

Analisis Perancangan Pipa Gas Buang Diesel Generator Pada Konversi Kapal Chemical Tanker 6200 DWT menjadi PLTD Terapung

Della Al Bilatri Wahyu Santoso^{1*}, George Endri Kusuma², Pekik Mahardhika³

Program Studi D-IV Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia^{1*2}

Program Studi D-IV Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia³

Email: dal@student.ppns.ac.id^{*}; kusuma.george@ppns.ac.id^{2*}; pekikmahardhika@ppns.ac.id^{3*}

Abstract - The construction of the Floating Diesel Power Plant (PLTD) is one of the government's efforts to overcome an uneven distribution of electrical energy in Indonesia. The Floating PLTD is a conversion of a 6200 DWT chemical tanker with 2 main engines into 6 Wartsila 12V32 diesel generators as power plants. Due to the conversion, several new piping systems are needed with limited space due to the dimensions of the ship. This research focuses on planning the exhaust gas piping system of each diesel generator. Planning includes pipe routing, insulator thickness determination, back pressure and pipe stress analysis. Based on manual and software calculations, the insulator thickness used is 40 mm with an efficiency of 68% to 94%. The results of back pressure analysis in each design using the Darcy-Weisbach method and software show an error of 4,36% to 13,15% with an average back pressure below the maximum limit of 4.246 kPa. The results of the pipe stress analysis show that the ratio between the stress value that occurs and the maximum allowable value is less than 1, with an average stress due to fixed load of 0,065, stress due to thermal load of 0,787, and hoop stress of 0,058. Based on the results of the back pressure and pipe stress analysis, the design is acceptable and safety.

Keyword: Exhaust Gas System, Darcy-Weisbach, Insulator, Back Pressure, Pipe Stress

1. PENDAHULUAN

Pemerintah berkomitmen untuk melakukan upaya pemerataan listrik di wilayah-wilayah terpencil di Indonesia. Salah satu langkah yang diambil adalah membangun Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) terapung dengan menggunakan kapal tanker 6200 DWT sebagai media pembangkit listrik. Proyek ini bertujuan untuk memenuhi kebutuhan listrik, terutama di wilayah pelosok yang sulit dijangkau.

PLTD ini akan dilengkapi dengan 6 diesel generator, masing-masing menghasilkan energi sebesar 7 mW. Ruang muat pada kapal akan diubah fungsi menjadi *fuel oil storage tank*, *switchgear room*, dan kamar mesin. Setiap kamar mesin akan berisi 3 diesel generator.

Penggantian dan penambahan diesel generator memerlukan sistem perpipaan yang baru, terutama untuk gas buang hasil pembakaran dari setiap *engine*. Dalam merancang sistem perpipaan, berbagai pertimbangan dilakukan untuk menghindari kegagalan. Analisis terhadap *back pressure* dan tegangan pipa pada sistem gas buang diesel generator dilakukan untuk memastikan desain sistem aman dan sesuai dengan standar *engine project guide* dan ASME B.31.3 tentang *Process Piping*.

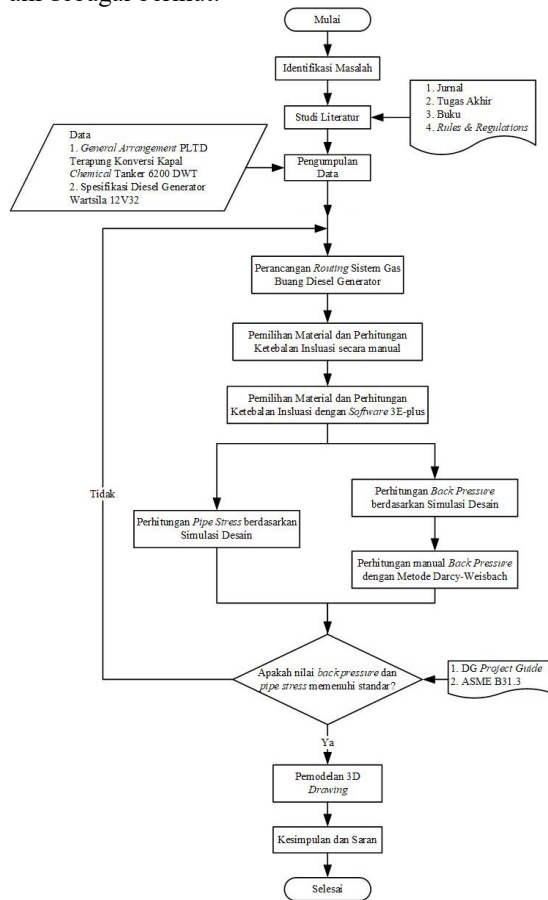
Penelitian ini fokus pada analisis perancangan pipa gas buang pada diesel generator PLTD terapung konversi Kapal Chemical Tanker 6200 DWT. Perancangan mencakup detail desain sistem perpipaan, pemilihan insulator, analisis *back pressure*, dan analisis tegangan pipa.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan desain pipa saluran gas buang yang tepat dan aman untuk PLTD tersebut. Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi bagi industri perkapalan, menambah referensi bagi kampus dalam proses pembelajaran, serta meningkatkan pengetahuan mahasiswa tentang perancangan sistem perpipaan gas buang diesel generator khususnya pada kapal.

Batasan masalah dalam penelitian mencakup tidak mempertimbangkan stabilitas kapal, biaya fabrikasi, kriteria desain berdasarkan hasil kalkulasi parameter *back pressure* dan tegangan pipa sesuai standar, serta mengabaikan beberapa aspek seperti fleksibilitas pipa dan perpindahan panas radiasi dalam menentukan insulator.

2. METODOLOGI

Urutan langkah pengambilan data dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir sebagai berikut:



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

2.1 PLTD Terapung

PLTD merupakan pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai prime mover untuk menghasilkan energi mekanis yang kemudian diubah menjadi tenaga listrik oleh rotor generator [1]. Proses pembakaran pada mesin diesel menghasilkan energi mekanis yang digunakan untuk memutar rotor generator.

Pada perencanaan PLTD terapung ini, menggunakan *generating sets* dari Wartsila tipe 12V32. *Generating sets* ini adalah perangkat pembangkit listrik dengan mesin diesel empat langkah yang memiliki 12 silinder dan dilengkapi dengan *turbocharger*. Pada kondisi *full load*, kecepatan mesin mencapai 750 rpm dengan suhu gas buang setelah *turbocharger* adalah 350°C dan *mass flow rate* sebesar 13,08 kg/s [2].

2.2 Exhaust Gas System

Exhaust Gas System pada mesin diesel berfungsi mengalirkan gas sisa pembakaran menuju atmosfer melalui katup buang [3]. Beberapa komponen utama dalam sistem ini termasuk *exhaust manifold*, *turbocharger*, *exhaust pipe*, *expansion joint*, dan *silencer*.

Perencanaan *exhaust gas system* perlu memperhatikan faktor seperti nilai *back pressure*, perpindahan panas, dan peralatan pendukung lainnya untuk memastikan kinerja sistem tersebut aman.

2.3 Back Pressure

Back pressure merupakan tekanan yang timbul akibat hambatan dalam penyaluran gas buang. Tekanan ini terjadi karena adanya pantulan dari gelombang tekanan gas buang yang kembali menuju sistem gas buang atau silinder [4]. Pada sistem gas buang, *back pressure* harus tetap berada di bawah batas maksimal yang ditentukan oleh *engine maker* agar proses pembakaran pada mesin berjalan efektif.

Back pressure yang terlalu tinggi dapat mengurangi efisiensi volume udara yang masuk melalui katup isap dan menghambat proses pembakaran pada mesin [5]. Oleh karena itu, *back pressure* pada sistem gas buang harus dikendalikan agar mesin berfungsi dengan baik. Pada *generating sets* tipe 12V32 dari Wartsila, batas maksimal *back pressure* adalah 5 kPa [2]. Nilai *back pressure* dipengaruhi oleh spesifikasi pipa, *fittings*, dan peralatan pendukung lainnya. Perhitungan *back pressure* dapat dilakukan dengan memasukkan perhitungan *head loss* pada persamaan Bernoulli.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \Delta v^2 + \rho g (\Delta z + Hl) \quad (1)$$

Sedangkan perhitungan *back pressure silencer* pipa gas buang menggunakan formula berdasarkan referensi *Universal Acoustic & Emission Technologies* di bawah ini.

$$\Delta P = c x \left(\frac{v_{actual}}{4005} \right)^2 x \left(\frac{530}{T+460} \right) \quad (2)$$

Metode perhitungan Darcy-Weisbach digunakan untuk menghitung *head loss* pada pipa. Dalam sistem gas buang, terdapat dua jenis *head loss* yang dipertimbangkan, yaitu *major losses* dan *minor losses*. *Major losses* adalah energi yang hilang akibat adanya gesekan antara fluida dengan dinding pipa lurus dengan luas penampang yang tetap. Untuk menghitung *major losses*, konsep bilangan Reynolds digunakan dalam rumus perhitungannya.

$$Hl_{major} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

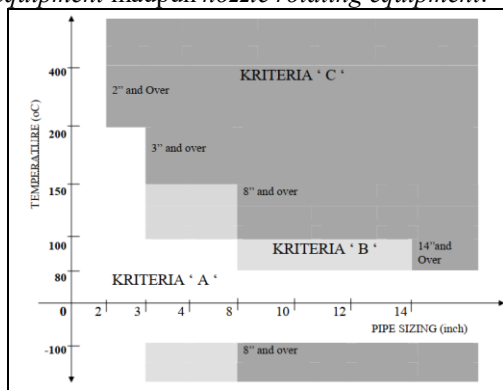
Sedangkan *minor losses* adalah jumlah energi yang hilang akibat perubahan luas penampang pada pipa, adanya *fittings*, dll. Nilai *minor losses* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan di bawah ini.

$$Hl_{minor} = K \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

2.4 Tegangan Pipa

Tegangan adalah besaran vektor yang memiliki nilai dan arah. Analisis tegangan pipa mengacu pada nilai *allowable stress* yang ditetapkan oleh kode dan standar [6]. *Allowable stress* adalah batasan yang diizinkan terjadi pada pipa dan dapat dibagi menjadi *primary stress (code allowable stress)* dan *secondary stress (allowable stress range)*.

Tidak semua sistem perpipaan perlu dipertimbangkan dalam *piping stress analysis*. Pipa dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu *non-critical line* dan *critical line* [7]. Kriteria untuk menentukan jenis *piping* tersebut berkaitan dengan fungsi temperatur dan diameter pipa yang digunakan dalam sistem, bergantung pada sistem pipa yang terhubung dengan *nozzle static equipment* maupun *nozzle rotating equipment*.



Gambar 2 Kriteria Critical Line untuk Rotating Equipment

Tahapan analisis tegangan pipa yaitu dimulai dengan penentuan jarak maksimum antar *support*. Jarak antara *support* penyangga pipa harus dipertimbangkan agar stabilitas sistem perpipaan terjaga. Panjang maksimum *allowable pipe span* tergantung pada berat pipa, tegangan yang diizinkan material, serta batasan defleksi dan getaran yang terjadi pada sistem [7]. Terdapat beberapa macam penyangga pipa, seperti *hanger support*, *guide support*, *u-bolt support*, dan *pipe restrain*. Setiap jenis penyangga memiliki fungsi dan kegunaannya masing-masing.

$$L = \sqrt{\frac{0,4ZSh}{W}} \quad (5)$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{\Delta EI}{13,5W}} \quad (6)$$

Nominal Pipe Size (in.)	Guide Spacing (ft)
1	22
1½	23
2	24
3	27
4	29
6	33
8	37
10	41
12	45
14	47
16	50
18	53
20	56
24	60

Gambar 3 Maximum Spacing for Vertical Piping

Selain itu, pemodelan pada komputer untuk melakukan analisis tegangan pipa membutuhkan beberapa parameter, seperti spesifikasi pipa termasuk nilai *cut off frequency*. *Cut off frequency* adalah batas frekuensi di mana sinyal dapat diteruskan atau diredam pada suatu filter atau sistem.

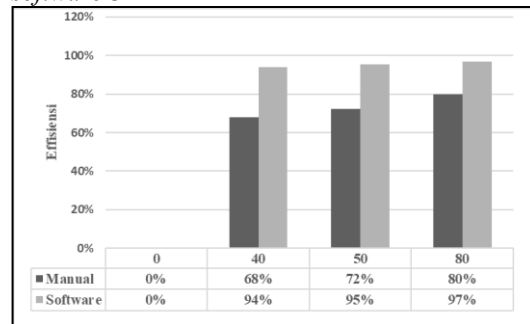
$$f_{cutoff} = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho}\right)} / L \quad (7)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemilihan Spesifikasi Pipa dan Insulator

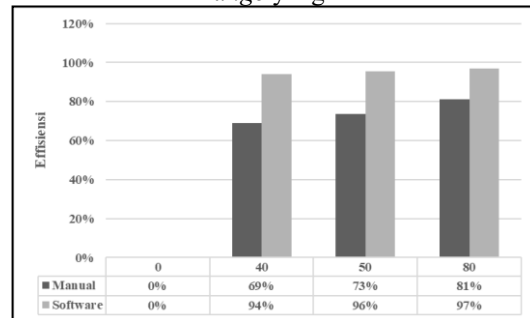
Penentuan spesifikasi pipa dan perancangan routing sistem pada sistem perpipaan gas buang dari generator diesel tipe Wartsila 12V32 berdasarkan rekomendasi engine maker menggunakan plat ASTM A47 *Specification for Ferritic Malleable Iron Castings* dengan ketebalan 10 mm. Setelah itu dilakukan perhitungan kecepatan gas buang dan pemilihan spesifikasi insulator yang sesuai dengan jenis material yaitu mineral wool.

Efektivitas insulator dihitung berdasarkan perbedaan laju perpindahan panas pada berbagai variasi ketebalan insulator. Perhitungan dilakukan secara manual dan menggunakan *software 3E-Plus*.



Gambar 4 Diagram Efisiensi Insulator pada Pipa DN500

Gambar 4 menunjukkan diagram nilai efisiensi hasil perhitungan manual dan *software* pada pipa DN500. Berdasarkan diagram tersebut dapat diketahui selisih nilai dari kedua metode tidak lebih dari 30%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil kedua perhitungan dapat dikatakan masih dalam satu *range* yang sama.



Gambar 5 Diagram Efisiensi Insulator pada Pipa DN900

Perbedaan nilai dari kedua metode perhitungan efisiensi insulator pada sistem

perpipaan gas buang disebabkan oleh beberapa faktor. Perhitungan menggunakan *software* lebih detail dalam memperhitungkan tahanan total, terutama tahanan termal radiasi, yang tidak dipertimbangkan dalam perhitungan manual. Sehingga, nilai tahanan dan efisiensi yang dihasilkan dari kedua perhitungan memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Meskipun demikian, ketebalan insulator 40 mm dapat dipilih dengan selisih efisiensi dari kedua metode perhitungan kurang dari 30% serta telah memenuhi batas minimum yang dianjurkan oleh *project guide*.

3.2 Analisis Back Pressure

Perhitungan *back pressure* pada pipa gas buang dilakukan dengan menggunakan beberapa parameter, seperti diameter pipa, kecepatan aliran fluida, massa jenis fluida, dll. Setiap diesel generator dalam sistem pipa gas buang dihitung secara terpisah. Langkah-langkah perhitungan termasuk perhitungan massa jenis fluida, nilai k , Pr , dan v dengan interpolasi atau menggunakan *software Engineering Equation Solver (EES)*, nilai *friction coefficient* (f) dari grafik Moody Diagram, dan perhitungan *major* dan *minor losses* pada desain pipa gas buang. Hasil perhitungan total *back pressure* pada masing-masing diesel generator dihitung dengan menjumlahkan *pressure loss* akibat perbedaan elevasi pada kedua sisi, *head loss*, serta akibat komponen seperti *silencer* dan *expansion joint*.

Tabel 1 Total ΔP Tiap Diesel Generator secara Perhitungan Manual

DG	Δz (m)	ΔP (kPa)	ΔP_s (kPa)	ΔP_e (kPa)	Total ΔP (kPa)	Ket
DG01	22,18	2,922	0,012	1,28	4,214	✓
DG02	22,18	3,342	0,012	1,28	4,633	✓
DG03	22,18	2,922	0,012	1,28	4,214	✓
DG04	14,81	2,874	0,012	1,28	4,166	✓
DG05	14,81	3,250	0,012	1,28	4,542	✓
DG06	14,81	2,874	0,012	1,28	4,166	✓

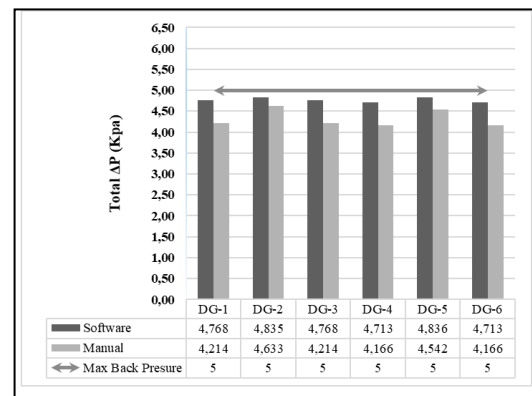
Hasil kalkulasi mencakup nilai *losses* akibat *fittings* dan komponen yang dipakai dalam perencanaan desain sistem. Perhitungan menggunakan bantuan *software* membutuhkan beberapa parameter penting, di antaranya adalah kapasitas gas buang, spesifikasi pipa yang digunakan, serta dimensi dan elevasi setiap pipa pada desain.

Tabel 2 Total ΔP Tiap Diesel Generator secara Perhitungan *Software*

DG	<i>Friction Losses</i> (kPa)	<i>Fitting Losses</i> (kPa)	<i>Comp. Losses</i> (kPa)	Total <i>Losses</i> (kPa)	Ket
DG01	0,4609	3,0158	1,2916	4,768	✓
DG02	0,8046	2,7388	1,2916	4,835	✓
DG03	0,4609	3,0158	1,2916	4,768	✓

DG04	0,5183	2,9031	1,2916	4,713	✓
DG05	0,8043	2,7397	1,2916	4,836	✓
DG06	0,5183	2,9031	1,2916	4,713	✓

Analisis nilai *back pressure* dilakukan pada desain setiap diesel generator dengan membandingkan masing-masing nilai yang didapatkan dari perhitungan secara manual maupun *software*. Berdasarkan hasil dari kedua perhitungan menunjukkan bahwa setiap desain dapat diterima karena memiliki nilai *back pressure* kurang dari 5 kPa. Hal tersebut ditunjukkan pada diagram batang di bawah ini.



Gambar 6 Diagram Analisis *Back Pressure*

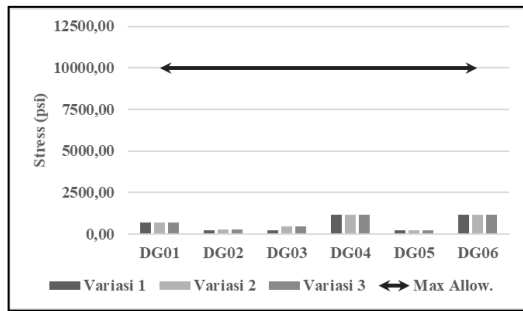
Nilai eror pada masing-masing desain menunjukkan bahwa hasil perhitungan baik secara manual maupun *software* masih dalam rentang yang sama. Hal ini dikarenakan nilai presentase eror antara keduanya yaitu 6% hingga 40%. Adanya eror disebabkan karena perbedaan nilai koefisien gesek pada setiap *fittings*.

3.3 Analisis Tegangan Pipa

Pemodelan sistem menggunakan *software* dengan memasukkan parameter yang diperlukan. Setiap diesel generator memiliki tiga variasi desain yang berbeda dalam penempatan *support*. Pada penelitian ini dilakukan analisis tegangan dan *displacement* pada tiap variasi desain.

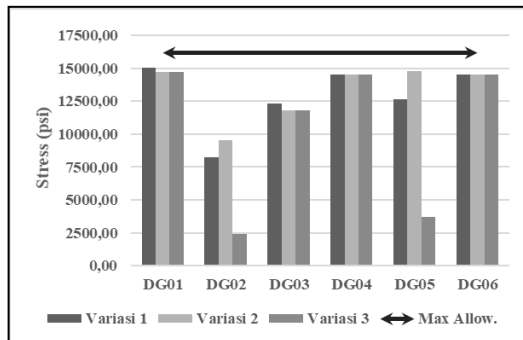
Pada pipa horizontal DN500, jarak maksimum yang diperbolehkan berdasarkan Sam Kannapan adalah 28,29 m. Sedangkan pada pipa DN900, jarak maksimum antar *support* adalah 24,81 m. Sedangkan jarak maksimum untuk pipa vertikal DN500 atau pipa 20" memiliki ketentuan jarak maksimum 17,07 m, serta pipa vertikal DN900 yaitu 18,29 m.

Pemilihan desain variasi yang tepat dapat dilakukan dengan membandingkan masing-masing nilai tegangan, *displacement* yang terjadi, dan jumlah *support* yang digunakan. Variasi desain yang dipilih harus memiliki nilai tegangan di bawah batas maksimum tegangan yang diizinkan.



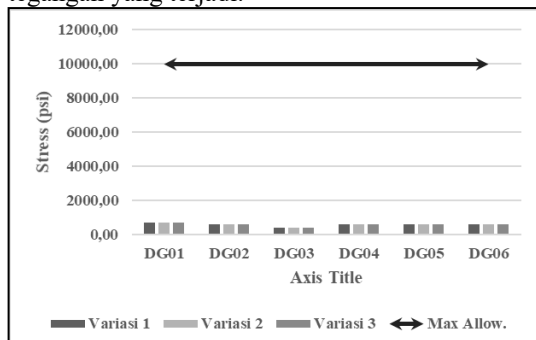
Gambar 7 Grafik Nilai Tegangan Maksimum akibat Beban Tetap tiap Diesel Generator

Diagram pada gambar 7 menunjukkan nilai tegangan akibat beban tetap pada tiga variasi desain untuk setiap diesel generator. Berdasarkan diagram tersebut, dapat disimpulkan bahwa setiap variasi desain memiliki nilai tegangan maksimum akibat beban tetap yang berada di bawah batas nilai tegangan yang diizinkan.



Gambar 8 Grafik Nilai Tegangan Maksimum akibat Beban Termal tiap Diesel Generator

Pada gambar 8 diagram pertama menunjukkan nilai tegangan akibat beban termal pada variasi desain 1 untuk setiap diesel generator. Penggunaan *support* yang lebih banyak tidak menjamin nilai tegangan dapat berkurang. Hal ini ditunjukkan pada gambar 8 mengenai nilai tegangan akibat beban termal, pada diesel generator 2 variasi desain 1 dengan jumlah *support* 4 buah memiliki nilai tegangan yang lebih kecil daripada variasi desain 2 dengan jumlah *support* 5 buah. Sehingga penentuan variasi desain tidak hanya didasarkan pada nilai tegangan yang terjadi.



Gambar 9 Grafik Nilai Tegangan Tangensial (*Hoop Stress*) tiap Diesel Generator

Pada gambar 9 di atas, diagram pertama menunjukkan nilai *hoop stress* pada variasi desain 1 untuk setiap diesel generator. Meskipun hasil nilai tegangan yang terjadi pada setiap variasi masih di bawah batas tegangan yang diizinkan, terdapat pertimbangan-pertimbangan lain dalam menentukan desain yang tepat.

Nilai *displacement* menjadi pertimbangan lain dalam menentukan variasi desain yang dipilih. Hal ini dikarenakan *displacement* pada tegangan pipa ini dapat menyebabkan beberapa masalah seperti deformasi atau kerusakan pada pipa, keausan atau kebocoran, dan gangguan pada infrastruktur sekitar. Variasi desain yang dipilih untuk DG01 yaitu variasi 3 dengan nilai tegangan di bawah nilai yang diizinkan, nilai *displacement* yang paling kecil, dan jumlah *support* yang digunakan paling sedikit. Berdasarkan cara pemilihan yang sama, maka di bawah ini merupakan tabel hasil pemilihan variasi desain setiap diesel generator.

Tabel 3 Variasi Desain yang dipilih untuk Setiap Diesel Generator

DG	Variasi Desain yang Dipilih
DG01	Variasi 3
DG02	Variasi 1
DG03	Variasi 2
DG04	Variasi 1
DG05	Variasi 1
DG06	Variasi 1

4. KESIMPULAN

Hasil perancangan pipa gas buang untuk diesel generator pada PLTD terapung konversi kapal *chemical tanker* 6200 DWT menyimpulkan beberapa hal berikut:

- Variasi yang digunakan pada desain sistem pipa gas buang ini hanya berdasarkan pada penggunaan *support*. Sehingga, setiap variasi desain memiliki rute pipa yang sama.
- Ketebalan insulator yang direncanakan adalah 40 mm dengan material mineral wool. Berdasarkan perhitungan manual maupun *software*, ketebalan ini akan mampu menahan beban panas keluar dari pipa dengan efisiensi sebesar 68% hingga 94% pada keseluruhan desain.
- Analisis *back pressure* secara manual dan menggunakan *software* menghasilkan nilai yang relatif sama. Semua sistem pipa gas buang dari diesel generator yang dirancang berada pada batas aman, dengan nilai *back pressure* di bawah nilai maksimum, dan presentase eror sebesar 4,36% s.d 13,15%.
- Perhitungan panjang pipa span menghasilkan nilai maksimum untuk jarak antar *support* pada pipa horizontal DN500 28,93 m dan

pada pipa vertikal DN500 17,07 m. Pada pipa horizontal DN900, nilai maksimum jarak antar *support* adalah 24,81 m, sedangkan untuk pipa vertikal DN900 adalah 18,29 m. Analisis tegangan pipa dari pemodelan sistem lengkap dengan penggunaan *support* menunjukkan nilai tegangan yang berada di bawah batas tegangan yang diizinkan, dengan rasio tegangan berkisar antara 0,02 hingga 0,98. Variasi desain yang dipilih untuk masing-masing diesel generator adalah sebagai berikut:

- Diesel Generator 1: Variasi 3 dengan jumlah *support* 5 buah.
 - Diesel Generator 2: Variasi 1 dengan jumlah *support* 4 buah.
 - Diesel Generator 3: Variasi 2 dengan jumlah *support* 5 buah.
 - Diesel Generator 4: Variasi 1 dengan jumlah *support* 3 buah.
 - Diesel Generator 5: Variasi 1 dengan jumlah *support* 4 buah.
 - Diesel Generator 6: Variasi 1 dengan jumlah *support* 3 buah.
5. Berdasarkan variasi desain yang telah dipilih, maka didapatkan material take off (MTO) dengan jumlah unit paling banyak yaitu 13 *equipments*.

5. PUSTAKA

- [1] Wijana, M., Triadi, A.A.A. and Syahrul Anwar, L. (2016) Studi Kelayakan Penggunaan Mesin Diesel dengan Metode *Break Even Point* (BEP) dan Analisis Sensitivitas pada PLTD.
- [2] Wärtsilä (2021) Wärtsilä 32 *product guide*.
- [3] Ramadhani, S.S. (2021) Perancangan Pipa Gas Buang Mesin Yanmar 6CH-HTE3 YX-71 pada Perancangan Laboratorium Kamar Mesin Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Surabaya.
- [4] Baharuddin, A., Husni, S. and Setiawan, W. (2011) *Analisa Back Pressure Terhadap Prestasi Mesin Diesel Nanchang 2105 A-3*.
- [5] Maleev, V.L. (1945) *Internal Combustion Engines Theory And Design*. 2nd edn.
- [6] ASME Code B31.3 (2020).
- [7] Kannappan, S. (1986) '*Introduction to Pipe Stress Analysis*'.