental study on vibration reduction of vertical condensate pumps based on DVA theory. *Applied Acoustics*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3043/1/012159>
- Wang, Y., Zhao, X., & Li, Q. (2021). Optimization of tuned mass dampers for harmonic vibration control. *Engineering Structures*, 239, 112280. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112280>
- Zhang, X., Liu, Y., & Chen, Q. (2021). Modal analysis and resonance prevention in vertical pump design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(10), 1850-1863. <https://doi.org/10.1177/0954406220981354>
- Zhiying, R., et al. (2024). Design and experimental study of dynamic vibration absorber for complex pipeline branches. *Mechanical Systems and Signal Processing*.
- Zhou, L., Yang, H., & Zhang, X. (2022). Vibration suppression in vertical pumps using passive absorbers: Experimental validation. *Journal of Vibration and Control*, 28(23-24), 3763-3776. <https://doi.org/10.1177/10775463211012845>