ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN PLENUM CHAMBER PADA DESAIN SISTEM VENTILASI DAN SALURAN UDARA KAMAR MESIN KAPAL FERRY RO-RO 100 M

Nurma Shaliha Setyaningsih [1]*, Agung Purwana[2], Eky Novianarenti [3]

Program Studi D-IV Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia[1]*
Program Studi D-IV Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia[2]
Program Studi D-IV Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia[3]
Email: nurmasetyaningsih@student.ppns.ac.id [1]; agung_purwana@ppns.ac.id [2*]; ekynovianarenti@ppns.ac.id [3*]*

Abstract - *The engine room ventilation system is very important to maintain the temperature in the comfort zone of the engine room. Plenum chambers are mostly applied to ventilation systems and air ducts in land-based buildings. Numerical method was used to investigate the flow characteristics with the addition of plenum chamber in the engine room air duct using Ansys 18.1 software. The air capacities obtained were 85,095 m3 /h for the main engine, 14,720 m3 /h for the auxiliary engine, and 9,501 m3/h for the emergency auxiliary engine. The air duct design separates the portside and starboard side, resulting in a blower capacity of 60,000 m3/h. The 3D modeling design included in the analysis of the Computational Fluids Dynamics (CFD) method shows that the Plenum chamber can help homogenize the flow. With the k-epsilon turbulence model, visualization of streamline velocity, velocity before and after entering the plenum chamber and visualization of pressure along the air duct were obtained. The results with the addition of plenum chamber the air flow rate at inlet 1 increased by 0.0604 kg/s, the average velocity increased by 0.11 m/s and the maximum velocity increased by 1.006 m/s. And with the addition of the plenum chamber, the turbulence kinetic energy (TKE) value ranges from 1.98e-03 m2/s2 to 1.82e+02 m2/s2, smaller than the TKE value of the air duct without a plenum chamber, which ranges from 1.76e-03 m2/s2 to 1.97e+02 m2/s2..*

Keywords*: Ducting, Engine room, Plenum chamber, numeric, Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Nomenclature

q_c	= Jumlah dari aliran udara untuk pembakaran (m^3⁄s)
q_h	= Jumlah aliran udara untuk pengosongan dari emisi panas (m^3⁄s)
q_dp	= Laju aliran untuk pembakaran pada main engine (m^3⁄s)
q_dg	= Laju aliran untuk pembakaran pada auxiliary engine (m^3⁄s)
q_b	= Laju aliran untuk pembakaran pada boiler (m^3⁄s)
P_dp	= service standart power dari maip engine pada maksimal continuous power output (kW)
m_ad	= kebutuhan udara untuk pembakaran pada diesel engine (kg⁄(kW.s))
ρ_dg	= service standart power dari auxiliary engine pada maksimal continuous power output (kW)

1. PENDAHULUAN

Sistem ventilasi dalam kapal adalah sistem yang mengatur proses pertukaran udara kotor dengan udara segar dengan tujuan mempertahankan kebutuhan susunan kimia dan kelembaban udara di dalam ruangan kapal [1].Sistem ventilasi dalam kapal ini khususnya kamar mesin sangat penting, karena di dalamnya terdapat berbagai peralatan dan instalasi mesin yang mendukung kerja operasional kapal. Peralatan dan instalasi mesin tersebut mengeluarkan beban panas, sehingga apabila temperatur kamar mesin tidak dikondisikan dengan baik maka akan berdampak pada naiknya temperatur berelebih yang dapat menyebabkan kerusakan pada mesin dan mengganggu keefektifan kerja dalam kamar mesin[2].

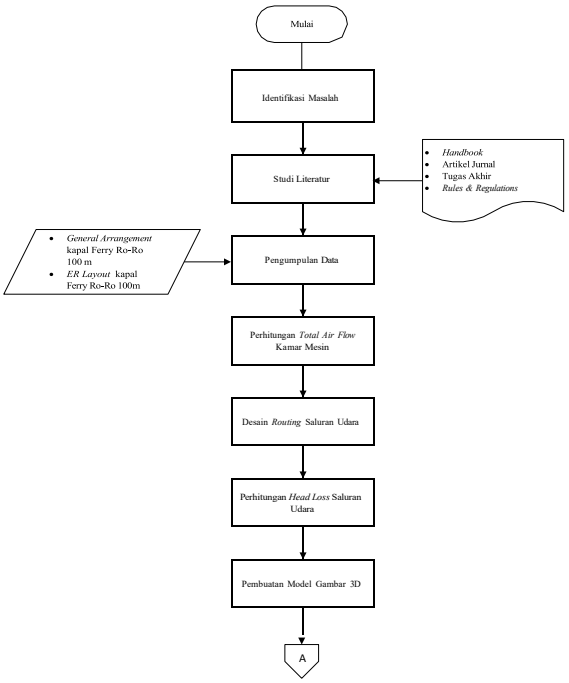
Sistem ventilasi yang digunakan di kamar mesin kapal untuk menyuplai udara yaitu sistem ventilasi udara mekanikal dimana terdapat kipas dan saluran udara. Saluran udara untuk kamar mesin tersebut selalu bekerja bersamaan, saat udara dari luar masuk untuk menyuplai kebutuhan udara dalam kamar mesin, dan untuk membuang udara panas dari dalam kamar mesin adalah dengan cara dihisap keluar melalui saluran exhaust[3]. Dalam upaya pengurangan konsumsi

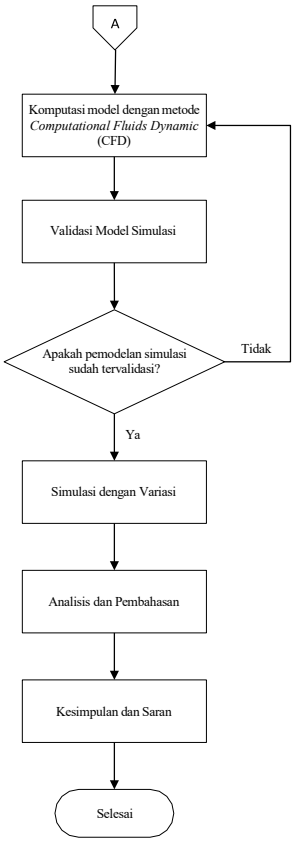
energi dan meningkatkan kinerja sistem ventilasi, plenum chamber umumnya digunakan untuk memberikan homogenisasi aliran dalam sistem. Plenum chamber pada dasarnya adalah selungkup persegi panjang besar dengan saluran masuk dan satu atau lebih saluran keluar, umumnya dipasang di antara kipas dan saluran utama untuk mencapai keseragaman aliran udara yang bergejolak[4]. Namun hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi plenum chamber yang umum digunakan dalam engineering system bukanlah struktur yang optimal untuk mencapai distribusi aliran yang seragam dan pengurangan resistensi[5].

Untuk itu, perlu penelitian lebih lanjut mengenai aplikasi optimasi desain struktural plenum chamber pada sistem ventilasi dan saluran udara kamar mesin di kapal. Dalam penelitian ini akan menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menyelidiki karakteristik aliran dengan adanya penambahan plenum chamber. Sehingga dapat diketahui pengaruh penambahan plenum chamber dalam sistem ventilasi dan saluran udara kamar mesin di kapal terhadap efesiensi energi..

2. METODOLOGI PENELITIAN

Diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar dibawah :





Gambar 1 *Flowchart* Penelitian

2.1 Data *Engine Room* Kapal

Pada penelitian ini, data kapal yang digunakan adalah data kapal Ferry 100 m yang merupakan data kapal yang berada pada tahap desain yang dibuat oleh PT. Adiluhung Sarana Segara Indonesia. Data utama engine room kapal yang dibutuhkan dalam perhitungan sebagai berikut.

1. Data Main Engine
   Quality 2
   Type/Capacity : ABT. 2600 HP
2. Data Main Generator
   Quality 1
   Type/Capacity : 500 kVA
3. Data Harbor Generator
   Quality 1
   Type/Capacity : 250 kVA
4. Data Peralatan sumber daya listrik di Engine Room

Peralatan yang menggunakan sumber daya listrik yang ada pada kamar mesin ini dapat mengahasilkan panas yang dapat meyebabkan temperatur pada kamar mesin meningkat. Adapun peralatan tersebut antara lain:

Tabel 1 Peralatan sumber daya listrik di *engine room*

No	Nama Peralatan	Jumlah	Daya Motor	
			kW	HP
1	*GS Pump*	1	15,00	20,39
2	*Bilge Pump*	1	8,00	10,88

3	*Standby LO Gearbox Pump*	2	2,00	2,72
4	*Air Compressor*	2	8,00	10,88
5	*Oily Water Separator*	1	3,50	4,76
6	*Oily Bilge (Sludge) Pump*	1	0,70	0,95
7	*Standby FW Cooling Pump*	1	6,00	8,16
8	*LO Transfer Pump*	1	0,20	0,27
Total			43,40	59,01

2.3 *Total Air Flow* (Q)

Total air flow mengacu pada standard ISO 8861

$$Q = q_c + q_h [m^3/s] \quad (1)$$

a Perhitungan Kebutuhan Udara Untuk Pembakaran berdasarkan standar ISO 8861 sebagai berikut:

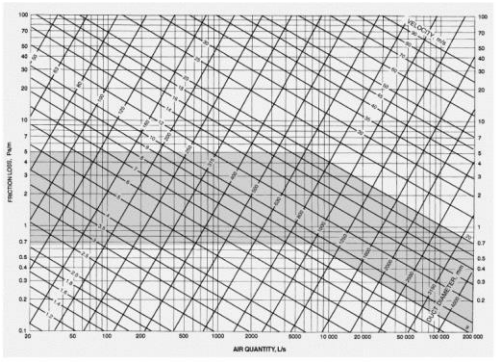
$$q_c = q_{dp} + q_{dg} + q_b \quad [m^3/s] \quad (2)$$

b Perhitungan jumlah aliran udara untuk pengosongan dari emisi panas

$$q_h = \frac{\emptyset dp + \emptyset dg + \emptyset b + \emptyset p + \emptyset g + \emptyset el + \emptyset ep + \emptyset t + \emptyset o}{\rho \times C \times \Delta t} - 0{,}4(q_{dp} + q_{dg}) + q_b \quad [m^3/s] \quad (3)$$

2.4 *Duct Design Method*

Metode yang digunakan ialah Equal Friction Method. Pada metode ini, saluran udara ditentukan ukurannya sedemikian rupa sehingga kerugian gesek per satuan Panjang *ducting* untuk setiap section adalah sama/konstan. Setelah dihitung/dipilih dimensi akhir dari *ducting* biasanya akan diambil ke pendekatan yang ada sesuai dengan ukuran ducting standard.



Gambar 2 *Friction Chart for Round Duct*

2.5 *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Kemudian melakukan pemodelan saluran udara pada *engine room* untuk mendapatkan koordinat 3D menggunakan Solidworks. Langkah selanjunya yaitu simulasi numerik ducting pada *engine room* menggunakan bantuan software Ansys 18.2.

Selanjutnya pemodelan ducting pada *engine room* simulasi numerik menggunakan pendekatan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Masukan data untuk simulasi menggunakan CFD ini berupa saluran udara (*ducting*), mesin serta peralatan yang terdapat di kamar mesin, letak dan besar panas yang dikeluarkan mesin dan peralatan, kecepatan udara inlet ducting yang masuk ke kamar mesin. Sedangkan output yang dihasilkan berupa arah aliran udara, tekanan, dan kecepatan aliran udara dalam kamar mesin. Berikut tahapan simulasi numerik :

a. Geometry
b. Mesh Pre Processor
c. Setup
d. Solution Solver
e. Result Post Processor

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perhitungan Beban Panas

Dari perhitungan didapatkan hasil sebagai berikut.

Q1 (Main engine 2 buah) = 85095 m3/h
Q1 per main engine = 42548 m3/h
= 11,8189 m3/s
= 11819 L/s
Q2 (Auxiliary engine 1 buah)= 14720 m3/h
= 4,089 m3/s
= 4089 L/s
Q2 (Emergency auxiliary engine 1 buah)
= 9501 m3/h
= 2,639 m3/s
= 2639 L/s

Dalam perancangan saluran udara, dipisah bagian *portside* dan *starboard* yakni M/E SB dengan A/E dan M/E PS dengan Emergency A/E. Maka dari itu saluran udara yang dibagi dua menjadi:

Q1 per main engine + Q2
= 42548 m3/h + 14720 m3/h
= 57267,65 m3/h
= 15907,68 L/s
Q1 per main engine + Q3
= 42548 m3/h + 9501 m3/h
= 52048,86 m3/h
=14458 L/s

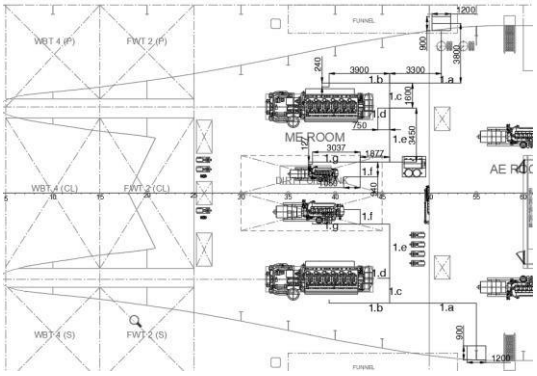
Dikarenakan kapasitas kebutuhan udara Q1 per main engine + Q2 dan Q1 per main engine + Q3 memiliki nilai yang tidak terlalu berbeda, oleh karena itu kapasitas blower yang dipakai akan disamakan.

Kapasitas blower yang dipakai= 60000 m3/h
= 2,639 m3/s
= 2639 L/s

Spesifikasi
Merk = NYBORG MPV 1250 D1
Type = Marine Axial Flow Fans
Kapasitas blower = 60000 m3/h
Rpm = 985 rpm

3.2 Desain 3D Routing Saluran Udara

Pembuatan desain 3 dimensi adalah langkah awal untuk melakukan simulasi dengan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Sebelumnya dilakukan penggambaran routing saluran udara 2 dimensi pada sketsa tampak atas bagian kamar mesin pada software AutoCad dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3 Routing Saluran Udara

Dalam mengatur ukuran pada *routing* saluran udara *main engine* dan *auxiliary engine* yang telah dibuat dilakukan perhitungan melalui *software Microsoft Excel* dan didapatkan ukuran saluran udara menurut ASHRAE dapat dilihat pada tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2 Kapasitas saluran udara *main engine* dan *auxiliary engine*

Duct	Kapasitas Udara (CMH)	Kapasitas Udara (L/s)	Panjang m	Ø	Velocity (m/s)	Friction Loss (Pa/m)	Ukuran Duct (P x L) (mm)
1.a	60000	**16667**	17,1	1100	17	2	1200 x 900
1.b	22289	**6191**	10,1	730	13	2	500 x 900
1.c	37711	**10475**	1,6	920	15	2	800 x 900
1.d	22289	**6191**	6,8	730	13	2	500 x 900
1.e	15422	**4284**	5,3	650	12	2	400 x 900
1.f	7711	**2142**	7,9	500	10	2	250 x 900
1.g	7711	**2142**	3,1	500	10	2	251 x 900

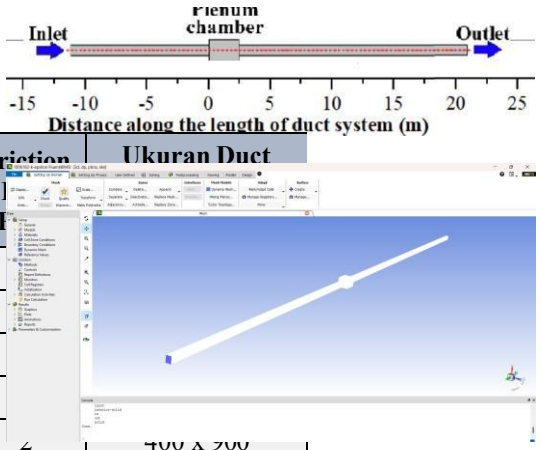
Tabel 3 Ukuran saluran udara *main engine* dan *auxiliary engine*

Duct	Friction Loss (Pa/m)	Ukuran Duct (P x L) (mm)
1.a	2	1200 x 900
1.b	2	500 x 900
1.c	2	800 x 900
1.d	2	500 x 900
1.e	2	400 x 900
1.f	2	250 x 900
1.g	2	251 x 900

3.3 Validasi Model Simulasi

Dengan penambahan plenum chamber pada saluran udara dapat membantu homogenesasi aliran udara sehingga dapat mengalir lebih baik. Sebagai pembanding dan validasi dalam simulasi CFD pada penelitian [5] dengan hasil simulasi sebagai berikut :

1. *Geometry* model simulasi dapat terlihat pada gambar 4
2. Lalu pada proses *meshing* menggunakan *element size* 0.125 m dapat dilihat pada gambar 5



Gambar 4 Validasi 3D Model Simulasi

Setelah geometri dibuat kemudian langkah selanjutnya dilakukan proses *meshing* seperti pada gambar 4.5.

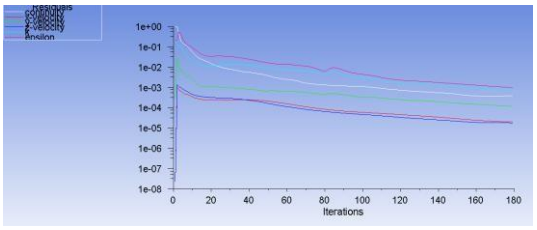
Jenis *meshing* yang digunakan sebagian besar adalah tipe *hexsahedral* sejumlah 903296 dengan ukuran minimum size 2.e-006 m dan maksimum size 1.6384e-002 m.

Langkah selanjutnya adalah mengatur kondisi batas sesuai lingkungan simulasi antara lain :

- Kecepatan *inlet* udara.

Fluida yang digunakan adalah udara dengan densitas 1,225 kg/m^3 pada temperature 25 °C, dan viskositas 1,7894e-05.

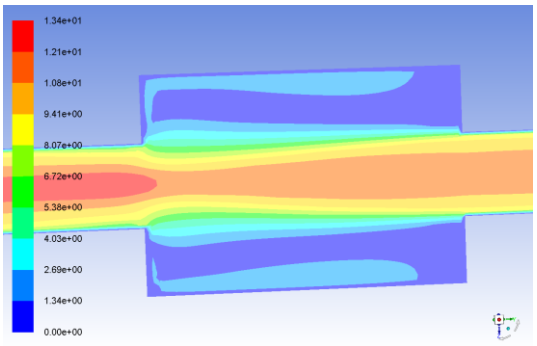
- *Inlet* kecepatan 9,75 m/s dengan tekanan 20 Pa.
- *Pressure outlet* 20 Pa.
- Kekasaran permukaan dinding (*wall*) *roughness height* 0 m dan *rougness constant* 0,5



Gambar 5 Hasil iterasi simulasi *paper*

Selanjutnya dilakukan tahap simulasi *solver* untuk memprediksi atau menghitung kecepatan aliran dan tekanan udara yang terjadi didalam saluran udara termasuk didalamnya *plenum chamber*.

Setelah simulasi dilakukan maka tahap selanjutnya adalah menganalisa dan menginterpretasikan hasil simulasi.

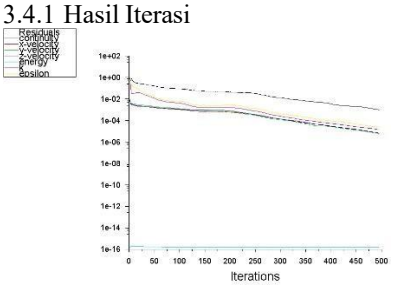


Gambar 6 aliran dalam *Plenum Chamber*

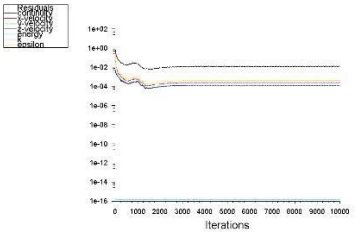
Pada gambar 6 terlihat *flow* udara meningkat secara stabil hingga menyusut, dan mulai naik kembali saat keluar *plenum chamber*. Sedangkan *flow* udara yang bedekatan dengan dinding *plenum chamber* menjadi sangat rendah.

3.4 Simulasi saluran udara pada kamar mesin kapal Ferry Ro-Ro 100 m tanpa Plenum Chamber dan dengan Plenum Chamber

3.4.1 Hasil Iterasi

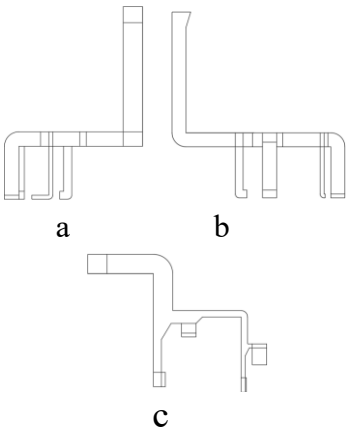


Gambar 7 Hasil iterasi simulasi *ducting* tanpa *plenum chamber*



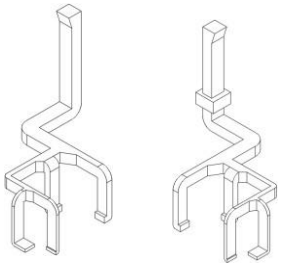
Gambar 8 Hasil iterasi simulasi *ducting* dengan *plenum chamber*

3.4.2 Gambar 3D model



Gambar 9 *Geometri 2D saluran udara*

Pada gambar 9 a merupakan geometri saluran udara tampak depan. Pada gambar 9 b merupakan geometri saluran udara tampak samping. Dan gambar 9 c merupakan geometri saluran udara tampak atas.

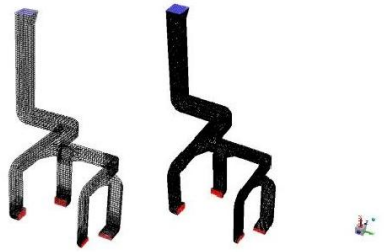


Gambar 10 3D Model saluran udara tanpa dan dengan *plenum chamber*

Ukuran *Plenum Chamber* pada saluran udara kamar mesin ialah 1750 mm x 1750 mm x 1000 mm.

3.4.3 Meshing

- Tanpa Plenum Chamber

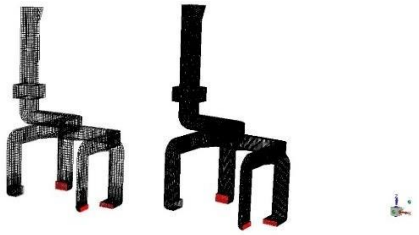


a b

Gambar 11 *Meshing* tanpa plenum chamber

Jumlah *meshing* pada gambar 11a sejumlah 19953, dengan ukuran minimal 2e-005 m dan ukuran maksimal 0,16384 m. Sedangkan pada gambar 11b sejumlah 191291, dengan ukuran minimal 6,5e-006 m dan ukuran maksimal 53248e-002 m. Dengan adanya pengurangan ukuran mesh yang sama, maka jumlah mesh pada *ducting* menjadi lebih banyak.

- Dengan Plenum Chamber



a b

Gambar 4. 1 *Meshing* dengan penambahan plenum chamber

Jumlah meshing pada gambar 4.13.a sejumlah 20486, dengan ukuran minimal 2e-005 m dan ukuran maksimal 0,16384 m. Sedangkan pada gambar 4.12.b sejumlah 204507, dengan ukuran minimal 6,5e-006 m dan ukuran maksimal 53248e-002 m. Dengan adanya pengurangan ukuran mesh yang sama, maka jumlah mesh pada ducting menjadi lebih banyak.

Jumlah mesh antara ducting tanpa plenum chamber lebih sedikit dibandingkan dengan ducting dengan *plenum chamber*.

3.4.4 Kondisi Batas

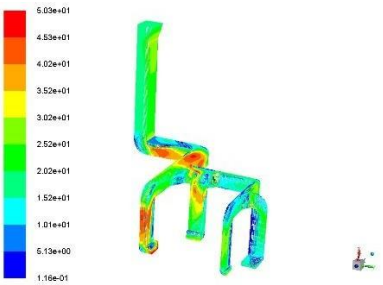
Langkah selanjutnya adalah mengatur kondisi batas sesuai lingkungan simulasi antara lain :

- Kecepatan *inlet* udara

Fluida yang digunakan adalah udara dengan densitas 1,225 kg/m^3 pada temperature 25 °C, dan viskositas 1,7894e-05.

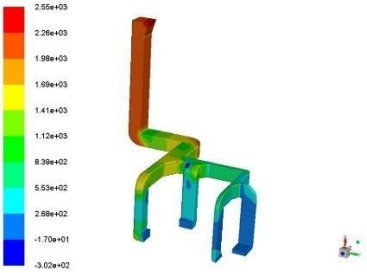
- *Inlet* kecepatan 17 m/s dengan tekanan 120 Pa.
- *Pressure outlet* 20 Pa.
- Kekasaran permukaan dinding (*wall*) *roughness height* 0 m dan *rougness constant* 0,5.

3.4.5 Hasil Simulasi



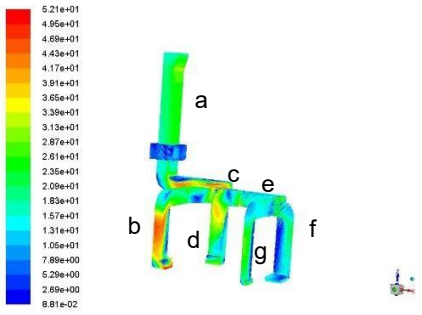
Gambar 12 Kontur Kecepatan pada ducting tanpa plenum chamber pada v=17 m/s dan P=120 Pa

Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan kecepatan aliran udara pada ducting tanpa plenum chamber berbagai warna yang dipetakan pada permukaannya. Warna-warna ini sesuai dengan legenda di sebelah kiri gambar, yang berkisar dari 1,6e+01 di bagian bawah (berwarna biru) hingga 5,3e+01 di bagian atas (berwarna merah). Skala ini mewakili data keceepatan udara yang terdistribusi di seluruh permukaan model. Gradien warna menunjukkan bagaimana sifat ini bervariasi di berbagai bagian objek. Pada bagian a, c, e f g, kecepatan aliran udara rendah, sedangkan pada bagian saluran udara b dan d kecepatan aliran udara meningkat.



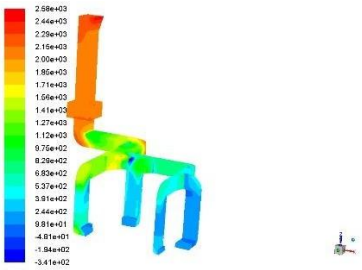
Gambar 13 Kontur Tekanan pada ducting tanpa plenum chamber pada v=17 m/s dan P=120 Pa

Nilai tekanan ditunjukkan oleh legenda di sebelah kiri, berkisar dari -3,02e+02 (berwarna biru) hingga 2,56e+03 (berwarna merah). Pada aliran *upstream* inlet (setelah keluar dari fan) secara vertical, tekanan menjadi sangat tinggi. Sememtara setelah melewati *elbow* 90° ducting menjadi horizontal, tekanan menjadi menurun hingga pada samua outlet.



Gambar 14 Kontur Kecepatan pada *ducting* dengan *plenum chamber* pada v=17 m/s dan P=120 Pa

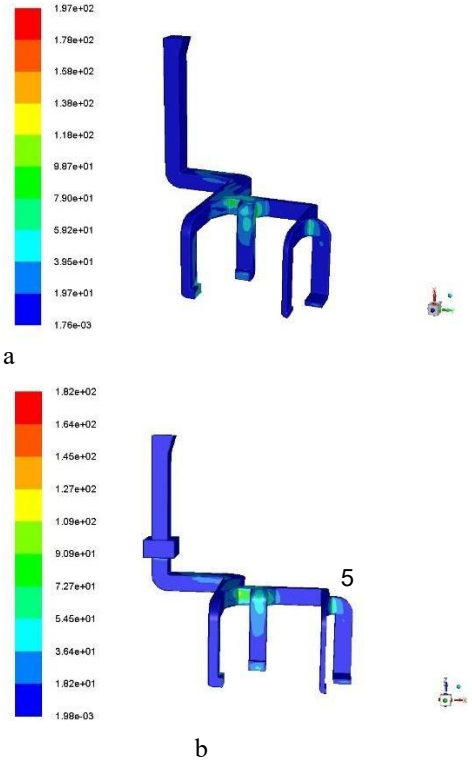
Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan kecepatan aliran udara pada ducting tanpa plenum chamber berbagai warna yang dipetakan pada permukaannya. Warna-warna ini sesuai dengan skala di sebelah kiri gambar, yang berkisar dari 1,6e+01 di bagian bawah (berwarna biru) hingga 5,3e+01 di bagian atas (berwarna merah). Skala ini mewakili data keceepatan udara yang terdistribusi di seluruh permukaan model. Gradien warna menunjukkan bagaimana sifat ini bervariasi di berbagai bagian objek. Pada bagian a, c, e f g, kecepatan aliran udara rendah, sedangkan pada bagian saluran udara b dan d kecepatan aliran udara meningkat.



Gambar 15 Kontur Tekanan pada *ducting* dengan *plenum chamber* pada v=17 m/s dan P=120 Pa

Nilai tekanan ditunjukkan oleh legenda di sebelah kiri, berkisar dari -3,02e+02 (berwarna biru) hingga 2,56e+03 (berwarna merah). Pada aliran *upstream* inlet (setelah keluar dari fan) secara vertical, tekanan menjadi sangat tinggi. Sememtara setelah melewati *elbow* 90° ducting menjadi horizontal, tekanan menjadi menurun hingga pada samua outlet.

3.5 Energi kinetik turbulensi (TKE) dari desain sistem ventilasi dan saluran udara dengan penambahan plenum chamber pada kamar mesin kapal Ferry Ro-Ro 100 m



Gambar 4. 2 Visualisasi energi kinetik (TKE) turbulensi saluran udara (a) tanpa plenum chamber*, dan (b) dengan* plenum chamber

Visualisasi pada gambar 4.22 merupakan representasi komputasi dinamika fluida tiga dimensi (CFD) dari energi kinetik turbulensi (TKE) dalam sistem saluran udara. Pada gambar 4.22 a skala warna di sebelah kiri menggambarkan nilai TKE dalam meter persegi per detik kuadrat (m^2/s^2), dengan rentang dari 1,76e-03 hingga 1,97e+02. Sedangkan pada gambar 4.22 b skala warna di sebelah kiri menggambarkan nilai TKE dalam meter persegi per detik kuadrat (m^2/s^2), dengan rentang dari 1,98e-03 hingga 1,82e+02. Berdasarkan visualisasi TKE di atas, maka penambahan *plenum chamber* efektif untuk menurunkan turbulensi udara dalam saluran udara.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

Berdasarkan perhitungan beban panas dalam kamar mesin menggunakan standard ISO 8861, didapat Q1 (main engine) sebesar 42548 m3/h, Q2 (main generator) sebesar 14720 m3/h, dan Q3 (harbor generator) sebesar 9501 m3/h, serta total peralatan sumber daya listrik sebesar 43,40 kW atau 59,01 HP.

Desain 3D sistem ventilasi dan saluran udara dengan penambahan plenum chamber pada kamar mesin kapal Ferry Ro-Ro 100 m menggunakan software Autocad untuk routing jalur saluran udara, lalu dilakukan perhitungan melalui software Microsoft Excel dan didapatkan ukuran saluran udara menurut ASHRAE, sehingga 3D model digambar pada software Solidworks dan dianalisis menggunakan Ansys R18.1.

Karakteristik aliran dengan penambahan plenum chamber ialah turbulen dengan kecepatan dan tekanan yang bervariasi dari hasil simulai *Computational Fluids Dynamic* (CFD). Dengan penambahan plenum chamber volume udara pada outlet 1 meningkat sebesar 0,0604 kg/s, rata rata kecepatan meningkat sebesar 0,11 m/s dengan kecepatan maksimal meningkat sebesar 1,006 m/s. Sedangkan Total energi yang hilang dari desain sistem ventilasi dan saluran udara dengan penambahan plenum chamber 3975,288 N/m².

5. UCAPAN TERIMA KASIH

1. Allah SWT atas berkat, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan aman, selamat, lancar, dan barokah.
2. Kedua orangtua serta keluarga besar penulis yang telah memberikan semangat, dukungan, serta do'a selama menempuh pendidikan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
3. Bapak Dr. Agung Purwana, S.T., M.T selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan arahan dan saran selama penulisan Tugas Akhir.
4. Ibu Eky Novianarenti. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan arahan dan saran selama penulisan Tugas Akhir.
5. Seluruh Dosen dan Karyawan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan banyak ilmu selama masa perkuliahan.
6. Teman – teman seperjuangan Program Studi D4 Teknik Permesinan Kapal angkatan 2020 atas kerjasama dan kekompakan selama menempuh studi di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] B. Utomo, “Sistem ventilasi dalam kapal,” vol. 28, no. 1, hal. 76–82, 2007.

[2] N. Suruali, “STUDI PERENCANAAN SISTIM PENGATURAN SUHU UDARA KAMAR MESIN BERBASIS KOMPUTER - (ENGINE ROOM THERMAL CONTROL SYSTEM),” vol. 10, no. 2, 2016.

[3] M. R. Nugraha, “OPTIMASI TATA LETAK VENTILATOR UNTUK MENJAGA TEMPERATUR RUANG KAMAR MESIN KAPAL GENERAL CARGO 8000 DWT MENGGUNAKAN PENDEKATAN CFD,” 2016.

[4] W. Zhang, A. Li, R. Gao, X. Gao, dan C. Yang, “Visualization experiment and flow homogenization optimization of the multi-path plenum chamber system using a perforated plate,” *Build. Environ.*, vol. 233, no. February, hal. 110081, 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110081.

[5] W. Zhang, A. Li, M. Zhou, R. Gao, dan Y. Yin, “Flow characteristics and structural parametric optimisation design of rectangular plenum chambers for HVAC systems,” *Energy Build.*, vol. 246, hal. 111112, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111112.