SKRIPSI

POTENSI PENGGUNAAN TABUNG VORTEKS UNTUK PENGKONDISIAN UDARA PADA RUANG AKOMODASI KAPAL *FERRY RO-RO* 2000 *GT* MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)*

Disusun dan diajukan oleh:

MUHAMMAD AINUL ISMAWAN
D091 19 1063

PROGRAM STUDI SARJANA
TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

POTENSI PENGGUNAAN TABUNG VORTEKS UNTUK PENGKONDISIAN UDARA PADA RUANG AKOMODASI KAPAL *FERRY RO-RO* 2000 *GT* MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)*

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD AINUL ISMAWAN
D091 19 1063

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 16 November 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,	Pembimbing Pendamping,
Andi Husni Sitepu, S.T., M.T.	M. Iqbal Nikmatullah, S.T., M.T.
NIP 197702712001121001	NIP 198701312019031007

Ketua Program Studi,

Dr.Eng. Ir. Faisal Mahmuddin, S.T., M.Inf.Tech., M.Eng.
NIP. 198102112005011003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama	:	Muhammad Ainul Ismawan
NIM	:	D091191063
Program Studi	:	Teknik Sistem Perkapalan
Jenjang	:	S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Potensi Penggunaan Tabung Vorteks Untuk Pengkondisian Udara Pada Ruang Akomodasi Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT* Menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 17 Oktober 2023

Yang Menyatakan

Muhammad Ainul Ismawan

D091 19 1063

ABSTRAK

MUHAMMAD AINUL ISMAWAN. *Potensi Penggunaan Tabung Vorteks Untuk Pengkondisian Udara Pada Ruang Akomodasi Kapal Ferry Ro-Ro 2000 GT Menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD)* (dibimbing oleh Andi Husni Sitepu, S.T., M.T. dan Muhammad Iqbal Nikmatullah, S.T., M.T.)

Sistem pengkondisian udara kapal umumnya menggunakan sistem pendingin ruangan sentral yang biasanya menggunakan sistem kompresi uap. Salah satu alternatif untuk pendinginan ruangan yang ramah lingkungan adalah tabung vorteks. Tabung Vorteks dianggap cocok untuk lingkungan karena tabung ini memiliki beberapa keunggulan seperti tidak ada masalah kebocoran karena alat tersebut hanya menggunakan udara sebagai refrigeran tidak menyebabkan percikan api atau ledakan. Tujuan dari penelitian ini, untuk mengetahui nilai *Coefficient of Performance* (*COP*) dari tabung vorteks dan temperatur yang dihasilkan pada ruang akomodasi Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 GT Lintas Lamongan-Bahaur. Metode yang digunakan yaitu metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. *CFD* merupakan metode perhitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan penghitungan pada tiap-tiap elemen pembaginya. Dalam tugas akhir ini digunakan *software ANSYS CFX*® R2 2022 dengan kemampuan untuk menyajikan beberapa besaran dalam analisis fluida seperti suhu, tekanan, kecepatan aliran udara. Berdasarkan simulasi *Computational Fluid Dynamics* hasil perhitungan *COP* tabung vorteks prototipe pada tekanan 3,5 bar pada durasi simulasi 1500 detik didapatkan nilai *COP* sebesar 0,000016. Dari perhitungan *COP* tabung vorteks desain alternatif nilai *COP* terbesar yaitu 0,000120, sedangkan untuk *COP* terkecil nilai yang dihasilkan 0,000067. Adapun hasil simulasi dengan penambahan pipa buang pada *outlet* panas pada ruangan Zona 1 mengalami penurunan suhu sebesar 4,97 ^{o}C, Zona 2 penurunan suhu sebesar 4,86 ^{o}C, Zona 3 penurunan suhu sebesar 4,86 ^{o}C. Dapat disimpulkan bahwa semakin besar tekanan udara yang masuk ke dalam tabung maka semakin besar *Coefficient Of Performance (COP)* dan hasil simulasi pada ruang akomodasi 02 Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT* suhu dingin yang dihasilkan dari tabung vorteks desain alternatif dapat menurunkan beban panas yang dihasilkan ruangan tersebut.

Kata Kunci: Tabung Vorteks, *CFD*, *COP*, Temperatur

ABSTRACT

MUHAMMAD AINUL ISMAWAN. *The Potential Use of Vortex Tube for Air Conditioning in the Accommodation Area of 2000 GT Ro-Ro Ferry Ship Using Computational Fluid Dynamics (CFD)* (*guided by Andi Husni Sitepu, S.T., M.T. and Muhammad Iqbal Nikmatullah, S.T., M.T.*)

The air conditioning system on ships generally uses a central air conditioning system, typically employing a vapor compression system. One environmentally friendly alternative for room cooling is the vortex tube. The Vortex tube is considered environmentally suitable because it offers several advantages, such as no leakage issues as it solely uses air as the refrigerant, thus avoiding fire or explosion hazards. The purpose of this research is to determine the Coefficient of Performance (COP) of the vortex tube and the temperatures generated in the accommodation area of the 2000 *GT Ro-Ro Ferry, operating on the Lamongan-Bahaur route. The method used is Computational Fluid Dynamics (CFD), a calculation method involving control of dimensions, area, and volume using computer computation to calculate the elements individually. In this study, the ANSYS CFX® R2* 2022 *software was used, capable of presenting several fluid analysis parameters such as temperature, pressure, and air flow velocity. According to the Computational Fluid Dynamics simulation, the calculated COP for the vortex tube prototype at* 3.5 *bar pressure during a* 1500*-second simulation duration resulted in a COP value of* 0.000016*. The alternative design's maximum COP value was* 0.000120*, while the smallest COP value produced was* 0.000067*. Additionally, simulations involving the addition of an exhaust pipe at the hot outlet in Zone 1 experienced a temperature reduction of* 4.97 *^{o}C, Zone* 2 *reduced by 4.86 ^{o}C, and Zone* 3 *by* 4.86 *^{o}C. It can be concluded that the higher the incoming air pressure into the tube, the greater the Coefficient Of Performance (COP). Furthermore, the simulation results in the accommodation area of the* 2000 *GT Ro-Ro Ferry show that the cold temperature generated by the alternative design of the vortex tube can reduce the heat load in the room.*

Keywords: Vortex Tube, CFD, COP, Temperature

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI i
PERNYATAAN KEASLIAN ii
ABSTRAK iii
ABSTRACT iv
DAFTAR ISI v
DAFTAR GAMBAR vii
DAFTAR TABEL ix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL x
DAFTAR LAMPIRAN xi
KATA PENGANTAR xii
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan 4
1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan 4
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan 4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Pengkondisian Udara 5
2.2 Beban Panas Ruangan 5
2.2.1 Beban Panas Transmisi 6
2.2.2 Beban Panas Radiasi Matahari 6
2.2.3 Beban Panas Penghuni Ruangan 7
2.2.4 Beban Panas Lampu dan Peralatan Lain 7
2.3 Tabung Vorteks 8
2.4 Aliran Vorteks 9
2.6 Jenis Tabung Vorteks 10
2.7 Prinsip Kerja Tabung Vorteks 11
2.8 Perpindahan Energi pada Tabung Vorteks 14
2.9 Persamaan Hukum Termodinamika Tabung Vorteks 15
2.9.1 Hukum Konservasi Massa 15
2.9.2 Suhu Udara 15
2.9.3 Fraksi Massa Udara Dingin 16
2.9.4 *COP* Tabung Vorteks 16
2.10 *Computational Fluid Dynamics (CFD)* 16
2.10.1 *Pre processing (Ansys Build)* 18
2.10.2 *Solver* 24
2.10.3 *Post Processor* 26
2.10.4 Proses Validasi 27
BAB 3 METODE PENELITIAN/PERANCANGAN 30
3.1 Lokasi Penelitian 30
3.2 Prosedur Penelitian 30
3.2.1 Studi Literatur 30
3.2.2 Perumusan Masalah 30
3.2.3 Pengumpulan Data 31
3.2.4 Perhitungan Beban Panas Ruangan 34

3.2.5 Pemodelan Objek 35
3.2.6 Simulasi *Computational Fluid Dynamics* 37
3.2.7 Analisis Perhitungan *Coefficient of Performance (COP)* 56
3.2.8 Analisis Simulasi Penerapan Tabung Vorteks Pada Ruang 56
3.2.9 Kesimpulan 57
3.2.10 Diagram Alur 57
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 59
4.1 Gambaran Umum Penelitian 59
4.2 Perhitungan *COP* Tabung Vorteks Berdasarkan Simulasi *CFD* 59
4.3 Perbandingan Efektivitas Tabung Vorteks 61
4.4 Simulasi Penerapan Tabung Vorteks pada Ruang Akomodasi 62
4.5 Penambahan Pipa Buang Pada Outlet Panas Tabung Vorteks 66
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN 68
5.1 Kesimpulan 68
5.2 Saran 69
DAFTAR PUSTAKA 70
LAMPIRAN 72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 01 Skema Tabung Vorteks 8
Gambar 02 Aliran Dalam Tabung Vorteks 9
Gambar 03 Aliran Vorteks 10
Gambar 04 Tabung Vorteks Tipe *Counter Flow* 10
Gambar 05 Tabung Vorteks Tipe *Uni Flow* 11
Gambar 06 Prinsip Kerja Tabung Vorteks 12
Gambar 07 Skematik Diagram dari Flux Energi pada Tabung Vorteks 14
Gambar 08 Logo *Ansys* CFX® 18
Gambar 09 *Preview Ansys* CFX® 18
Gambar 10 *Preview post processing Ansys* CFX® 18
Gambar 11 Bentuk Sel Dua Dimensi 19
Gambar 12 Bentuk Sel Tiga Dimensi 19
Gambar 13 *Structured mesh* 20
Gambar 14 *Unsructured mesh* 20
Gambar 15 Konvergensi dan Proses Literasi *Error* 28
Gambar 16 Konvergensi dan Proses Literasi yang Terlalu Cepat 28
Gambar 17 Konvergensi yang Normal 28
Gambar 18 Lokasi Penelitian 30
Gambar 19 Sistem Instalasi Tabung Vorteks 32
Gambar 20 Rencana Umum Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT* 33
Gambar 21 Geladak Akomodasi 02 Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT* 34
Gambar 22 Model Tabung Vorteks Prototipe 36
Gambar 23 Model Tabung Vorteks Desain Alternatif 36
Gambar 24 Model Ruang Akomodasi 02 Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT* 37
Gambar 25 Tahap Simulasi pada *Software Ansys CFX* R2 2022 37
Gambar 26 Tahap *Geometry* pada *Software Ansys CFX* R2 2022 38
Gambar 27 *Named Selection* Tabung Vorteks Prototipe 39
Gambar 28 *Named Selection* Tabung Vorteks Desain Alternatif 39
Gambar 29 Metode Pembacaan *Meshing* Tabung Vorteks Prototipe 40
Gambar 30 Metode Pembacaan Meshing Tabung Vorteks Desain Alternatif 41
Gambar 31 Hasil *Mesh* Pada Tabung Vorteks Prototipe 41
Gambar 32 Hasil *Mesh* Pada Tabung Vorteks Desain Alternatif 42
Gambar 33 *Setup* Tabung Vorteks Prototipe 45
Gambar 34 *Setup* Tabung Vorteks Desain Alternatif 45
Gambar 35 Tampilan *CFX Solver* Tabung Vorteks Prototipe 47
Gambar 36 Tampilan CFX Solver Tabung Vorteks Desain Alternatif 47
Gambar 37 *Named Selection* Zona 1 Ruang Akomodasi 02 48
Gambar 38 Hasil *Mesh* Zona 1 Koridor Ruang Akomodasi 02 49
Gambar 39 *Boundary Condition* Zona 1 Ruang Akomodasi 02 54
Gambar 40 Tampilan *CFX Solver* Zona 1 Ruang Akomodasi 02 56
Gambar 41 Grafik Hubungan Tekanan dengan *COP* Tabung Desain Alternatif .. 61
Gambar 42 Grafik Hubungan Tekanan dengan Suhu Tabung Vorteks 62
Gambar 43 *Contour Plane* Temperatur Zona 1 Pada Simulasi 1500 Detik 63
Gambar 44 *Contour Plane* Temperatur Zona 2 Pada Simulasi 1500 Detik 64
Gambar 45 *Contour Plane* Temperatur Zona 3 Pada Simulasi 1500 Detik 64

Gambar 46 Grafik Perubahan Suhu Ruang Akomodasi 02 Terhadap Waktu..... 65
Gambar 47 Grafik Suhu Terhadap Waktu dengan Penambahan Pipa Buang..... 66

DAFTAR TABEL

Tabel 01 Aktivitas Tubuh dan Emisi Panas 7
Tabel 02 Panas dari Lampu..... 8
Tabel 03 Spesifikasi Tabung Vorteks 31
Tabel 04 Spesifikasi *Air Receiver* 32
Tabel 05 Spesifikasi Kompressor..... 32
Tabel 06 Data Utama Kapal..... 33
Tabel 07 Perhitungan Beban Panas Transmisi..... 34
Tabel 08 Peralatan Beban Panas Akibat Radiasi Matahari..... 35
Tabel 09 Perhitungan Beban Panas Akibat Lampu Penerangan..... 35
Tabel 10 Perhitungan Beban Penghuni Ruangan..... 35
Tabel 11 Pengaturan Metode Pembacaan Meshing Tabung Vorteks 40
Tabel 12 Statistik *Meshing* Tabung Vorteks..... 42
Tabel 13 Pengaturan Tipe *Transient* Tabung Vorteks 43
Tabel 14 Perhitungan *Domain Fluid* Tabung Vorteks..... 43
Tabel 15 Pengaturan *Domain Solid* Tabung Vorteks..... 44
Tabel 16 Pengaturan *Global Initialization* Tabung Vorteks..... 46
Tabel 17 Statistik *Meshing* Ruang Akomodasi 02..... 50
Tabel 18 Perhitungan Tipe *Transient* Ruangan Akomodasi 02..... 51
Tabel 19 Perhitungan *Domain Fluid* Zona 1 Ruangan Akomodasi 02..... 51
Tabel 20 Pengaturan *Domain Solid* Tabung Vorteks, *Human Body*, dan *Lamp*... 51
Tabel 21 Pengaturan *Global Initialization* Tabung Ruangan Simulasi 55
Tabel 22 *COP* Tabung Vorteks Desain Alternatif Berbagai Variasi Tekanan 60

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
ωc	Kecepatan Sudut Udara Dingin
ωh	Kecepatan Sudut Udara Panas
EM	Energi Mekanik
ED	Energi Difusi
$\dot{m}i$	Laju Aliran Massa Udara Masuk
$\dot{m}c$	Laju Aliran Massa Udara Dingin
$\dot{m}h$	Laju Aliran Massa Udara Panas
T_i	Suhu Udara Masuk
T_c	Suhu Udara Dingin
Th	Suhu Udara Panas
μc	Fraksi Massa Udara Dingin
Pi	Tekanan Inlet
P_c	Tekanan Outlet Dingin
cp	Kapasitas Panas Spesifik Udara
ΔTc	Perbedaan Suhu Udara Dingin
COP	*Coefficient Of Performance*
CFD	*Computational Fluid Dynamics*
W	Kerja
R	Konstanta Gas
γ	Rasio Panas Spesifik

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 01 Lembar Pengesahan Skripsi..... 72
Lampiran 02 Dimensi Ukuran Tabung Vorteks Prototipe..... 73
Lampiran 03 Dimensi Ukuran Tabung Vorteks Desain Alternatif..... 74
Lampiran 04 Rencana Umum Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT*..... 75
Lampiran 05 Geladak Akomodasi 02 Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT*..... 76
Lampiran 06 Tahap *Geometry* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 2,5 Bar..... 78
Lampiran 07 Tahap *Meshing* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 2,5 Bar..... 79
Lampiran 08 Tahap *Setup* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 2,5 Bar..... 80
Lampiran 09 Tahap *Solution* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 2,5 Bar..... 81
Lampiran 10 Tahap *Result* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 2,5 Bar..... 85
Lampiran 11 Tahap *Geometry* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 3 Bar..... 87
Lampiran 12 Tahap *Meshing* Tabung Vorteks Desain Variasi Pin = 3 Bar..... 88
Lampiran 13 Tahap *Setup* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 3 Bar..... 89
Lampiran 14 Tahap *Solution* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 3 Bar..... 90
Lampiran 15 Tahap *Result* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 3 Bar..... 94
Lampiran 16 Tahap *Geometry* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 3,5 Bar..... 96
Lampiran 17 Tahap *Meshing* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 3,5 Bar..... 97
Lampiran 18 Tahap *Setup* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 3,5 Bar..... 98
Lampiran 19 Tahap *Solution* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 3,5 Bar..... 99
Lampiran 20 Tahap *Result* Tabung Vorteks Desain Variasi P_{in} = 3,5 Bar..... 103
Lampiran 21 Tahap Simulasi *CFD* Zona 1..... 105
Lampiran 22 Tahap Simulasi *CFD* Zona 2..... 107
Lampiran 23 Tahap Simulasi *CFD* Zona 3..... 109
Lampiran 24 Tabel Perubahan Suhu Terhadap Waktu Pada Zona 1..... 111
Lampiran 25 Tabel Perubahan Suhu Terhadap Waktu Pada Zona 2..... 114
Lampiran 26 Tabel Perubahan Suhu Terhadap Waktu Pada Zona 3..... 117
Lampiran 27 *Result* Penambahan Pipa Buang Pada Zona 1..... 120
Lampiran 28 *Result* Penambahan Pipa Buang Pada Zona 2..... 121
Lampiran 29 *Result* Penambahan Pipa Buang Pada Zona 3..... 122
Lampiran 30 Tabel Suhu Terhadap Waktu dengan Penambahan Pipa Buang 1 123
Lampiran 31 Tabel Suhu Terhadap Waktu dengan Penambahan Pipa Buang 2. 126
Lampiran 32 Tabel Suhu Terhadap Waktu dengan Penambahan Pipa Buang 2. 129
Lampiran 33 Sistem Instalasi Tabung Vorteks dengan Penambahan Pipa..... 132

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh. Alhamdulillah, puji syukur kehadirat Allah SWT. atas kehendaknya skripsi ini dapat terselesaikan. Serta senantiasa tercurahkan salam dan *shalawat* kepada Nabi Muhammad SAW. Dalam penyusunan skripsi, tidak sedikit kendala yang menghadang penulis dalam menyelesaikannya. Berkat kemauan dan usaha penulis juga sehingga tersusun salah satu karya dari mata kuliah skripsi di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Skripsi ini merupakan persyaratan untuk menyelesaikan studi dan menempuh gelar Sarjana Teknik (S.T.) di Universitas Hasanuddin. Penulis mengakui skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, dikarenakan keterbatasan pengetahuan dan kemampuan penulis sebagai manusia biasa. Untuk itu penulis memohon maaf atas semua kekurangan dan kesalahan yang terjadi di dalam penyusunan skripsi yang berjudul "Potensi Penggunaan Tabung Vorteks Untuk Pengkondisian Udara Pada Ruang Akomodasi Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT* Menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*". Penulis juga berharap masukan dan saran agar kedepannya skripsi ini dapat disempurnakan menjadi lebih baik lagi.

Dalam penyusunan skripsi ini, banyak pihak-pihak yang telah membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung, secara morel maupun materiel. Oleh sebab itu penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada;

1. Bapak Ir. Hajeri dan Ibu Erliana, S.Hut. selaku orang tua penulis yang senantiasa mendoakan, menasihati, dan memberikan dukungan sehingga penulis bisa menjalankan studi dengan lancar;
2. Bapak Dr. Eng. Faisal Mahmuddin, S.T., M. Inf. Tech., M.Eng. selaku Ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin;
3. Bapak Andi Husni Sitepu, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing satu yang senantiasa meluangkan waktunya untuk membantu penulis dengan memberikan bimbingan, kritik maupun saran dalam penyusunan dan penulisan skripsi;

4. Bapak Muhammad Iqbal Nikmatullah, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing dua sekaligus penasihat akademik yang senantiasa meluangkan waktunya dan selalu sabar membantu penulis dengan memberikan bimbingan, kritik maupun saran terkait *software* yang digunakan pada penelitian ini;
5. Bapak M. Rusydi Alwi, S.T., M.T. dan Bapak Surya Hariyanto, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang memberikan masukan dan saran yang membangun saat seminar;
6. Seluruh dosen pengajar Departemen Teknik Sistem Perkapalan yang telah memberikan bekal dan pengetahuan kepada penulis selama masa perkuliahan;
7. Staf Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah membantu segala administrasi penulis selama ini;
8. Kanda-kanda senior yang telah memberikan arahan dan dedikasi kepada penulis.
9. Teman-teman KORTNOZZLE yang telah membersamai penulis dalam setiap momen suka maupun duka selama masa perkuliahan.
10. Teman-teman Labo Permesinan Kapal Departemen Teknik Sistem Perkapalan Universitas Hasanuddin yang senantiasa memberi *support* dan mengingatkan penulis untuk mengerjakan skripsi.
11. Teman-teman KKN Tematik 108 PUPR GOWA 2022 Posko 20 Desa Panakkukang yang telah memberikan kisah dan pengalaman menarik serta dukungan dalam setiap proses yang dilewati penulis.
12. Kru “Labo Penikmat Alam” yang senantiasa mengajak penulis untuk mencari ketenangan jiwa saat jenuh mengerjakan skripsi melalui kegiatan pendakian dan jalan-jalan.
13. Muhammad Alkhan Dwiki Abadi selaku adik penulis yang setiap saat membantu penulis dalam menyusun skripsi;
14. Nurhalim Dwi Putra, Muhammad Farhan, Rachmat Zakaria Ilyas, Fachrial Novri Triyandi dan Rafayzah Al Rayhan yang menjadi rekan lomba KKCTBN dan membersamai dalam kerja praktik;

15. Dinda-dinda yang turut membantu dan memberikan dukungan kepada penulis selama kuliah.
16. Seorang yang saat lima waktu kuhubungi melalui “pesan suara”, semoga atas kehendak-Nya dapat tersampaikan.

Skripsi yang telah disusun ini mudah-mudahan dapat memberi kemudahan bagi penulis dalam mendapatkan gelar sarjana dan penelitian ini dapat digunakan sebagaimana mestinya sehingga menjadi referensi serupa di masa yang akan datang. Segala kekurangan dalam penelitian ini semoga dapat menjadi pembelajaran kedepannya.

Gowa, 17 Oktober 2023

Penulis

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini pengkondisian udara merupakan kebutuhan mutlak bagi manusia untuk mencapai suhu lingkungan yang nyaman dan meningkatkan produktivitas. Hal ini dapat diketahui dalam berbagai aplikasi sistem pendingin udara di industri, konstruksi perumahan, kantor dan sekolah. Pengkondisian udara (*air conditioning*) adalah proses pengaturan suhu, kelembapan dan pendistribusian udara untuk menciptakan kondisi kenyamanan yang tentunya dibutuhkan oleh seluruh penghuni (Asroni, dkk, 2015). Dari sini dapat kita lihat bahwa pengkondisian udara adalah suatu usaha untuk mengendalikan secara serentak semua faktor yang mempengaruhi kondisi fisik dan kimiawi udara pada suatu bangunan tertentu. Lebih lanjut, pengkondisian udara juga dapat diartikan sebagai proses pendinginan udara untuk mencapai suhu dan kelembapan yang ideal. Sebagian besar faktor ini dapat mempengaruhi kesehatan fisik dan kesejahteraan manusia.

Sistem pengkondisian udara dioperasikan dengan berbagai pertimbangan antara lain: jumlah orang di kapal, panas yang dipancarkan oleh banyak peralatan lain di kapal, aksesibilitas untuk pemeliharaan dan perbaikan. Saat merencanakan sistem pendingin di atas kapal, aturan yang berlaku harus diikuti, misalnya *International Organization for Standardization (ISO)* 7547 terkait dengan "*Ships and Marine Technology Air Conditioning And Ventilation Of Accomodation Spacedesign Conditioning And Basic Of Calculation*". Perancangan sistem pemanas sentral, ventilasi, dan pendingin udara yang digunakan harus dapat memenuhi permintaan dalam segala kondisi, karena kegagalan salah satu sistem di atas kapal akan mempengaruhi pengoperasian sistem lainnya. Selain itu, sistem saluran (*ducting network*) sebagai saluran yang menghubungkan *AC* sentral dengan ruangan kapal yang berbeda juga harus memperhatikan aksesibilitas dan desain juga harus memastikan aliran udara ke ruangan-ruangan (Hasan, 2018).

Pendingin ruangan merupakan salah satu sistem yang bekerja di kapal dan dioperasikan untuk kenyamanan dan kesehatan kru kapal. Sistem pengkondisian udara kapal umumnya menggunakan sistem pendingin ruangan sentral atau *split*

yang biasanya menggunakan sistem kompresi uap. Sistem ini membutuhkan banyak komponen dan refrigeran. Kelemahan sistem tersebut adalah tidak ramah lingkungan karena sering terjadi kebocoran refrigeran pada sistem yang dapat merusak lingkungan sekitar. Percepatan fase keluar refrigeran halokarbon yang sering digunakan dalam sistem kompresi uap dapat menimbulkan efek rumah kaca (Ananthanarayanan, 2013).

Salah satu alternatif untuk pendinginan ruangan yang ramah lingkungan dan hemat biaya adalah tabung vorteks. Tabung vorteks merupakan perangkat mekanis yang memungkinkan aliran udara terkompresi yang memasuki tabung vorteks dipisahkan secara tangensial menjadi aliran udara dingin dan panas tanpa reaksi kimia atau input energi dari luar (Eiamsa-Ard, 2008). Tabung vorteks sudah digunakan dalam dunia industri sebagai proses pendingin dan pemanas karena bentuknya yang praktis, ringkas, ringan serta alat yang tidak berisik (Bruno, 1992). Udara bertemperatur rendah yang dihasilkan oleh tabung vorteks banyak digunakan dalam dunia industri, seperti pada industri logam, efek tabung vorteks digunakan untuk mendinginkan *coolant* pada alat-alat produksi seperti bubut, freis dan lain sebagainya. Kemudian pada industri pengecoran logam, efek tabung vorteks juga dimanfaatkan sebagai penyuplai udara dingin pada baju khusus yang digunakan di area-area panas seperti pada seragam astronot.

Keunggulan tabung vorteks sebagai alternatif untuk peralatan pendingin di kapal yang dapat diterapkan pada ruang akomodasi. Tabung Vorteks dianggap cocok untuk lingkungan karena tabung ini memiliki beberapa keunggulan seperti tidak ada masalah kebocoran karena alat tersebut hanya menggunakan udara sebagai refrigeran tidak menyebabkan percikan api atau ledakan, mudah dibuat, tidak memiliki bagian yang bergerak, ringan, tidak memakan banyak ruang dan memiliki biaya pengoperasian yang rendah di area di mana udara bertekanan tersedia. (Jejurkar, 2015). Penelitian mengenai tabung vorteks saat ini terbatas pada mengubah dimensi tabung, membuka katup kontrol dan menganalisis pengaruh tekanan udara yang masuk ke dalam tabung untuk mengetahui pengaruh temperatur udara keluar tabung dan kinerja tabung vorteks (Darmawan, 2013, Wibowo, 2013, Nusantara, 2014, & Finisari, 2014).

Penelitian ini dilakukan pada ruang akomodasi kapal Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT* Lintas Lamongan-Bahaur. Ruang akomodasi merupakan tempat tinggal kru kapal dan termasuk area umum bagi penumpang kapal untuk berinteraksi, dan tempat penghubung antara ruang mesin dan anjungan. Ruang akomodasi juga berfungsi sebagai ruang hidup awak kapal di atas kapal. Konvensi Perburuhan Maritim (*MLC* 2006-2007) mengharuskan perusahaan pelayaran untuk menyediakan fasilitas akomodasi yang memadai bagi kru dan penumpang beserta fasilitas rekreasi yang tepat. Dalam hal ini, akomodasi memiliki ketentuan yang tepat untuk keselamatan, akomodasi kesehatan, dan kecelakaan awak kapal. Di dalam akomodasi terdapat ruang tidur, ruang makan, ruang sanitasi, klinik, musholla, dapur, gudang makanan. Tata letak akomodasi perlu diperhatikan dengan menggunakan teori-teori perencanaan tata letak sirkulasi pada ruang akomodasi untuk meningkatkan kenyamanan kru dan penumpang kapal.

Adapun metode analisis yang digunakan dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamics* atau lebih terkenal dengan singkatan *CFD* merupakan teknologi simulasi aliran fluida menggunakan komputer yang sudah cukup lama ada dan secara luas digunakan dalam dunia *engineering*. *CFD* memungkinkan saintis dan *engineering* untuk memodelkan dan memprediksi performa aliran, kecepatan, dan temperatur dari berbagai macam aplikasi dan kebutuhan selama beberapa dekade.

Berdasarkan dengan narasi yang dipaparkan diatas, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis potensi penggunaan tabung vorteks pada ruang akomodasi Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT* Lintas Lamongan-Bahaur menggunakan *software Computational Fluid Dynamics (CFD)*.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas, diperoleh rumusan masalah sebagai berikut;

a) Berapa *Coefficient of Performance (COP)* yang dihasilkan dari simulasi *CFD* tabung vorteks?
b) Berapa temperatur yang dihasilkan dari simulasi *CFD* tabung vorteks sebagai alat pengkondisian udara pada ruang akomodasi Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT* Lintas Lamongan-Bahaur?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Adapun beberapa tujuan dari penelitian ini sebagai berikut;

a) Mengetahui *Coefficient of Performance (COP)* dari simulasi *CFD* penggunaan tabung vorteks sebagai alat pengkondisian udara.
b) Mengetahui temperatur yang dihasilkan dari simulasi *CFD* tabung vorteks pada ruang akomodasi Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT* Lintas Lamongan-Bahaur.

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

Adapun beberapa manfaat dari penelitian ini yaitu;

a) Merekomendasikan alat alternatif lain dalam pengkondisian udara pada ruang akomodasi Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 GT Lintas Lamongan-Bahaur.
b) Sebagai media pembelajaran dalam bidang pengkondisian udara.
c) Menambah wawasan tentang tabung vorteks untuk menyuplai udara ruang akomodasi Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 GT Lintas Lamongan-Bahaur.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan

Agar pembahasan dalam skripsi ini tidak meluas, maka perlu diberi ruang lingkup sebagai batasan pada penelitian ini, sebagai berikut;

a) Tabung vorteks yang disimulasikan merupakan tabung vorteks tipe *counter flow* dengan kondisi katup 0 putaran.
b) Menggunakan model tabung vorteks prototipe dan desain alternatif penelitian sebelumnya.
c) Temperatur udara luar 35 °C pada ruang akomodasi berdasarkan *rules International Organization for Standardization* 7547:2002.
d) Temperatur suplai udara dingin pada rentang 16°C – 27 °C berdasarkan *rules International Organization for Standardization* 7547:2002.
e) Mengabaikan ruangan-ruangan yang telah terpasang alat pendingin (*Air Conditioner*).
f) Simulasi tabung vorteks berada pada ruang akomodasi 02 Kapal *Ferry Ro-Ro* 2000 *GT* Lintas Lamongan–Bahaur.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengkondisian Udara

Pengkondisian udara adalah suatu proses perlakuan terhadap udara untuk mengatur temperatur, kelembaban, kebersihan, dan pendistribusiannya secara serentak guna mencapai kondisi nyaman yang dibutuhkan oleh penghuni yang berada didalamnya. Di masyarakat, alat pengkondisian udara ini biasa dikenal dengan sebutan *Air Conditioner (AC)*. Sistem pendingin memegang peranan penting dalam kehidupan manusia, salah satu penggunaannya diatas kapal.

Sistem pengkondisan udara pada kapal merupakan kebutuhan yang sangat penting terutama di negara – negara yang mempunyai iklim tropis seperti Indonesia. Pendingin ruangan sekarang ini sudah umum dipakai di Indonesia, terutama di kapal–kapal di daerah yang termasuk berudara panas. Udara sejuk bukan saja nyaman tetapi juga mempengaruhi manusia baik psikis maupun fisik.

Selain itu bagi para penumpang dan awak kapal perlu dipikirkan tingkat kenyamanan sehingga dalam perencaan pengkondisian udara harus dipertimbangkan terhadap kondisi para penumpang dan awak kapal, perbedaan temperatur luar ruangan dan dalam ruangan lebih dari yang telah disesuaikan atau ditetapkan bagi para penumpang dan awak kapal.

Oleh karena itu, tubuh manusia akan bereaksi dengan cepat apabila dengan tiba-tiba dikenai perubahan kondisi udara, maka perbedaan antara temperatur udara luar dan temperatur ruangan yang di dinginkan sebaik mungkin sesuaikan agar diperoleh udara yang sejuk pada bagian dalam ruangan tersebut (Umarella, 2020).

2.2 Beban Panas Ruangan

Kebutuhan kapasitas pendinginan suatu ruangan didapat dengan mengetahui beban panas yang ada di dalam ruangan tersebut. Beban panas ruangan adalah panas yang diderita atau dihasilkan oleh ruang tersebut, panas yang dihasilkan bisa bersumber dari aktivitas manusia di dalam ruangan, panas dari luar ruangan dan panas dari peralatan elektronik di dalam ruangan. Perhitungan beban panas ruangan

berdasarkan *ISO* 7547:2002 dimana diasumsikan suhu udara luar 35°C dan suhu di dalam ruangan 27°C. Sumber beban panas pada suatu ruangan berasal dari;

1. Beban panas transmisi (ϕ)
2. Beban panas radiasi matahari (ϕ_S)
3. Beban panas penghuni ruangan (ϕ_P)
4. Beban panas lampu penerangan dan peralatan lainnya (ϕ_L)

Sehingga total beban panas yang ditanggung (ϕ_{Total})

$$\phi_{Total} = \phi + \phi_S + \phi_P + \phi_L \quad (1)$$

(Sumber: *International Organization for Standardization (ISO)* 7547:2002)

2.2.1 Beban Panas Transmisi

Beban transmisi adalah panas/kalor yang masuk kedalam ruang yang didinginkan melalui permukaan. Pada ruang akomodasi beban panas merambat melalui dinding dan jendela ruangan. Beban transmisi dipengaruhi oleh luasan permukaan dinding dan jendela serta perbedaan temperatur antara udara di dalam rungan dengan udara di luar ruangan. Beban transmisi dinyatakan sebagai berikut;

$$\phi = \Delta T[(k_v A_v) + (k_g A_g)] \quad (2)$$

(Sumber: *International Organization for Standardization (ISO)* 7547:2002)

Dimana;

ΔT= Perbedaan temperatur antara udara dalam ruang yang dikondisikan terhadap temperatur luar (K)

k_v = Total koefisien perpindahan panas untuk permukaan dinding (W/m^{2}K)

A_v = Luasan permukaan dinding (m^2)

k_g = Total koefisien perpindahan panas untuk permukaan sisi jendela (W/m^{2}K)

A_g = Luasan permukaan sisi jendela (m^2)

2.2.2 Beban Panas Radiasi Matahari

Radiasi merupakan perpindahan panas melalui pancaran panas. Pada perpindahan panas secara radiasi, proses perpindahan energi terjadi karena pelompatan foton dari suatu permukaan ke permukaan lain. Panas akibat pancaran matahari dipengaruhi oleh luasan dinding dan luasan jendela serta jenis kaca yang digunakan. Beban panas akibat radiasi matahari dinyatakan sebagai berikut;

$$Q = \sum A_v k\, \Delta T_r + \sum A_g G_s \quad (3)$$

(Sumber: *International Organization for Standardization (ISO)* 7547:2002)

Dimana;

$\Delta T_r =$ Penambahan temperatur (diatas suhu luar ruangan +35°C) akibat radiasi matahari (K)

k = Total koefisien perpindahan panas untuk permukaan dinding (W/m^{2}K)

A_g = Luasan permukaan kaca yang terkena radiasi matahari (m^2)

G_s = Total Panas per meter persegi dari permukaan kaca sebagai berikut (W/m^{2}K)

Gs = 350 W/m2 untuk permukaan kaca bening,

Gs = 240 W/m2 untuk permukaan kaca bening dengan naungan interior.

$A_v =$ Luasan permukaan dinding yang terkena radiasi matahari (m^2) (jendela tidak termasuk.

2.2.3 Beban Panas Penghuni Ruangan

Berdasarkan *ISO* 7547:2002 tentang desain kondisi dan perhitungan untuk sistem *HVAC* di kapal. Beban panas yang dihasilkan dari aktivitas tubuh dan emisi panas seperti pada tabel 1 Terdapat dua jenis aktivitas yaitu ketika orang tersebut istirahat atau tidak bekerja dan ketika orang melakukan pekerjaan sedang atau berat. Aktivitas tersebut menghasilkan dua jenis tipe panas yaitu panas sensibel dan panas laten. Penentuan jenis aktivitas berdasarkan posisi orang tersebut di dalam kapal apakah sebagai penumpang atau sebagai kru kapal.

Tabel 01 Aktivitas Tubuh dan Emisi Panas

Activity	***Type of Heat***	
	***Sensible Heat* (W)**	***Latent Heat* (W)**
Seat at Rest	70	50
Medium/Heavy Work	85	150

(Sumber: *International Organization for Standardization (ISO) 7547:2002*)

2.2.4 Beban Panas Lampu dan Peralatan Lain

Panas dari peralatan elektronik seperti radio, televisi, pemanas air dan sebagainya harus diabaikan. Pada siang hari panas dari lampu dalam satu ruangan yang terkena sinar matahari diabaikan, sedangkan pada ruangan yang tidak terkena sinar matahari beban panas harus dihitung. Panas yang didapat dari lampu dapat

menggunakan tabel 2, dimana terdapat beberapa jenis tempat seperti kabin, ruang makan dan *gym*. Terdapat dua jenis lampu yaitu *incandescent* dan *fluorescent*.

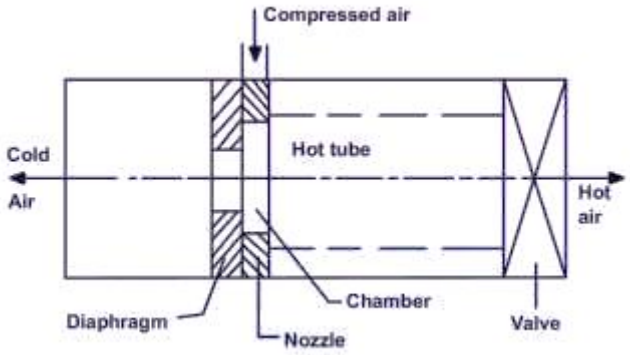
Tabel 02 Panas dari Lampu

Space	***Heat gain from general lighting***	
	***Incandescent* (W/m$^{2)}$**	***Fluorescent* (W/m$^{2)}$**
Cabins, etc.	15	8
Mess-or dining-rooms	20	10
Gymnasiums, etc	40	20

(Sumber: *International Organization for Standardization (ISO) 7547:2002*)

2.4 Tabung Vorteks

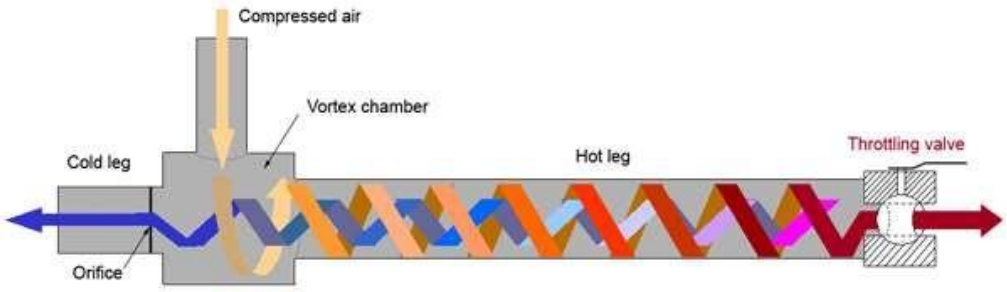
Tabung vorteks ditemukan oleh seorang bernama G.J Ranque pada tahun 1932. Dia mampu membuat dua aliran dengan suhu yang berbeda, menggunakan saluran masuk dengan pasokan tekanan yang sangat padat seperti ditunjukkan pada gambar 01. Pada tahun 1945, fisikawan Jerman Rudolf Hilsch memperbaiki desain tabung vorteks Ranque dan menerbitkan karyanya dalam sebuah karya ilmiah. Publikasi Hilsch ini banyak dibaca dan diterima dengan sangat baik oleh para ilmuwan dan komunitas karena fenomena pemisahan energi dalam tabung pusaran menjadi topik yang sangat menarik. Meskipun itu, Hilsch membuat tabung pusaran yang kurang dioptimalkan geometrinya, dia mampu mengukur suhu perbedaan antara aliran inlet dan aliran outlet. Alat ini kemudian diberi nama tabung vorteks Ranque Hilsch untuk menghargai pekerjaan yang dilakukan oleh G.J Ranque dan Hilsch.



Gambar 01 Skema Tabung Vorteks

Tabung vorteks berfungsi sebagai alat yang mampu memisahkan aliran udara terkompresi menjadi aliran panas dan dingin dengan fraksi massa yang berbeda.

Fenomena ini disebut sebagai pemisahan energi (suhu). Tabung vorteks terdiri dari satu atau lebih nosel inlet tangensial, tabung aksial dengan ruang pusaran, saluran keluar gas dingin dan saluran keluar gas panas (Eiamsa-Ard, 2008). Debu udara terkompresi bebas dehumidifikasi dalam kisaran 5 hingga 6 bar disuntikkan ke dalam *chamber* vorteks tangensial melalui saluran masuk nozel. Saat udara berakselerasi melalui inlet nozel, kemudian akan keluar ke bagian silinder dengan kecepatan sudut tinggi yang menghasilkan aliran berputar-putar secara intens. Udara hasil kemudian menuju outlet panas pada katup kontrol tekanan yang berbentuk kerucut. Namun, tidak semua aliran keluar melalui katup kontrol. Sebagian dari gas membalikkan arahnya dan bergerak secara aksial sepanjang pusat tabung menuju outlet dingin, melawan pusaran panas yang mengalir seperti pada gambar 02. Saat aliran terbalik bergerak menuju pintu keluar dingin, termal energi yang dimiliki oleh aliran inti ditransfer kedaerah pinggiran aliran. Ini menghasilkan periferal suhu aliran melebihi suhu gas masuk. Aliran perifer keluar melalui ruang antara dinding tabung dan katup berbentuk kerucut di outlet panas, sedangkan aliran inti keluar melalui lubang outlet dingin. Laju aliran relatif massa gas panas dan dingin dikendalikan oleh katup tekanan balik berbentuk kerucut di outlet panas. Fenomena pemisahan energi ini dikenal sebagai efek Ranque.

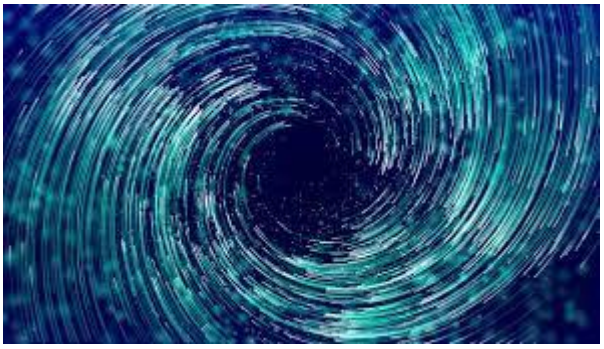


Gambar 02 Aliran dalam Tabung Vorteks

2.5 Aliran Vorteks

Vorteks adalah massa fluida yang partikel-partikelnya bergerak berputar dengan garis arus (*streamline*) membentuk lingkaran konsentris. Gerakan vorteks berputar disebabkan oleh adanya perbedaan kecepatan antar lapisan fluida yang berdekatan. Dapat diartikan juga sebagai gerak fluida yang diakibatkan oleh parameter kecepatan dan tekanan. Vorteks sebagai pusaran yang merupakan efek dari putaran rotasional dimana viskositas berpengaruh di dalamnya seperti yang

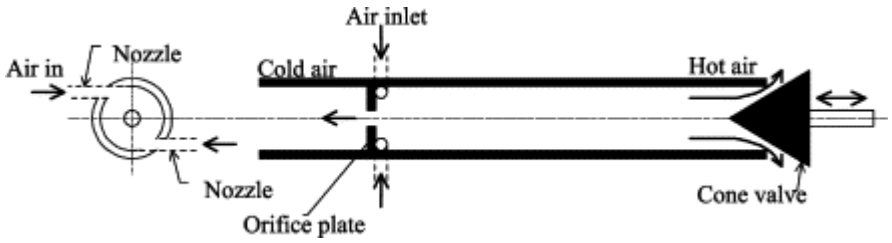
ditunjukkan pada gambar 03 yang berarti sebagai gerak alamiah fluida yang diakibatkan oleh parameter kecepatan dan tekanan. Selain faktor kecepatan dan tekanan, terdapat beberapa faktor lain yang menciptakan aliran vorteks yaitu viskositas dan adanya perubahan mendadak seperti belokan atau perubahan diameter pipa. Aliran vorteks cenderung dianggap sebagai suatu kerugian pada suatu aliran, namun belakangan aliran vorteks justru dikembangkan dalam dunia industri, baik fabrikasi, pertambangan, pengeboran minyak dalam proses pemisahan air dan minyak serta dalam industri-industri kimia.



Gambar 03 Aliran Vorteks

2.6 Jenis Tabung Vorteks

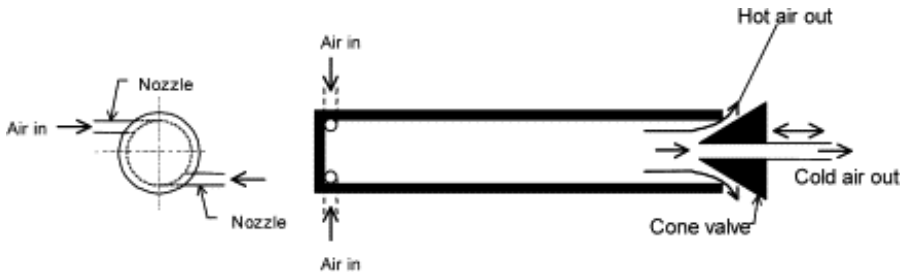
Ada dua jenis tabung vorteks yaitu tabung vorteks tipe *counter-flow* yang biasa disebut tipe standar dan tabung vorteks tipe *uni-flow* atau tipe paralel (Eiamsa-Ard, 2008).



Gambar 04 Tabung Vorteks Tipe *Counter-Flow*

Pada gambar 04 menunjukkan skema kerja dari tabung vorteks tipe *counter-flow*, sistem ini menempatkan *cold outlet* pada posisi berlawanan arah *dengan hot outlet*. Sistem ini lebih banyak digunakan karena dianggap lebih efisien dengan perbedaan suhu yang dihasilkan antara cold dan hot outlet cukup tinggi. Skema kerja tabung vorteks tipe *uni-flow* ditunjukkan pada gambar 05 Pada tipe ini

menempatkan cold air sejajar dengan hot outlet. Tipe ini tidak dapat menghasilkan kinerja yang optimal baik untuk udara dingin maupun udara panas.



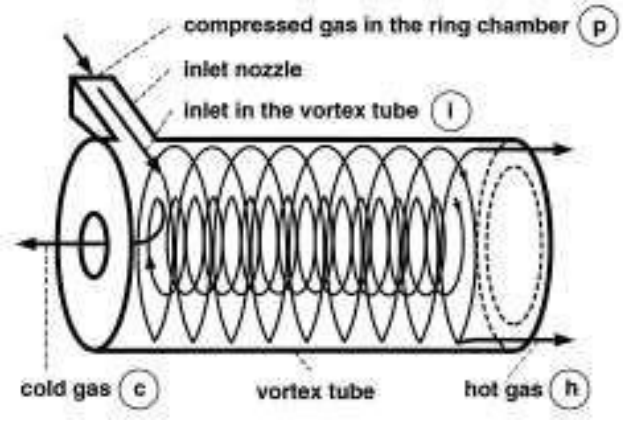
Gambar 05 Tabung Vorteks Tipe *Uni-Flow*

2.7 Prinsip Kerja Tabung Vorteks

Prinsip kerja tabung vorteks dijelaskan melalui gambar 6 yang menampilkan aliran vorteks yang berbentuk seperti arus heliks dari titik masuk menuju ke sisi dingin dan panas tabung vorteks (Putra, 2018). Secara rinci, proses yang terjadi di dalam tabung vorteks dijelaskan sebagai berikut;

1. Gas yang terkompresi dimasukkan ke dalam tabung vorteks secara tangensial. Dari titik P ke I, pada fase ini gas bertekanan akan mengembang dan dipercepat sehingga gas bergerak dengan kecepatan tinggi.
2. Gas yang dimasukkan ke dalam tabung secara tangensial mengakibatkan gas terpengaruh gaya sentrifugal. Gas yang masuk ke dalam tabung vorteks ditekan menuju dinding tabung dan membentuk sebuah pusaran yang disebut arus pusar bebas dimana arus ini menuju ke sisi panas tabung vorteks atau titik H.
3. Dari titik I ke H, terjadi gesekan antara gas dengan dinging tabung dan mengalami peningkatan suhu terutama gas yang berada di sekitar dinding tabung akibat gradien kecepatan yang tinggi. Hal ini menyebabkan gas yang keluar dari tabung vorteks di titik H menjadi panas.
4. Di titik H, sebagian gas yang tertahan oleh katup membentuk sebuah pusaran di sumbu tabung menuju titik C, pusaran ini dikenal sebagai arus pusar balik. Terjadi penurunan tekanan di sumbu tabung membuat gas mengembang dan dipercepat sehingga kecepatan sudut gas di sumbu tabung lebih cepat dari kecepatan sudut di sekitar dinding tabung. Karena

kecepatan sudut meningkat membuat energi kinetik di sumbu tabung meningkat dan mengalir ke arah dinding tabung dan terbawa arus pusar bebas ke titik H. Hal ini menyebabkan udara yang keluar di titik C memiliki suhu lebih rendah.



Gambar 06 Prinsip Kerja Tabung Vorteks

Terdapat tiga teori yang menjelaskan fenomena transfer energi dari aliran udara dingin ke aliran udara panas (Cang, 2013). Berikut ketiga teori tersebut;

1. *Vortex momentum transfer theory*

   Teori ini dikemukakan oleh Fulton, Van Deemter, Webster dan Lay. Mereka menjelaskan bahwa perpindahan energi kinetik dari arus pusar balik pada sumbu tabung menuju ke arus pusar bebas pada sisi tabung menyebabkan pemisahan temperatur di dalam tabung. Perpindahan energi kinetik ini disebabkan karena fluida memiliki kekentalan sehingga ketika udara pusar paksa di sumbu tabung bersingungan dengan udara pusar bebas di sisi tabung dengan kecepatan putar yang tinggi terjadi gesekan antar dua fluida.

2. *Theory of expansion work*

   Teori ini dikemukakan oleh Deissler dan Perlmutter berdasarkan analisis persamaan energi tiga dimensi. Faktor kunci pemisahan energi tabung vorteks adalah kompresibilitas fluida: sebuah fluida yang terkompresi harus melebar untuk mendinginkan fluida. Kekuatan geser turbulensi antara pusaran paksa di bagian tengah tabung dan pusaran bebas di lapisan luar menjadi penyebab pemisahan suhu. Kekuatan geser

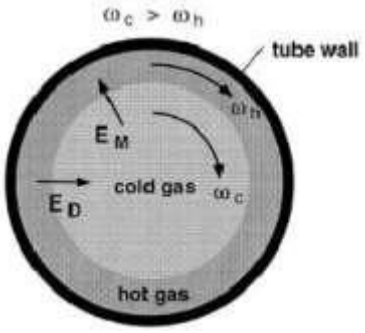
turbulensi dapat dibagi menjadi istilah difusi, istilah energi kinetik dan istilah tekanan. Pada lapisan pusaran bebas, suhu total naik karena adanya difusi. Namun, di zona pusaran pusat yang dipaksakan, suhu total turun karena energi kinetik dan tekanan.

3. *Theory of acoustic streaming*

Kurosaka mengajukan sebuah teori bahwa gerakan akustik yang disebabkan oleh gangguan teratur di tabung vorteks adalah sebab terjadinya efek pemisahan energi. Prinsip didasarkan pada penyebaran sinyal dan gema yang dipantulkan dari antarmuka yang dibentuk oleh berbagai jaringan dengan impedansi akustik yang berbeda; semakin besar perbedaan impedansi akustik, semakin kuat sinyalnya; dengan demikian, gambar menjadi lebih jelas Setelah aliran udara berkecepatan tinggi memasuki tabung vorteks, *helix travelling wave* terbentuk di dalam tabung, yang menstimulasi gelombang Stokes di dekat dinding tabung, maka gelombang Stokes merangsang gelombang akustik, dan akhirnya menyebabkan resonansi gelombang akustik, membuat pusaran Ranque dengan kecil. Inti vorteks menjadi tipe solid yang berputar dari pusaran paksa yang terisi tabung (kecuali lapisan batas), yang menyebabkan pemisahan suhu. Dia menyebutkan bahwa jika seseorang memasang *muffler* di tabung vorteks dengan struktur hilir, atur gelombang tangensial dasar ke frekuensi diskrit, dengan amplitudo yang lebih kecil, maka efek pemisahan suhu akan melemah. Eckert juga menerbitkan makalah pada tahun 1986, mempertimbangkan efek gabungan dari tekanan dan gelombang. Menurut kebisingan yang dihasilkan oleh tabung vorteks, yang dikenal sebagai "*vorteks howling*", ia percaya bahwa aliran udara di tabung berosilasi di alam. Jadi, ketika intensitas suara meningkat, efek pemisahan energi ditingkatkan. Dia menyebutkan bahwa efek pemisahan energi dihasilkan oleh tekanan pada garis aliran seperti gelombang yang berdenyut, sementara viskositas memainkan peran pendukung.

2.8 Perpindahan Energi pada Tabung Vorteks

Proses perpindahan energi yang terjadi di dalam tabung vorteks dijelaskan seperti gambar 07 Terdapat dua energi yang berpindah di dalam tabung vorteks. Energi pertama adalah energi mekanik yang dihasilkan akibat adanya rotasi. Energi mekanik di sumbu tabung lebih besar dibanding energi mekanik di dekat dinding tabung sehingga energi mekanik di sumbu tabung mengalir ke arah dinding tabung. Energi kedua adalah energi difusi yang muncul akibat tingginya konsentrasi energi di sekitar dinding tabung karena terus menerus menghasilkan energi dari efek rotasi arus pusar bebas dan mendapat energi mekanik dari sumbu tabung, adanya perbedaan konsentrasi energi di sumbu tabung dan dinding tabung membuat sebagian energi di dinding tabung yang berkonsentrasi tinggi menuju ke sumbu tabung yang berkonsentrasi rendah.



Gambar 07 Skematik Diagram dari Flux Energi pada Tabung Vorteks

Keterangan ;

ωc = Kecepatan Sudut Udara Dingin

ωh = Kecepatan Sudut Udara Panas

EM = Energi Mekanik

ED = Energi Difusi

Proses perpindahan energi mekanik di dalam tabung vorteks terjadi akibat adanya penurunan tekanan di dalam tabung, yang membuat gas yang mengalir di sumbu tabung terus mengembang dan dipercepat. Hal ini menyebabkan kecepatan sudut aliran vorteks meningkat, akan tetapi aliran vorteks yang berada di dekat dinding tabung mengalami perlambatan akibat gesekan dengan dinding tabung, sehingga menyebabkan kecepatan sudut aliran di tengah tabung (ωc) lebih cepat

daripada kecepatan sudut aliran di dekat dinding tabung (ωh). Berdasarkan keterangan sebelumnya kecepatan sudut di sumbu tabung lebih besar dari kecepatan sudut di dekat dinding tabung, sehingga aliran vorteks di sumbu tabung menghasilkan energi mekanik yang lebih besar daripada aliran di dekat dinding tabung. Hal ini kemudian mengakibatkan perpindahan energi mekanik dari sumbu tabung ke bagian dinding tabung dan juga meningkatkan suhu aliran di dekat dinding tabung. Perpindahan energi difusi (ED) yang disebabkan oleh tingginya konsentrasi energi di dinding tabung sedangkan konsentrasi di sumbu tabung lebih rendah, membuat energi mengalir dari dinding ke sumbu tabung vorteks. Sehingga energi mekanik yang mengarah ke dinding tabung sebagian energinya terkurangi oleh energi difusi yang mengalir ke arah sumbu tabung.

2.9 Persamaan Hukum Termodinamika Tabung Vorteks

2.9.1 Hukum Konservasi Massa

Berdasarkan hukum konservasi massa, laju aliran massa udara yang masuk ke dalam tabung vorteks sama dengan laju aliran massa yang keluar. Pada tabung vorteks terdapat satu lubang masuk untuk udara bertekanan dan dua lubang keluar yaitu sisi udara dingin dan sisi udara panas. Sehingga laju aliran massa udara masuk berupa massa udara mampat (ṁi) sama dengan laju aliran massa keluar terdiri dari laju aliran massa udara dingin (ṁc) dan laju aliran massa udara panas (ṁh) (Eiamsa-ard, 2008).

$$\dot{m}i = \dot{m}c + \dot{m}h \qquad (4)$$

2.9.2 Suhu Udara

Suhu udara yang dihasilkan tabung vorteks merupakan salah satu parameter performa dari tabung vorteks. Untuk dapat mengetahui performa dari tabung vorteks perlu dilakukan analisis terhadap penurunan dan kenaikan suhu udara. Penurunan suhu udara didefinisikan sebagai selisih suhu antara suhu udara masuk dan suhu udara dingin. Kenaikan suhu udara didefinisikan sebagai selisih suhu udara panas dengan suhu udara masuk. Dimana, *Ti* adalah suhu udara masuk, *Tc* adalah suhu udara dingin dan Th adalah suhu udara panas (Eiamsa-ard, 2008).

$$\Delta Tc = Ti - Tc \qquad (5)$$

2.9.3 Fraksi Massa Udara Dingin

Fraksi massa udara dingin adalah parameter terpenting yang mengindikasikan performa dan pemisahan energi/temperatur dalam tabung vorteks. Fraksi massa udara dingin didefinisikan sebagai perbandingan antara laju aliran udara dingin (ṁc) dengan laju aliran udara masuk (ṁi) (Eiamsa-Ard & Promvonge, 2008). Fraksi massa udara dingin dapat diatur dengan katup kontrol, yang terletak di bagian ujung tabung panas. Rumus fraksi massa udara dingin dinyatakan sebagai berikut Dimana, μc adalah fraksi massa udara dingin, ṁc adalah laju aliran massa udara dingin dan ṁi adalah laju aliran massa udara masuk (Eiamsa-ard, 2008).

$$\mu c = \frac{\dot{m}c}{\dot{m}i} \qquad (6)$$

2.9.4 *COP* Tabung Vorteks

Coefficient Of Performance (COP) adalah indikator yang dapat digunakan untuk menilai efisiensi energi dari suatu sistem refrigerasi. *COP* sebuah mesin pendingin dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara kapasitas pendinginan dengan kerja. Pada sistem pendingin konvensional, refrigeran bersinggungan langsung dengan kompresor sehingga kerja adalah daya kompresor. Akan tetapi pada sistem pendinginan menggunakan tabung vorteks, udara bertekanan didapatkan dari air receiver dan tidak didapat secara langsung dari kompresor. Oleh karena itu, untuk mendefinisikan nilai kerja menggunakan prinsip ekspansi isentropik gas ideal, sehingga persamaannya menjadi sebagai berikut. Dimana R adalah konstanta gas dan γ adalah rasio panas spesifik (Eiamsa-ard, 2008).

$$COP = \frac{\mu c \text{ x } cp \text{ x } \Delta Tc}{\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) x\, R\, x\, Ti\, x\, [\left(\frac{Pi}{Pc}\right)^{\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)}-1\,]} \qquad (7)$$

2.10 *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Komputasi Dinamika Fluida atau *Computational Fluid Dynamics (CFD)* adalah ilmu yang mempelajari cara memprediksi pola aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika atau model matematika. Pada umumnya proses perhitungan untuk aliran fluida diselesaikan dengan menggunakan persamaan energi,

momentum dan kontinuitas. Persamaan yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes, persamaan ini ditemukan oleh G.G. Stokes di Inggirs dan M. Navier di Perancis sekitar awal tahun 1800 (Yunus, et. al., 2006).

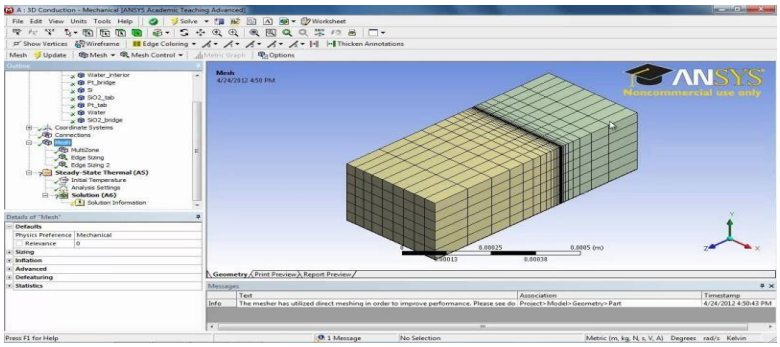
Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode perhitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan penghitungan pada tiap-tiap elemen pembaginya. Prinsipnya adalah suatu ruang berisi fluida yang akan dilakukan penghitungan dibagi menjadi beberapa bagian, hal ini sering disebut dengan sel dan prosesnya (*meshing*). Bagian-bagian yang terbagi tersebut merupakan sebuah kontrol penghitungan. Pada setiap titik kontrol penghitungan akan dilakukan penghitungan oleh aplikasi dengan batasan domain dan *boundary condition* yang telah ditentukan.

CFD mengkhususkan penghitungan pada aliran fluida. Mulai dari aliran fluida, *heat transfer* dan reaksi kimia yang terjadi pada fluida. Atas prinsip-prinsip dasar mekanika fluida, konservasi energi, momentum, massa, serta *species*, penghitungan dengan *CFD* dapat dilakukan. Secara sederhana proses penghitungan yang dilakukan oleh aplikasi *CFD* adalah dengan kontrol-kontrol penghitungan yang telah dilakukan maka kontrol penghitungan tersebut akan memanfaatkan persamaan-persamaan yang terlibat. Persaman-persamaan ini adalah persamaan yang membangkitkan dengan memasukan parameter apa saja yang terlibat dalam domain. Misalnya ketika suatu model yang akan dianalisa melibatkan temperatur berarti model tersebut melibatkan persamaan energi atau konservasi dari energi tersebut. Inisialisasi awal dari persaman adalah *boundary condition*. *Boundary condition* adalah kondisi di mana kontrol-kontrol penghitungan didefinisikan sebagai definisi awal yang akan dilibatkan ke control - kontrol penghitungan yang berdekatan dengannya melalui persaman-persamaan yang terlibat.

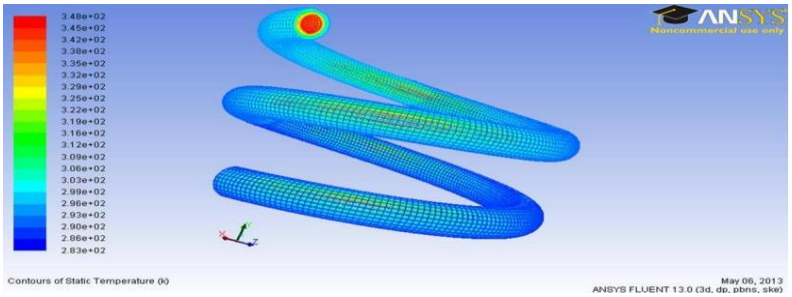
Dalam tugas akhir ini akan digunakan *software ANSYS* CFX® R2 2022 dengan kemampuan untuk menyajikan beberapa besaran dalam analisis fluida seperti suhu, tekanan, kecepatan aliran udara. CFX® adalah salah satu dari jenis program *CFD* yang menggunakan metode volume hingga. CFX® dapat menyelesaikan kasus aliran fluida dengan *mesh* (*grid*) yang tidak terstruktur sekalipun dengan cara yang relatif mudah, karena CFX® menyediakan fleksibilitas

mesh yang lengkap. CFX® didukung oleh jenis mesh tipe 2D triangular-quadrilateral, 3D *tetrahedral-hexahedral-pyramid-wedge*, dan *mesh* campuran (*hybrid*). CFX® juga memungkinkan untuk memperhalus atau memperbesar mesh yang sudah ada.

Gambar 08 Logo *Ansys* CFX®



Gambar 09 *Preview Ansys* CFX®



Gambar 10 *Preview post processing Ansys* CFX®

Secara umum proses penghitungan *CFD* terdiri atas 4 bagian utama yaitu,

1) *Pre processor*
2) *Solver*
3) *Post processor*
4) Proses Validasi

2.10.1 *Pre-processor* (*ANSYS* CFX *Build*)

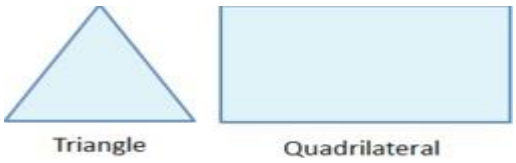
Langkah-langkah dalam tahap *pre-processor* yaitu;

- Definisi geometri dari benda kerja.

  Pada proses ini akan dilakukan proses pemodelan dari benda kerja. Proses pemodelan bisa langsung menggunakan software *CFD*, tetapi untuk benda kerja yang rumit bentuknya sebaiknya menggunakan *software assembly* seperti *Solidworks*.

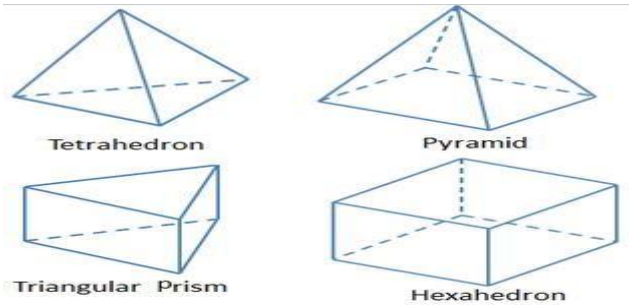
- Pembuatan *grid (mesh)* atau disebut sebagai *meshing*.

  Meshing adalah proses membagi komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil atau diskrit (Yusra, 2008). Semakin baik kualitas mesh maka akan semakin tinggi tingkat konvergensinya. Secara umum bentuk sel dari proses *meshing* dibagi menjadi dua jenis, yaitu dua dimensi dan tiga dimensi. Untuk sel dua dimensi terdapat dua jenis bentuk sel yaitu *Triangle dan Quadrilateral*.



Gambar 11 Bentuk Sel Dua Dimensi

Bentuk sel tiga dimensi terbagi kedalam empat jenis, yaitu *Tetrahedron, Pyramid, Triangular Prism, Hexahedron.*



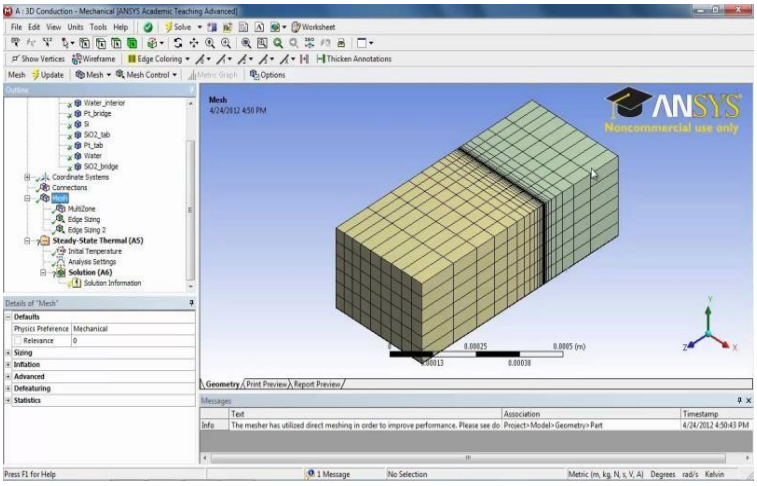
Gambar 12 Bentuk Sel Tiga Dimensi

Dalam proses meshing terdapat klasifikasi mesh yang terbagi kedalam tiga jenis, yaitu;

a. *Structured mesh*

   Structured mesh adalah meshing terstruktur,dapat dikenali dari konektivitas mesh yang teratur dan rapi. Adapun *mesh*

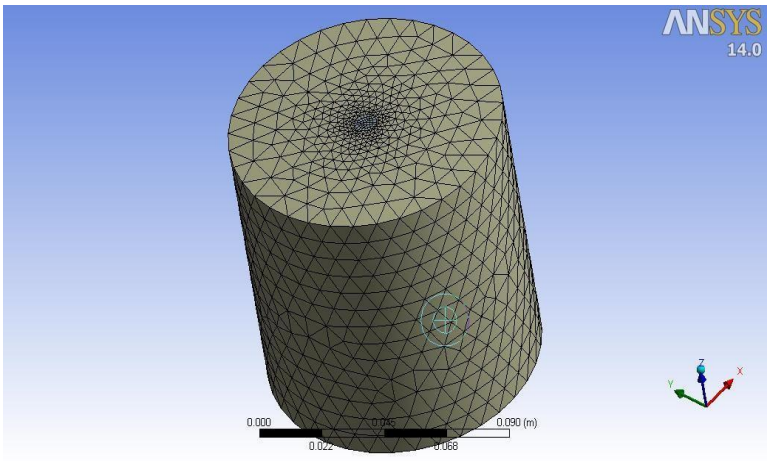
yang biasa menggunakan structured mesh adalah *Quadrilateral* di 2*D* dan *Hexahedra* di 3*D.*



Gambar 13 *Structured mesh*

b. Unstructured mesh

Unstructured mesh merupakan mesh yang konektivitas meshnya tidak beraturan. *Mesh* ini biasanya menggunakan *triangle* pada 2*D* dan *tetrahedra* pada 3*D.*



Gambar 14 *Unsructured mesh*

c. Hybrid mesh

Struktur *mesh* yang ketiga adalah *Hybrid mesh* yang merupakan kombinasi dari *Unstructured mesh* dan *Structured mesh.*

- Pemecahan domain menjadi beberapa sub domain yang lebih kecil dari hasil *meshing* geometri.
- Pemilihan fenomena fisik yang perlu dimodelkan.
- Definisi properties fluida.
- Spesikasikan kondisi batas yang sesuai pada sel- sel yang berhimpit dengan batas domain.

Pemilihan kondisi batas (*boundary condition*) dan pemilihan metode inisiasi. Dalam penentuan kondisi batas akan dimasukkan nilai dari parameter- parameter yang dibutuhkan, adapun parameter yang termasuk kondisi batas adalah,

a. Velocity inlet

Digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran inkompresibel.

b. Mass flow inlet

Pada kondisi batas ini harus dimasukkan data laju aliran massa atau fluks massa, temperatur fluida (apabila mengaktifkan persamaan energi), tekanan *gauge* pada sisi masuk, arah aliran, dan besaran turbulensi.

c. Pressure inlet

Pada *Pressure inle*t akan dimasukkan data tekanan total (absolute), tekanan *gauge*, temperatur, arah aliran, dan besaran turbulen.

d. Pressure outlet

Pada Kondisi batas ini dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar diketahui atau minimal dapat diperkirakan mendekati sebenarnya. Pada kondisi batas ini harus dimasukkan nilai tekanan statik, temperatur aliran balik (*backflow*), dan besaran turbulen aliran balik.

e. Outflow

Kondisi batas ini digunakan apabila data aliran pada sisi keluar tidak diketahui. Data pada sisi keluar diekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar.

f. Pressure far-field

Kondisi batas ini digunakan untuk memodelkan aliran kompresibel, besaran yang harus dimasukkan nilainya adalah tekanan gauge, bilangan March, temperatur aliran, arah aliran dan besaran turbulensi pada sisi keluar.

g. Inlet vent dan outlet vent

Kondisi batas ini digunakan untuk model saluran masuk/keluar aliran dimana terdapat peralatan ventilasi di sisi luar saluran masuk/keluar yang dapat menimbulkan kerugian tekanan pada aliran. Data yang harus dimasukkan pada kondisi batas ini sama dengan data pada kondisi batas *pressure inlet*/*pressure outlet*, hanya terdapat tambahan data untuk kerugian tekanan.

h. Intake fan dan exhaust fan

Kondisi batas ini digunakan untuk model saluran masuk/keluar aliran dimana terdapat *fan/blower* di sisi luar saluran masuk/keluar untuk menghembus/menghisap fluida di dalam saluran. Data yang harus dimasukkan pada kondisi batas ini sama dengan data pada kondisi batas *pressure inlet/pressure outlet*, hanya terdapat tambahan data untuk kenaikan tekanan setelah melewati *fan/blower (pressure-jump)*.

i. Dinding (*wall*)

Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan. Permodelan pada daerah dinding secara signifikan berpengaruh pada *fidelity* (keakuratan dan kehalusan solusi) numerik.

j. Symmetry dan *axis*

Kondisi batas simetri digunakan apabila model geometri kasus yang bersangkutan dan pola aliran pada model tersebut simetri. Kondisi batas ini juga dapat digunakan untuk

memodelkan dinding tanpa gesekan pada aliran viskos. Sedangkan kondisi batas axis digunakan sebagai garis tengah (*centerline*) untuk kasus 2D *axisymmetry*.

k. Periodic

Kondisi batas periodik digunakan untuk mengurangi daya komputasi pada kasus tertentu. Kondisi batas ini hanya dapat digunakan pada kasus yang mempunyai medan aliran dan geometri yang *periodic*, baik secara translasi atau rotasi.

l. Cell zone fluid

Kondisi batas ini digunakan pada bidang model yang didefinisikan sebagai fluida. Data yang dimasukkan hanya material fluida. Dapat didefinisikan sebagai media berpori.

m. Cell zone solid

Kondisi batas ini digunakan pada bidang model yang didefinisikan sebagai padatan. Data yang harus dimasukkan hanya material padatan. Dapat didefinisikan heat generation rate pada kontinum solid (opsional).

n. Porous zone

Porous zone merupakan pemodelan khusus dari zona fluida selain padatan dan fluida. Kondisi batas ini digunakan dengan cara mengaktifkan pilihan *porous zone* pada panel fluida. Digunakan untuk memodelkan aliran yang melewati media berpori dan tahanan yang terdistribusi, misalnya: *packed beds, filter papers, perforated plates, flow distributors, tube banks*.

o. Kondisi batas internal

Selain kondisi batas yang telah disebutkan di atas, masih terdapat beberapa kondisi batas lagi yang dapat dikelompokkan menjadi kelompok kondisi batas internal. Yang termasuk dalam kondisi batas internal adalah: *fan*, radiator, *porous jump*, interior. Kondisi batas ini digunakan untuk bidang yang berada di tengah medan aliran dan tidak mempunyai ketebalan. Kondisi batas *fan*, radiator, dan *porous jump* digunakan untuk

memodelkan adanya fan, radiator, atau media berpori di tengah-tengah aliran, sehingga tidak perlu dibuat model fan atau radiator, cukup dengan menentukan kenaikan tekanan yang terjadi setelah melewati alat tersebut. Sedangkan kondisi batas interior digunakan untuk bidang yang kedua sisinya dilewati oleh fluida.

Solusi sebuah problem fluida (kecepatan, tekanan, suhu dan sebagainya) didefinisikan di setiap node di dalam masing - masing sel. Akurasi sebuah solusi CFD ditentukan oleh jumlah sel dalam *grid*. Secara umum, semakin besar jumlah sel maka semakin baik keakurasiannya. Lama tidaknya perhitungan dalam literasi tergantung kepada halus atau rapatnya *grid*. Pembuatan geometri pada *CFX-Build* dapat dibuat secara langsung dari *CFX – build* maupun diimport dari program *CAD* yang lainnya seperti *PATRAN*, *UNIGRAPHICS*, *CATIA*, *ACAD*, *PRO/ENGINEER* dan lain-lain

2.10.2 *Solver*

Dalam tahap ini *CFD* akan dilakukan perhitungan terhadap model yang di buat pada tahap *Pre-processor*. Adapun *solver* terdiri dari langkah-langkah,

- Solusi persamaan-persamaan aljabar.

  Perbedaan utama di antara keempat macam teknik adalah pada cara aproksimasi variabel-variabel aliran dan proses diskretisasi. Terdapat 4 macam teknik solusi numerik yaitu beda hingga *(finite difference*), elemen hingga (*finite element*), metode spectral (*spectral*), dan volume hingga (*finite volume*). Perbedaan ketiga metode tersebut adalah sebagai berikut;

  a. Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*)

     Menggambarkan variabel tidak diketahui Φ sebuah problem aliran dengan cara sampel-sampel titik pada titik-titik nodal sebuah *grid* dari garis koordinat. Ekspansi Deret Taylor terpotong sering dipakai untuk membangun aproksimasi - aproksimasi beda hingga derivatif Φ dalam suku- suku sampel-sampel titik Φ di masing-masing titik *grid* dan tetangga

terdekat. Derivatif tersebut muncul dalam persamaan atur digantikan oleh beda hingga menghasilkan persamaan aljabar untuk nilai-nilai Φ di setiap titik *grid*.

b. Metode Elemen Hingga *(Finite Element Method)*

Metode Menggunakan fungsi-fungsi potong (*piecewise*) sederhana (misalnya linier atau kuadratik) pada elemen-elemen untuk menggambarkan variasi- variasi lokal variabel aliran yang tidak diketahui Φ. Persamaan atur terpenuhi secara tepat oleh solusi eksak Φ. Jika fungsi - fungsi aproksimasi potong untuk Φ disubstitusikan ke dalam persamaan, terdapat sebuah ketidak pastian hasil (*residual*) yang didefinisikan untuk mengukur kesalahan. Kemudian residual (kesalahan) diminimalkan melalui sebuah pengalian dengan sebuah set fungsi berbobot dan mengintegrasikannya. Hasilnya diperoleh sekumpulan persamaan aljabar untuk koefisien- koefisien tak diketahui dari fungsi-fungsi aproksimasi. Teori elemen hingga awalnya dikembangkan untuk analisis tegangan struktur.

c. Metode Spektral (*Spectral Method*)

Metode spektral menggunakan fungsi basis yang umumnya bukan nol di seluruh domain. Mengaproksimasikan variabel Φ dengan deret Fourier terpotong atau deret Polinomial Chebyshev. Aproksimasi tidak secara lokal namun valid di semua domain komputasional, mengganti tak diketahui dalam persamaan atur dengan deret - deret terpotong. Batasan yang membawa ke persamaan aljabar untuk seluruh koefisien deret Fourier dan Chebyshev diberikan oleh konsep *residual* berbobot mirip dengan elemen hingga atau membuat fungsi aproksimasi serupa dengan solusi eksak pada sebuah nilai dari titik-titik *grid*.

d. Metode Volume Hingga (*Finite Volume Method*)

Awalnya dikembangkan untuk *special* formulasi beda hingga, algoritma numerik terdiri dari langkah, Intergrasi

persamaan atur aliran fluida di seluruh volume atur (hingga) dari domain solusi, diskretisasi dengan substitusi beragam aproksimasi beda hingga untuk suku-suku persamaan terintegrasi proses aliran seperti konveksi, difusi dan sumber. Akan dikonversikan persamaan integral menjadi sebuah sistem persamaan aljabar, dan solusi persamaan-persamaan aljabar dengan metode *iterative*.

Langkah awal integrasi volume atur, membedakan metode volume hingga dari seluruh teknik *CFD*. Hasilnya menggambarkan konservasi (eksak) properties relevan di setiap sel ukuran hingga. Relasi yang jelas antara algoritma numerik dan prinsip konservasi fisis dasar memberikan sebuah ketertarikan dan konsep yang lebih mudah. Konservasi variabel umum aliran Φ contohnya sebuah komponen kecepatan atau entalpi, dalam sebuah volume hingga dapat digambarkan sebagai keseimbangan di antara bermacam proses berkecenderungan menambah atau mengurangi.

- Aproksimasi variabel-variabel aliran yang tidak diketahui dengan fungsi-fungsi sederhana.
- Diskretisasi dengan substitusi aproksimasi ke dalam persamaan atur aliran dan manipulasi matematis lanjut.

2.10.3 *Post processor*

Hasil penghitungan modul solver berupa nilai-nilai numerik (angka-angka) variabel-variabel dasar aliran seperti komponen-komponen kecepatan, tekanan, temperatur dan fraksi-fraksi masa. Dalam modul *post-processor* nilai-nilai numerik ini diolah agar pengguna dapat dengan mudah membaca dan menganalisis hasil-hasil penghitungan *CFD*. Hasil- hasil ini dapat disajikan dalam bentuk visualisasi ataupun kontur-kontur distribusi parameter- parameter aliran fluida. Adapun data visualisasi model yang bias ditampilkan oleh *post processor* adalah sebagai berikut,

- Gambar geometri model.
- Gambar *surface* sifat fluida.

- Animasi aliran fluida.
- Tampilan vector kecepatan.
- Gerakan rotasi, tranlasi, dan penyekalan.
- Arah aliran fluida

Dalam proses *set-up* dan *running* simulasi *CFD* ada tahapan identifikasi dan formulasi permasalahan aliran dengan pertimbangan fenomena fisika dan kimia. Pemahaman yang cukup baik diperlukan dalam menyelesaikan alogaritma penyelesaian numerik. Ada tiga konsep matematika yang digunakan dalam menentukan berhasil atau tidakanya alogaritma berdasarkan *AEA Technology* 1996, yaitu;

- Konvergensi yaitu properti metode numerik untuk menghasilkan penyelesaian eksakta sebagai *grid spacing* ukuran *control volume* atau ukuran elemen dikurangi mendekati nol. Konvergensi biasanya sulit untuk didapatkan secara teoritis.
- Konsistensi yaitu urutan numeric untuk menghasilkan system persamaan aljabar yang dapat diperlihatkan sama (*equivalen*) dengan persamaan pengendali sebagai jarak grid mendekati nol.
- Stabilitas yaitu penggunaan faktor kesalahan sebagai indikasi metode numerik. Jika sebuah teknik tidak stabil dalam setiap kesalahan pembuatan pada data awal maka dapat menyebabkan terjadinya osilasi atau divergensi.

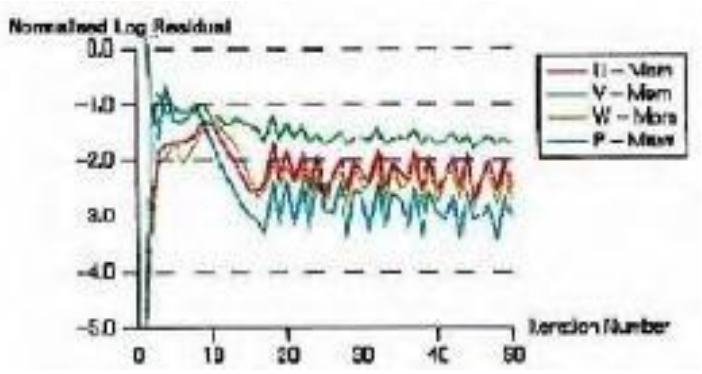
2.10.4 Proses Validasi

Tahap validasi berdasarkan (*AEA Technology*, 1996) selama proses perhitungan dengan pendekatan CFD dilakukan dengan beberapa tahap yaitu;

- Konvergensi

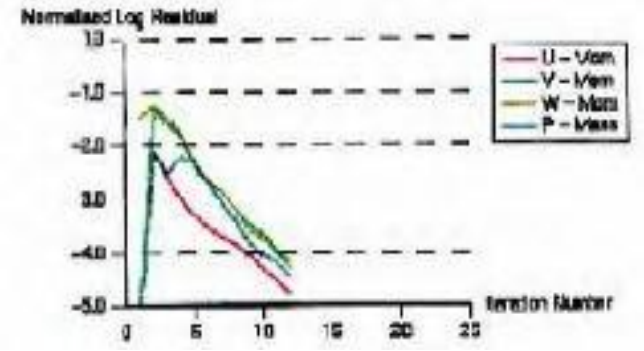
  Konvergensi merupakan pendekatan data dengan menggunakan metode numerik untuk mendapatkan data yang ideal, khususnya dalam implementasi *CFD*. Simulasi *CFD* melibatkan proses non-linier yang berkorelasi dengan fenomena yang tidak stabil secara inheren seperti turbulensi. *Software CFD* bertujuan untuk menyimulasikan proses fisik, dengan menangkap permasalahan fenomena fisik ke dalam persamaan numerik. Proses literasi perhitungan akan selalu dikontrol dengan

persamaan pengendali. Jika hasil perhitungan belum sesuai dengan tingkat kesalahan yang ditentukan, maka komputasi akan terus berjalan. Berikut adalah beberapa grafik *RMS* yang menunjukan konvergensi proses iterasi.



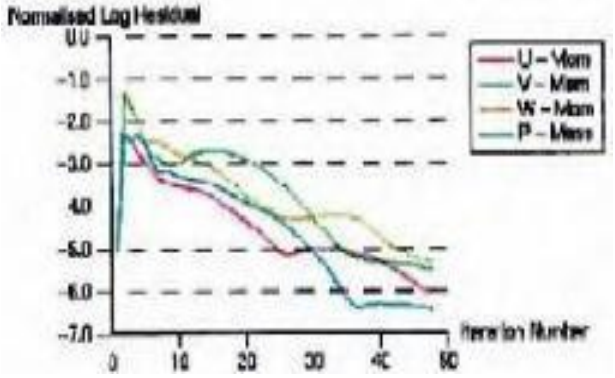
Gambar 15 Konvergensi dan proses literasi *error*

Konvergensi menunjukkan error apabila selama proses literasi grafik yang terjadi naik turun dan cenderung datar, tidak mengalami penurunan.



Gambar 16 Konvergensi dan proses literasi yang terlalu cepat

Konvergensi menunjukkan prematur apabila iterasi berhenti sebelum waktu yang telah ditentukan.



Gambar 17 Konvergensi yang normal

Konvergensi yang normal terjadi apabila pada grafik, literasi yang terjadi cenderung turun dan berhenti setelah waktu yang ditentukan.

- *Grid Independence*

  Besarnya jumlah *cell* yang kita gunakan dalam perhitungan akan menentukan keakuratan hasil yang didapat karena jumlah *cell* juga dapat mempengaruhi perubahan bentuk geometri pada saat dilakukan *definite*. Tetapi tidak selamanya dengan jumlah *cell* yang banyak akan menambah keakuratan hasil perhitungan. Dengan demikian pengguna dituntut untuk dapat menentukan jumlah *cell* yang optimum, agar waktu dan memori komputer yang terpakai tidak terlalu besar.