

SKRIPSI

**OPTIMASI *KEEL COOLER* PADA SISTEM PENDINGIN MESIN
PENGGERAK UTAMA KAPAL**

Disusun dan diajukan oleh:

**SRI AHYUNI AMELIA
D091181305**



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SISTEM PERKAPALAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**OPTIMASI KEEL COOLER PADA SISTEM PENDINGIN
MESIN PENGGERAK UTAMA KAPAL**

Disusun dan diajukan oleh

Sri Ahyuni Amelia

D091 18 1305

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 18 April 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Ir. Syerly Klara, M.T

NIP.19640501 199002 2 001

Pembimbing Pendamping,

Muhammad Iqbal Nikmatullah, S.T., M.T

NIP. 19870131 201903 1 007



PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini,

Nama : Sri Ahyuni Amelia
NIM : D091 18 1305
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan
Jenjang : S1

Dengan ini menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi yang berjudul :

“Optimasi Keel Cooler Pada Sistem Pendingin Mesin Penggerak Utama Kapal”

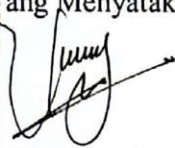
Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.


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, 18 April 2023

Yang Menyatakan,

Sri Ahyuni Amelia



ABSTRAK

SRI AHYUNI AMELIA. *Optimasi Keel Cooler Pada Sistem Pendingin Mesin Penggerak Utama Kapal.* (dibimbing oleh Ir.Syerly Klara, M.T dan Muhammad Iqbal Nikmatullah, S.T.,M.T)

Kapal OT. Skyliie yang diproduksi oleh PT. Samudra Marine Indonesia merupakan salah satu jenis kapal tanker yang menggunakan *keel cooler* sebagai sistem pendingin mesinnya. *Keel cooler* ini menjadi salah satu alat penukar kalor tipe baru yang diaplikasikan di dunia perkapalan karena dipasang secara eksternal pada lambung kapal di bawah permukaan air. Setelah diketahui efektivitas dari *keel cooler* tersebut selanjutnya penelitian ini dikembangkan menjadi optimasi *keel cooler* dengan tujuan untuk mengetahui dimensi panjang yang optimum pada *keel cooler system*. Penelitian ini menggunakan metode analisis dan simulasi menggunakan *software Ansys*. Berdasarkan hasil perhitungan pada beberapa variasi dimensi panjang *keel cooler* diperoleh nilai perpindahan kalor terbesar yaitu $6,655 \times 10^5$ W pada variasi panjang II dengan ukuran pipa inlet 53,85 meter, pipa outlet 47 meter, dan pipa dengan ukuran pipa yang sama panjang yaitu 44 meter dengan nilai efektivitas terbesar yaitu 80,138%. Sementara, perpindahan kalor terendah sebesar $4,503 \times 10^5$ W pada variasi panjang III dengan ukuran pipa inlet 37,85 meter, pipa outlet 31 meter dan pipa dengan ukuran pipa yang sama panjang yaitu 28 meter dengan nilai efektivitas terendah yaitu 79,910%. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin panjang dimensi ukuran *keel cooler* maka nilai perpindahan kalor semakin besar dan efektivitas semakin besar pula dan variasi ukuran yang diteliti memenuhi nilai standar efektivitas penggunaan *keel cooler*.

Kata kunci: *Keel cooling system, Perpindahan Panas, Variasi Dimensi Panjang.*

ABSTRACT

SRI AHYUNI AMELIA. *Optimization of the Keel Cooler in the Ship's Main Engine Cooling System* (supervised by Ir.Syerly Klara, M.T and Muhammad Iqbal Nikmatullah, S.T.,M.T)

OT. Skyline ship produced by PT. Samudra Marine Indonesia is a type of tanker that uses a keel cooler as its engine cooling system. This keel cooler is a new type of heat exchanger that is applied in the shipping world because it is installed externally on the ship's hull below the water surface. After knowing the effectiveness of the keel cooler, this research was developed into optimizing the keel cooler with the aim of knowing the optimum length dimension of the keel cooler system. This study uses analysis and simulation methods using Ansys software. Based on the results of calculations on several variations of the long dimension of the keel cooler, the greatest heat transfer value is 6.655×10^5 W for the length variation II with an inlet pipe size of 53.85 meters, an outlet pipe of 47 meters, and the same pipe, namely 44 meters with the greatest effectiveness value of 80.138%. Meanwhile, the lowest heat transfer was 4.503×10^5 W in the length variation III with an inlet pipe size of 37.85 meters, an outlet pipe of 31 meters, and the same pipe of 28 meters with the lowest effectiveness value of 79.910%. So it can be concluded that the longer the dimensions of the keel cooler, the greater the heat transfer value and the greater the effectiveness and the size variations studied meet the standard values for the effectiveness of using the keel cooler.

Keywords: Keel cooling system, heat transfer, length dimension variations.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
ABSTRAK	iii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
KATA PENGANTAR	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penulisan	3
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Sistem Pendingin	5
2.2 Sistem Pendingin dengan <i>Keel Cooler</i>	6
2.3 Proses Perpindahan Kalor	7
2.4 Perpindahan Kalor Secara Konduksi	8
2.5 Perpindahan Kalor Secara Konveksi	9
2.6 Tahanan Termal di Dalam dan di Luar Pipa	10
2.7 Beda Suhu Rata-Rata.....	11
2.8 Tipe-Tipe Heat Exchanger Berdasarkan Susunana Aliran Fluida	12
2.9 Aliran Didalam Pipa	16
2.9.1 Aliran turbulent di dalam Pipa.....	16
2.9.2 Aliran laminar di dalam pipa	17
2.10 Metode Efektivitas – NTU.....	18
2.11 Aplikasi Desain Rhinoceros 6.....	20
2.12 Software Ansys.....	21
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN/PERANCANGAN	23
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	23
3.2 Studi Literatur	23
3.3 Pengumpulan Data.....	23
3.4 Langkah Analisis Data.....	27
3.5 Kerangka Pemikiran	29
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1. Gambaran Umum	30
4.2. Tahap Pemodelan	30
4.3. Perhitungan Analisa Kinerja <i>Keel Cooler System</i>	33
4.3.1 Luas bidang perpindahan kalor.....	33
4.3.2 Penentuan jenis aliran fluida di dalam pipa.....	35
4.3.3 Penentuan jenis aliran fluida di luar pipa	35
4.3.4 Tahanan termal pipa	36
4.3.5 Menentukan temperatur fluida panas yang keluar (T_{hout}).....	40
4.4. Simulasi CFD	42
4.4.1 Penentuan zona batas dan mesh.....	42
4.4.2 Setup.....	43

4.4.3 <i>Solution</i>	45
4.4.4 <i>Result</i>	45
4.5. Perbandingan Hasil Analisis dengan Simulasi CFD	47
4.6. Menghitung Beda Suhu Keseluruhan Rata-Rata Logaritmik	48
4.7. Analisis Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh Dipermukaan Luar dan Dalam Pipa	49
4.8. Perpindahan Panas Secara Konveksi pada <i>Keel Cooler</i>	51
4.9. Perpindahan Panas Secara Konduksi pada <i>Keel Cooler</i>	52
4.10 Perpindahan Kalor Total	53
4.11. Efektivitas Alat Penukar Kalor.....	55
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1. Kesimpulan	57
5.2. Saran	57
DAFTAR PUSTAKA	58
Lampiran 1. Keel Cooler	61
Lampiran 2. Engine Test Data	62
Lampiran 3. Desain <i>Keel Cooler</i>	68
Lampiran 4. Nilai konduktifitas Termal Bahan	69
Lampiran 5. Density Air Tawar Pada Beberapa Temperatur	70
Lampiran 6. Karakteristik Fluida pada Temperatur Tertentu	71
Lampiran 7. Gambar General Arrangement Kapal Ot.Skylie	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 keel Cooler	6
Gambar 2 Perpindahan Panas Konduksi Di Bahan Cair Dengan Suhu Berbeda	9
Gambar 3 Perpindahan Panas Konveksi	10
Gambar 4 Cross Flow Tube Bank	13
Gambar 5 arrangement Of Tube In Cross Flow Tube Bank	14
Gambar 6 Aplikasi Desain Rhinoceros 6.....	21
Gambar 7 Aplikasi Ansys	22
Gambar 8 Pembangunan kapal dengan Sistem Pendingin <i>Keel Cooler</i>	23
Gambar 9 Profil Suhu Permukaan Air Laut	25
Gambar 10 <i>Keel Cooler</i>	25
Gambar 11 <i>Keel Cooler</i> Pada Lambung Kapal	26
Gambar 12 Letak <i>Keel Cooler</i> Pada Kapal	26
Gambar 13 Letak Penetrasi <i>Keel Cooler</i>	27
Gambar 14 Variasi Dimensi Panjang Pipa <i>Keel Cooler</i>	31
Gambar 15 Dimensi Lebar dan Panjang	32
Gambar 16 Hasil Desain <i>Keel Cooler</i> System	32
Gambar 17 Grafik Tahanan Termal Total Pada Setiap Variasi Panjang <i>Keel Cooler</i>	40
Gambar 18 Grafik Hubungan antara variasi Dimensi Panjang dengan Temperatur Fluida Masuk dan Keluar	42
Gambar 19 Grafik Hubungan Antara Temperatur dengan Variasi Dimensi Panjang	45
Gambar 20 Distribusi Panas Fluida pada Variasi Dimensi Panjang I	46
Gambar 21 Distribusi Panas Fluida Pada Variasi Dimensi Panjang II.....	46
Gambar 22 Distribusi Panas Fluida Pada Variasi dimensi Panjang III	47
Gambar 23 Grafik Perbandingan Nilai Temperatur Analisis Dengan Simulasi	48
Gambar 24 Grafik Hubungan Antara Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh Dengan Variasi Dimensi Panjang <i>Keel Cooler</i>	50
Gambar 25 Grafik Hubungan Antara Perpindahan Kalor Total Dengan Variasi Dimensi Panjang <i>Keel Cooler</i>	54
Gambar 26 Grafik Hubungan Antara Temperatur Dengan Nilai	56

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Konduktivitas Termal Bahan Logam dan Zat Cair	9
Tabel 2 Nusselt Number Correlations for cross Flow over tube banks for $N > 16$ and $0,7 Pr < 500$ (form Zukauskas, Ref. 15, 1987).....	15
Tabel 3 Effectiveness Relations For Heat Exchangers	19
Tabel 4 Power/Torque Kapal	24
Tabel 5 Dimensi Utama <i>Keel Cooler</i>	26
Tabel 6 Tahanan Termal Di Dalam <i>Keel Cooler</i>	38
Tabel 7 Tahanan Termal di Luar <i>Keel Cooler</i>	39
Tabel 8 Tahanan Termal Total Tiap Variasi <i>Keel Cooler</i>	39
Tabel 9 Temperatur Fluida Yang Keluar	41
Tabel 10 Kondisi fisik Fluida Di Luar <i>Keel Cooler</i>	43
Tabel 11 Pengaturan Kondisi Batas Inlet Sea Water.....	43
Tabel 12 Pengaturan Kondisi Batas Outlet Sea Water	44
Tabel 13 Pengaturan Kondisi Batas Inlet Fresh Water.....	44
Tabel 14 Pengaturan Kondisi Batas Outlet Fresh Water	44
Tabel 15 Nilai Temperatur Simulasi CFD	45
Tabel 16 Perbandingan Nilai Temperatur Analisis Dengan Simulasi.	47
Tabel 17 Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh Di Dalam Pipa	49
Tabel 18 Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh	50
Tabel 19 Konveksi Pada Sisi Kiri dan Kanan Inlet	51
Tabel 20 Konveksi Pada Sisi Kiri dan Kanan Pipa yang Sama	51
Tabel 21 Konveksi Pada Sisi Kiri dan Kanan Pipa Outlet.....	51
Tabel 22 Konveksi Pada Sisi Bawah Pipa Inlet	52
Tabel 23 Konveksi Pada Sisi Bawah Pipa Yang Sama.....	52
Tabel 24 Konveksi Pada Sisi Bawah Pipa Outlet.....	52
Tabel 25 Perpindahan Panas Konduksi Pada <i>Keel Cooler</i>	53
Tabel 26 Perpindahan Kalor Total.....	54
Tabel 27 Perpindahan Kalor Total Secara Konveksi dan Konduksi	54
Tabel 28 Efektivitas <i>Keel Cooler</i>	55

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
A_0	Luas Selubung Pipa bagian Luar (m^2)
A_s	Luas Selubung Pipa bagian Dalam (m^2)
A_i	Luas Selubung Total Pipa (m^3)
l	Panjang Pipa (m)
D_i	Diameter Pipa Bagian Dalam (m)
μ	Viskositas Dinamik Fluida Panas/Dingin ($kg/m.s$)
V_i	Kecepatan Fluida Didalam Pipa (m/s)
Re_{inside}	<i>Reynold Number</i> Aliran Didalam Pipa
$Re_{outside}$	<i>Reynold Number</i> Aliran Diluar Pipa
P	Massa Jenis Fluida Panas/Dingin ($kg/m.s^3$)
D_0	Diameter Pipa Bagian Luar (m)
V_0	Kecepatan Fluida Diluar Pipa (m/s)
V_{max}	Kecepatan Aliran Maksimal Diluar Pipa (m/s)
S_T	<i>Transverse Pitch</i> (m)
S_L	<i>Longitudinal Pitch</i> (m)
S_D	<i>Diagonal Pitch</i> (m)
R_{wall}	Tahanan Termal Pada Dinding Pipa ($^{\circ}C/W$)
k	Konduktivitas Termal ($W/m^{\circ}C$)
R_i	Tahanan Termal Pada Bagian Dalam Pipa ($^{\circ}C/W$)
h_i	<i>Heat Transfer Coefficient Inside Tube</i> ($W/m^{\circ}C$)
NU	<i>Nusselt Number</i>
R_0	Tahanan Termal Pada Bagian Luar Pipa ($^{\circ}C/W$)
H_0	<i>Heat Transfer Coefficient Outside Tube</i> ($W/m^{\circ}C$)
f	<i>Correction Factor Inside/Outside</i>
\dot{m}_h	Laju Aliran Massa Fluida Panas (kg/s)
C_{ph}	<i>Spesifik Heat Hot Fluid</i> ($kJ/kg^{\circ}C$)
$T_{h\ in}$	Temperatur Fluida Panas / <i>fresh water</i> masuk ($^{\circ}C$)
$T_{h\ out}$	Temperatur Fluida Panas / <i>fresh water</i> keluar ($^{\circ}C$)
Pr	Bilangan Prandtl
\dot{m}_c	Laju Aliran Massa Fluida Dingin (kg/s)
C_{pc}	<i>Spesifik Heat Cold Fluid</i> ($kJ/kg^{\circ}C$)
$T_{c\ in}$	Temperatur Fluida Dingin / Air Laut masuk ($^{\circ}C$)
$T_{c\ out}$	Temperatur Fluida Dingin / Air Laut keluar ($^{\circ}C$)
T_s	<i>Temperature Surface</i> ($^{\circ}C$)
T_e	<i>Temperature Exit</i> ($^{\circ}C$)
T_{in}	<i>Temperature In</i> ($^{\circ}C$)
T_{out}	<i>Temperature Out</i> ($^{\circ}C$)
Q	Debit Aliran Fluida Dingin / Panas (m^3/s)
Δ_{LMTD}	Beda Suhu Keseluruhan Rata Rata Logaritmik ($^{\circ}C$)
U_0	Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh Luar Pipa ($W/m^2^{\circ}C$)
U_i	Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh Dalam Pipa ($W/m^2^{\circ}C$)

U_{total}	Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh ($W/m^2\text{°C}$)
Q_{total}	Perpindahan Kalor Total (W)
ε	Efektivitas Alat Penukar Kalor (%)
C_{min}	<i>Heat Capacity Rates of The Hot / Cold Fluid</i> ($kW/\text{°C}$)
NTU	<i>Number of Transfer Units</i>

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. <i>Keel Cooler</i>	64
Lampiran 2. <i>Data Engine Test</i>	65
Lampiran 3. <i>Desain Keel cooler</i>	71
Lampiran 4. Nilai Konduktivitas Termal Bahan	72
Lampiran 5. Density Air Tawar Pada Beberapa Temperatur	73
Lampiran 6. Karakteristik Fluida Pada Temperatur Tertentu	74
Lampiran 7. Gambar General Arrangement Kapal Ot. Skylic	75

KATA PENGANTAR

Assalammu 'alaikum warahmatullahi wabarakatu.

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufiq dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Optimasi *Keel Cooler* pada Sistem Pendingin Mesin Penggerak Utama Kapal” ini dapat diselesaikan dengan baik untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Banyak hal yang penulis lalui dalam proses perjalanan penulisan tugas akhir ini. Bukan hanya hal yang membuat penulis senang, tetapi juga melewati banyak hal yang melelahkan yang kadang membuat jenuh namun tidak dengan menyerah. Tidak dapat dihitung hambatan yang dihadapi dalam penyusunan skripsi ini, namun berkat dukungan dari keluarga, dosen pembimbing dan motivasi dari teman-teman, serta doa dan usaha membuat penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan baik dan semaksimal mungkin. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orangtua penulis yang tak pernah berhenti untuk selalu mendoakan kemudahan dan kelancaran bagi penulis juga selalu memberi cinta, dukungan dan nasihat selama proses perkuliahan dari awal hingga akhir.
2. Ibu Ir. Syerly Klara, M.T selaku Pembimbing I dan Bapak Muhammad Iqbal Nikmatullah, S.T.,M.T selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan memberi banyak ilmu dalam membimbing, mengoreksi serta memberi arahan dan masukan selama proses penyelesaian skripsi ini dengan baik.
3. Bapak Dr. Eng. Faisal Mahmudin, S.T., M.Inf.Tech.,M.Eng selaku ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Andi Erwin Eka Putra, S.T.,M.T dan Ibu Balqis Shintarahayu, S.T.,M.Sc selaku dosen penguji. Tak lupa Dosen-dosen Teknik Sistem Perkapalan yang telah membagi banyak ilmunya, memberi motivasi, serta bimbingannya selama proses perkuliahan.

5. Staf tata usaha Departemen Teknik Sistem Perkapalan yang telah membantu segala aktivitas administrasi.
6. Teman-teman Zizter18 dengan segala kebersamaannya, canda tawanya, dan motivasinya.
7. Saudara-saudara penulis yang senantiasa selalu mengingatkan untuk selalu sabar dan memberi dukungan penuh kepada penulis.
8. Sahabat-sahabat penulis yang selalu menghibur penulis saat mendapat kesulitan, memberi dukungan, membantu menyemangati penulis dengan cara yang berbeda melalui berbagai banyak candaan dan tentunya selalu memberi saran yang sangat-sangat tidak memotivasi.
9. Teman-teman yang telah berkontribusi membantu mengajarkan penulis mengenai analisis dan simulasi selama proses pengerjaan skripsi tentang *keel cooler* ini.
10. Diri sendiri yang sudah hebat bisa sabar dan kuat melewati banyak hambatan dan bisa bertahan sampai saat ini.

Tanpa bantuan dari pihak-pihak diatas, tak dipungkiri penulis mampu menyelesaikan skripsi ini dengan sebaik-baiknya. Kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan terkhusus bagi diri sendiri.

Wassalammu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Gowa, 18 April 2023

Penulis

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal Tanker adalah sebuah kapal yang dirancang untuk mengangkut minyak. Tidak hanya minyak, kapal tanker juga dapat mengangkut muatan dalam bentuk gas atau liquid baik cairan kimia, maupun cairan lainnya. Di bagian deck kapal memiliki banyak pipa yang menjadi ciri khusus dari jenis kapal ini.

Pada umumnya di kapal terdapat dua cara yang biasa digunakan untuk mendinginkan mesin utama ataupun mesin bantu yaitu dengan menggunakan sistem pendingin secara langsung (terbuka) dan sistem pendingin secara tidak langsung (tertutup), diantara kedua sistem tersebut yang paling umum digunakan di kapal yaitu sistem pendingin tertutup (Setyana, 2014). Pada sistem pendingin terbuka hanya menggunakan satu media pendingin yaitu air laut sedangkan sistem pendingin tertutup yaitu sistem dengan media pendingin menggunakan air tawar yang digunakan secara terus-menerus bersirkulasi untuk mendinginkan motor/mesin kapal.

Fungsi dari sebuah sistem pendingin yang dipasang pada mesin kapal yaitu bertanggung jawab untuk menjaga temperatur mesin agar selalu berada di temperatur operasi, hal ini diperlukan karena mesin akan beroperasi secara optimum di temperatur operasinya. Sehingga mesin kapal dapat bekerja dengan efisien dan beroperasi selama berjam-jam lamanya. Hilangnya energi paling sering dari mesin adalah dalam bentuk energi panas. Untuk menghilangkan energi panas yang berlebihan harus menggunakan media pendingin berupa penukar kalor (heat exchanger), untuk menghindari gangguan fungsi ataupun kerusakan pada komponen mesin (Paulus, 2018).

Penukar kalor (*Heat exchanger*) merupakan alat yang digunakan untuk memindahkan panas dari suatu sistem ke sistem lain tanpa perpindahan massa, dan bisa berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Penukar kalor dirancang sebisa mungkin agar perpindahan panas antar fluida dapat berlangsung secara efisien. Pertukaran panas terjadi karena adanya kontak, baik antara fluida yang terdapat dinding yang memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung (*direct contact*).

Ada beberapa tipe penukar kalor yang digunakan di kapal, salah satu alat penukar kalor yang umumnya digunakan adalah tipe selongsong dan pipa (*shell and tube heat*

exchanger). Penukar kalor tipe *shell and tube heat exchanger* mempunyai nilai efektifitas secara umum di kisaran 25% sampai dengan 40%. Dari hal ini banyak muncul penukar kalor tipe baru, salah satu tipe baru tersebut yaitu sebuah rancangan *keel cooler*.

Keel cooling system adalah sistem pendingin yang memakai *keel*. *Keel* adalah bagian sistem pendingin yang ditaruh di luar lambung kapal. Sistem pendingin dengan menggunakan *keel cooler* merupakan salah satu sistem pendingin sirkuit tertutup yang dipasang secara eksternal pada lambung kapal di bawah permukaan air. Konsep pendinginan lunas mirip dengan penerapan radiator pada mobil. Pendingin mesin disirkulasikan melalui pendingin lunas, yang memindahkan panas dari pendingin sebelum kembali ke mesin. Pendingin lunas berada dalam kontak konstan dengan air laut yang memungkinkan sistem pendingin mentransfer panas secara efisien antara pendingin dan air laut.

Kapal OT. Skylie merupakan salah satu jenis kapal tanker yang dibuat oleh PT. Samudra Marine Indonesia, jika pada umumnya kapal konvensional menggunakan *cooler* sebagai sistem pendingin mesin, namun dalam pembangunan kapal OT. Skylie ini mengaplikasikan *keel cooler* sebagai alat pendingin mesin utama penggerak kapal.

Pada penelitian ini jenis penukar kalor yang digunakan adalah *keel cooler* yang peletakkannya di luar lambung kapal. *Keel cooler* ini merupakan salah satu alat penukar kalor tipe baru yang diaplikasikan di dunia perkapalan, dan telah diteliti sebelumnya mengenai efektifitas dari *keel cooler* ini. Dari sinilah penulis ingin mengembangkan penelitian tersebut setelah didapatkan nilai efektifitas *keel cooler*, apakah dimensi kapal yang digunakan sekarang sudah sangat efisien digunakan atau tidak. Untuk itu, penulis ingin mengembangkan penelitian ini dengan memvariasi dimensi panjang dari *keel cooler system* dan ingin mengetahui dimensi panjang yang optimum, maka perlu dilakukan penelitian dengan judul: **“Optimasi Keel Cooler Pada Sistem Pendingin Mesin Penggerak Utama Kapal”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

1. Berapa nilai perpindahan panas menyeluruh dari alat penukar kalor *Keel Cooler system* terhadap mesin utama kapal?
2. Bagaimana dimensi panjang *Keel Cooler* yang optimum pada sistem pendingin kapal?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui nilai perpindahan panas menyeluruh dari alat penukar kalor *keel cooler system* terhadap mesin utama kapal.
2. Untuk mengetahui dimensi Panjang *Keel Cooler* yang optimum pada sistem pendingin kapal.

1.4 Manfaat Penulisan

Dalam penelitian yang akan dilakukan ini, maka penulis mengemukakan beberapa manfaat dari penelitian ini, diantaranya :

1. Dapat menjadi inovasi terbaru dari alat penukar kalor yang digunakan pada sistem pendingin mesin utama kapal
2. Dapat dikembangkan dan digunakan di industri perkapalan.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan

Terkait dengan permasalahan di atas, maka perlu adanya pembatasan masalah agar sesuai dengan permasalahan dan tujuan yang diharapkan, serta dapat mempermudah dalam melakukan analisa. Adapun batasan masalah yang di bahas sebagai berikut :

1. Penelitian ini akan memfokuskan pada perubahan variasi dimensi *keel cooler* untuk mendapatkan panjang yang optimal menggunakan data kapal OT. Skyline yang dibuat oleh PT. Samudra Marine Indonesia
2. Dua mesin penggerak kapal merek CUMMINS KTA 50 – M2, yang didinginkan dengan menggunakan *keel cooler system*, dan sesuai dimensi yang berada di lapangan atau data yang diberikan.
3. Temperatur mesin yang digunakan pada beberapa kondisi *power/torque*, diperoleh dari hasil pengujian mesin utama secara langsung dilapangan.

4. Pada penelitian ini digunakan *power/torque* pada kondisi 100% dengan temperature 82°C
5. Analisis fouling factor pada material *keel cooler system* diabaikan.
6. Kecepatan Aliran diluar pipa dianggap konstan. Kecepatan aliran Haluan diabaikan.
7. Simulasi pada Ansys hanya untuk mengetahui nilai temperature dan distribusi panas pada *keel cooler system*.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pendingin

Di atas kapal sering kali ditemukan sistem pendingin tidak langsung pada mesin dieselnnya. Sistem pendingin tidak langsung ini merupakan sistem pendingin mesin yang menggunakan *fresh water* yang berikan *additive* sebagai media untuk mendinginkan mesin, kemudian *fresh water* ini di dinginkan oleh air laut. Sistem pendingin yang tidak langsung didinginkan air laut membuat mesin relatif tahan terhadap korosi. Sedangkan untuk komponen yang berfungsi mendinginkan air tawar umumnya disebut *heat exchanger fresh water cooler* (Julianto, 2019).

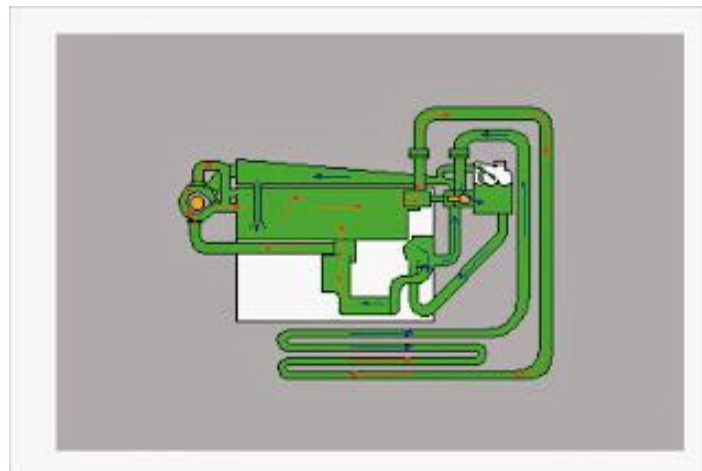
Fresh water cooler, alat ini berfungsi mendinginkan air pendingin yang telah menyerap panas dari dalam mesin dengan menggunakan media air laut. Sistem pendingin mesin induk yaitu sistem pendingin terbuka, ini adalah air dari luar kapal yang dipompakan kedalam motor dan selanjutnya dibuang kembali keluar badan kapal. Sistem pendinginan tertutup adalah air tawar yang mendinginkan mesin selanjutnya air tawar membawah panas didinginkan oleh air laut. Bahan pendingin mesin induk, air laut berfungsi sebagai bahan pendingin memiliki beberapa sifat yang menguntungkan, seperti massa jenis besar pada kepekatan relatif tinggi. Ini berarti bahwa per satuan volume dapat ditampung panas yang besar.

Pada umumnya, pendingin di mesin kapal menggunakan *heat exchanger*. Ini merupakan alat yang digunakan untuk memindahkan panas dari sistem ke sistem lain tanpa perpindahan massa dan bisa berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Biasanya, medium pemanas dipakai adalah air yang dipanaskan sebagai fluida panas dan air biasa sebagai air pendingin (*cooling water*). Penukar panas dirancang sebisa mungkin agar perpindahan panas antar fluida dapat berlangsung secara efisien. Pertukaran panas terjadi karena adanya kontak, baik antara fluida terdapat dinding yang memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung (*direct contact*). Proses pendinginan pada *heat exchanger* menggunakan media air (air laut) guna mempercepat perubahan suhunya. Sehingga akan terjadi perbedaan temperatur yang cukup signifikan saat proses pendinginan di *heat exchanger* (Holman J.P, 1986).

2.2 Sistem Pendingin dengan *Keel Cooler*

Keel cooling system adalah sistem pendingin yang memakai *keel*. *Keel* adalah bagian sistem pendingin yang ditaruh di luar lambung kapal. Sistem pendingin dengan menggunakan *keel cooler* merupakan salah satu sistem pendingin sirkuit tertutup yang dipasang secara eksternal pada lambung kapal di bawah permukaan air. Konsep pendinginan lunas mirip dengan penerapan radiator pada mobil. Pendingin mesin disirkulasikan melalui pendingin lunas, yang memindahkan panas dari pendingin sebelum kembali ke mesin. Pendingin lunas berada dalam kontak konstan dengan air laut yang memungkinkan sistem pendingin mentransfer panas secara efisien antara pendingin dan air laut.

Sistem *keel cooler* memiliki komponen-komponen yang hampir sama dengan yang konvensional. Ada pompa air (*water pump*), lubang aliran air, expansion tank tempat dimana dipasang pengatur suhu (*temperature regulator*). Air pendingin mengalir melalui keel cooler. *Keel cooler* adalah tabung-tabung yang dililitkan atau dilas ke lambung kapal. Air mengalir dari expansion tank, ke pompa air (*water pump*), terus mengalir ke *engine* dan *keel cooler*, dimana air laut mendinginkan air pendingin.



Gambar 1 *Keel Cooler*
Sumber: *Maritimeworld*, 2013

Cara kerja dari sistem pendingin *keel cooler*, yaitu dengan cara memindahkan panas dari pendingin sebelum kembali ke mesin. Pendingin lunas selalu bersentuhan dengan air laut untuk mentransfer panas secara efisien.

Keuntungan Dibandingkan dengan sistem pendingin sirkuit terbuka (penukar panas dalam), sistem pendingin sirkuit tertutup memberikan beberapa keuntungan

berbeda. Sistem pendingin sirkuit tertutup meniadakan kebutuhan akan penukar panas internal, pompa air mentah, saringan, perpipaan air laut, dan perawatan tinggi yang terkait dengan sistem pendingin sirkuit terbuka. Ini juga menghilangkan penumpukan lumpur dan pasir di sirkuit pendingin dan melindungi sistem dari korosi air asin. Penggunaan pendingin lunas menghilangkan kebutuhan air laut untuk masuk ke lambung kapal. Dari perspektif ramah lingkungan, pendinginan lunas memberikan solusi pembuangan nol yang menghilangkan kemungkinan kontaminan memasuki air laut.

2.3 Proses Perpindahan Kalor

Perpindahan panas merupakan ilmu untuk meramalkan perpindahan energi dalam bentuk panas yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material. Dalam proses perpindahan energi tersebut tentu ada kecepatan perpindahan panas yang terjadi, atau yang lebih dikenal dengan laju perpindahan panas. Maka ilmu perpindahan panas juga merupakan ilmu untuk meramalkan laju perpindahan panas yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu. Perpindahan kalor dapat didefinisikan sebagai suatu proses berpindahnya suatu energi (kalor) dari satu daerah ke daerah lain akibat adanya perbedaan temperatur pada daerah tersebut. Ada tiga bentuk mekanisme perpindahan panas yang diketahui, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi (Suswanto dkk, 2015).

Ilmu perpindahan panas sangat berguna sekali dalam merencanakan alat-alat penukar panas. Kegunaan antara lain adalah:

1. Untuk merencanakan alat-alat penukar panas (heat exchanger).
2. Untuk menghitung kebutuhan media pemanas/pendingin pada suatu reboiler atau kondensor dalam kolom destilasi.
3. Untuk menghitung furnace/dapur yang menggunakan konsep perpindahan panas radiasi.
4. Untuk perencanaan ketel uap/boiler.
5. Untuk perancangan alat-alat penguap (evaporator).
6. Untuk perancangan reaktor kimia.

Peristiwa perpindahan panas sangat banyak dijumpai dalam industri, misalnya pemanfaatan panas yang terbawa hasil akhir ataupun hasil antara untuk memanaskan

umpan yang akan masuk ke reaktor dalam sebuah alat penukar panas, perpindahan panas dari sebuah pipa uap ke udara, pembuangan panas pada sebuah pembangkit tenaga.

2.4 Perpindahan Kalor Secara Konduksi

Perpindahan kalor secara konduksi adalah proses perpindahan kalor dimana kalor mengalir dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur rendah dalam suatu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung sehingga terjadi pertukaran energi dan momentum (Holman J.P.,1986)

$$q_k = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Keterangan:

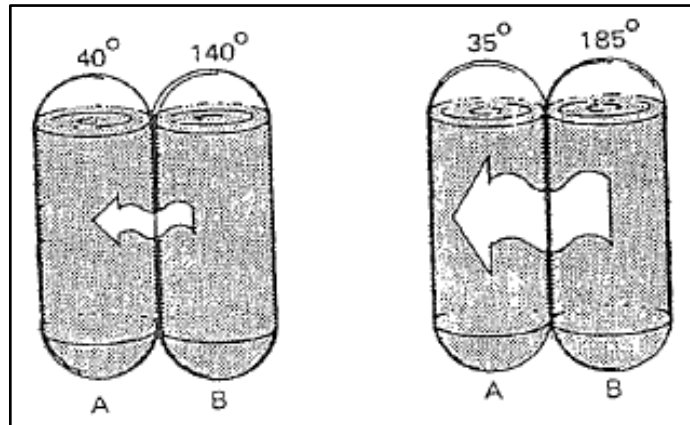
q_k = Laju Perpindahan Panas (kj / det, W)

k = Konduktifitas Termal (W/m.°C)

ΔT = *Gardient temperature* kearah perpindahan kalor (°C)

L = Panjang medium (m)

Perpindahan panas secara konduksi tidak hanya terjadi pada padatan saja tetapi bisa pada cairan ataupun gas, hanya saja konduktivitas terbesar ada pada padatan. Jadi, Konduktivitas padatan > konduktivitas cairan dan gas. Jika media perpindahan panas konduksi berupa cairan, molekul-molekul cairan yang suhunya tinggi akan bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi daripada molekul cair yang suhunya lebih rendah. Jika ada perbedaan suhu, molekul-molekul pada daerah yang suhunya tinggi akan memberikan panasnya kepada molekul yang suhunya lebih rendah pada saat terjadi tumbukan dengan molekul yang suhunya lebih rendah, untuk kecepatan gerak molekul cairan lebih lambat daripada molekul gas walaupun jarak antara molekul-molekul pada cairan lebih pendek daripada jarak antara molekul berupa gas.



Gambar 2 Perpindahan Panas Konduksi Di Bahan Cair Dengan Suhu Berbeda
Sumber : M.N. Ozisik, 1885.

Tabel 1 Konduktivitas Termal Bahan Logam dan Zat Cair

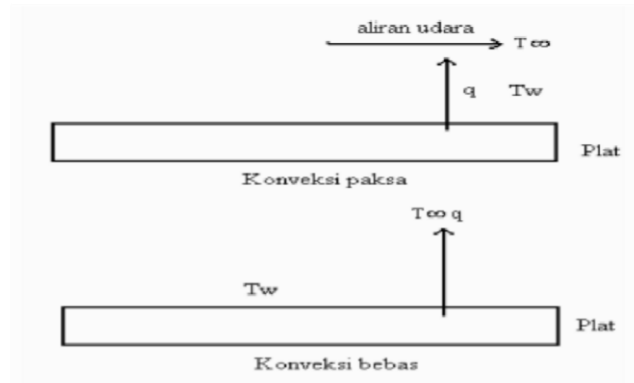
Konduktivitas Termal (k)	
Bahan	W/m°C
Logam	
CuZn (Kuningan)	109
Zn (Zink)	122
Sn (Timah)	68,2
Al (Aluminium)	205
Zat Cair	
Air Tawar	0,66
Air Laut	0,615

Sumber: Bueches F.J, 2014.

2.5 Perpindahan Kalor Secara Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas karena adanya gerakan/aliran/ pencampuran dari bagian panas ke bagian yang dingin. Contohnya adalah kehilangan panas dari radiator mobil, pendinginan dari secangkir kopi dll. Menurut cara menggerakkan alirannya, perpindahan panas konveksi diklasifikasikan menjadi dua, yakni konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Bila gerakan fluida disebabkan karena adanya perbedaan kerapatan karena perbedaan suhu, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi bebas (*free/natural convection*). Bila

gerakan fluida disebabkan oleh gaya pemaksa/eksitasi dari luar, misalkan dengan pompa atau kipas yang menggerakkan fluida sehingga fluida mengalir di atas permukaan, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa (*forced convection*).



Gambar 3 Perpindahan Panas Konveksi
Sumber: J.P.Holman

Proses pemanasan atau pendinginan fluida yang mengalir didalam saluran tertutup seperti pada gambar 2.4 merupakan contoh proses perpindahan panas. Laju perpindahan panas pada beda suhu tertentu dapat dihitung dengan persamaan: (Cengel, Yunus A., 2002)

$$q = hA (\Delta_{LMTD}) \quad (2)$$

Keterangan :

Q = Laju Perpindahan Panas (kj/det atau W)

h = Koefisien perpindahan Panas Konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A = Luas Bidang Permukaan Perpindahan Panas (ft^2, m^2)

Δ_{LMTD} = beda suhu keseluruhan rata-rata logaritmik

Bahan yang mempunyai konduktivitas yang baik disebut dengan konduktor misalnya logam (Tembaga, aluminium, perak, dsb). Sedangkan bahan yang mempunyai konduktivitas jelek disebut dengan isolator, contohnya adalah asbes, wol, kaca, dsb (Bueche F.J, 2014).

2.6 Tahanan Termal di Dalam dan di Luar Pipa

Dua fluida yang mengalir sering dipisahkan oleh dinding padat dalam penukar panas. Konveksi digunakan untuk pertama memindahkan panas dari cairan panas ke

dinding, diikuti oleh konduksi melalui dinding dan kemudian konveksi kembali ke cairan dinding. Koefisien perpindahan panas konveksi biasanya mencakup efek radiasi. Dua resistensi konveksi dan satu resistensi membentuk resistensi termal yang terhubung ke proses perpindahan panas. (Ozisik M.N., 1985)

$$R_{wall} = \frac{\ln(D_o - D_i)}{2 \times \pi \times k \times l} \quad (3)$$

Didalam L adalah Panjang tabung dan k adalah konduktivitas termal bahan dinding. Resistensi termal keseluruhan kemudian berubah menjadi:

$$R = R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o = \frac{\ln(D_o - D_i)}{2 \times \pi \times k \times l} + \frac{1}{h_o \times A_o} \quad (4)$$

Hubungan umum antara koefisien perpindahan panas yang diatas hanya berlaku untuk permukaan yang bersih. Sedangkan untuk memperhitungkan efek fouling perlu dilakukan perubahan, kemudian untuk shell and tube, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{1}{U \times A_s} = \frac{1}{U_i \times A_i} = \frac{1}{U_o \times A_o} = R = R_{total} = R_i + R_o = \frac{1}{h_i \times A_i} + \frac{\ln(D_o - D_i)}{2 \times \pi \times k \times l} + \frac{R_f}{A} + \frac{1}{h_o \times A_o} \quad (5)$$

Koefisien perpindahan panas menyeluruh yang terjadi pada permukaan tabung dalam aplikasi penukar panas dapat digambarkan sebagai perpindahan panas keseluruhan yang mana sangat bergantung pada permukaan luar tabung:

$$U_{total} = \frac{1}{\left(\frac{D_o}{D_i}\right)\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{D_o}{D_i}\right)F_i + \left[\frac{D_o}{2k}\right] \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) + F_o + 1/h_o} \quad (6)$$

Nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan sangat bervariasi untuk berbagai jenis aplikasi. (M.N. Ozisik, 1985, "Heat Transfer").

2.7 Beda Suhu Rata-Rata

Suhu fluida didalam penukar panas pada umumnya tidak konstan, tetapi berbeda dari satu titik ke titik lainnya pada waktu panas mengalir dari fluida yang lebih dingin, maka dari itu untuk tahanan termal yang konstan pun laju aliran panas akan berbeda-beda sepanjang lintasan penukar kalor harganya tergantung pada beda suhu antara fluida dan dinding yang penampang tertentu. Untuk menghitung perpindahan kalor dalam suatu alat penukar kalor dinyatakan dengan persamaan: (Holman J.P., 1986)

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{[(T_{hin} - T_{cout}) - (T_{hout} - T_{cin})]}{\ln[(T_{hin} - T_{cout}) / (T_{hout} - T_{cin})]} \quad (7)$$

Dimana :

T_{hin} = Temperatur fluida panas masuk ($^{\circ}C$)

T_{hout} = Temperatur fluida panas keluar ($^{\circ}C$)

T_{cin} = Temperatur fluida dingin masuk ($^{\circ}C$)

T_{cout} = Temperatur fluida dingin keluar ($^{\circ}C$)

2.8 Tipe-Tipe Heat Exchanger Berdasarkan Susunana Aliran Fluida

Berdasarkan susunan aliran fluida yang dimaksud di sini adalah berapa kali fluida mengalir disepanjang penukar kalor sejak saat fluida masuk ke pipa hingga meninggalkannya pipa, serta bagaimana arah aliran relatif antara kedua fluida (apakah sejajar atau *parallel*, berlawanan arah atau *counter*, dan bersilangan atau *cross*). Berdasarkan berapa kali fluida melalui penukar kalor dibedakan jenis satu kali laluan atau satu laluan dengan multi atau banyak.

Pada jenis satu laluan, masih terbagi ke dalam tiga tipe berdasarkan arah aliran dari fluida yaitu:

1. Penukar Kalor Tipe Aliran Berlawanan

Penukar kalor tipe aliran berlawanan yaitu bila kedua fluida mengalir dengan arah yang saling berlawanan. Pada tipe ini masih mungkin terjadi bahwa temperatur fluida yang menerima kalor saat keluar penukar kalor lebih tinggi dibanding temperatur fluida yang memberikan kalor saat meninggalkan penukar kalor. Bahkan idealnya apabila luas permukaan perpindahan kalor adalah tak berhingga dan tidak terjadi rugi-rugi kalor ke lingkungan, maka temperatur fluida yang menerima kalor saat keluar dari penukar kalor bisa menyamai temperatur fluida yang memberikan kalor saat memasuki penukar kalor. Dengan teori seperti ini jenis penukar kalor berlawanan arah merupakan penukar kalor yang paling efektif.

2. Penukar Kalor Tipe Aliran Sejajar

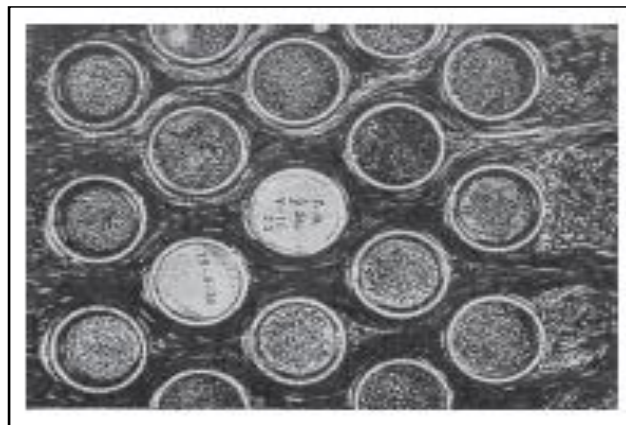
Penukar kalor tipe aliran sejajar yaitu bila arah aliran dari kedua fluida di dalam penukar kalor adalah sejajar. Artinya kedua fluida masuk pada sisi yang satu dan keluar dari sisi yang lain. Pada jenis ini temperatur fluida yang memberikan energi akan selalu lebih tinggi dibanding yang menerima energi sejak mulai memasuki penukar kalor hingga keluar. Dengan demikian temperatur fluida yang menerima kalor tidak akan pernah mencapai temperatur fluida yang

memberikan kalor saat keluar dari penukar kalor. Jenis ini merupakan penukar kalor yang paling tidak efektif. T1 dan T2 dalam tipe aliran berlawanan arah berbeda, hal tersebut disebabkan karena arah aliran yang berbeda.

3. Aliran Silang pada kumpulan-kumpulan pipa

Cross flow pada tube bank umumnya dijumpai dalam praktik pada peralatan perpindahan panas seperti kondensor dan evaporator pembangkit listrik, lemari es, dan pendingin udara. Dalam peralatan seperti itu, satu fluida bergerak melalui tabung sedangkan fluida lainnya bergerak di atas tabung dalam arah tegak lurus. Dalam penukar panas yang melibatkan kumpulan pipa, biasanya ditempatkan dalam *shell* (dan dengan demikian disebut penukar panas *shell-and-tube*), terutama bila fluida adalah cairan, dan fluida mengalir melalui ruang antara pipa dan cangkangnya. Ada banyak jenis penukar panas *shell-and-tube*.

Aliran melalui tabung dapat dianalisis dengan mempertimbangkan aliran melalui satu pipa, dan mengalikan hasilnya dengan jumlah pipa. Ini tidak terjadi untuk aliran di atas pipa, karena pipa mempengaruhi pola aliran dan tingkat turbulensi di hilir, dan dengan demikian perpindahan panas ke atau dari mereka, seperti yang ditunjukkan pada (gambar 4) di bawah. Oleh karena itu, saat menganalisis perpindahan panas dari kumpulan pipa dalam aliran silang, kita harus mempertimbangkan semua pipa dalam bundel sekaligus. Kumpulan pipa biasanya disusun sejajar atau silang. Diameter pipa luar D diambil sebagai panjang karakteristik. Susunan pipa pada kumpulan pipa dicirikan oleh *pitch transversal* (S_T), *pitch longitudinal* (S_L), dan *pitch diagonal* (S_D) antar pusat pipa.



Gambar 4 *Cross Flow Tube Bank*
(sumber : Cengel, Yunus A., 2002)

Saat fluida memasuki area pada kumpulan pipa, luas aliran berkurang dari $\Delta 1 = S_T L$ menjadi $\Delta T = (S_T - D) L$ antara pipa, dan dengan demikian kecepatan aliran meningkat. Dalam pengaturan pipa yang silang, kecepatan dapat meningkat lebih jauh di wilayah diagonal jika baris tabung sangat dekat satu sama lain. Di kumpulan pipa, karakteristik aliran didominasi oleh kecepatan maksimum V_{max} yang terjadi di dalam kumpulan pipa daripada kecepatan pendekatan V . Oleh karena itu, bilangan Reynolds didefinisikan berdasarkan kecepatan maksimum sebagai berikut: (Ozisik M.N., 1985)

$$RE_D = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} = \frac{V_{max} D}{\nu} \quad (8)$$

Dapat digunakan pendekatan diameter hidrolis sebagai berikut: (Holman J.P., 1986)

$$D_h = 4 \frac{A}{P} \quad (9)$$

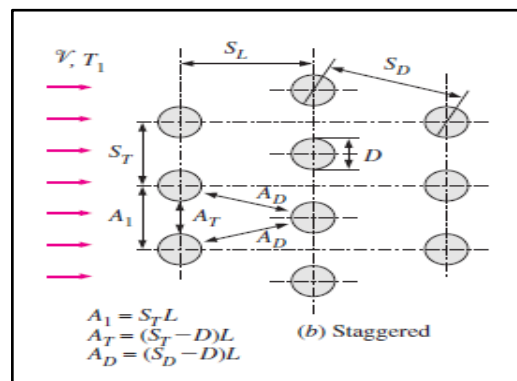
Untuk perhitungan luas selubung pipa bentuk balok, dapat digunakan persamaan sebagai berikut: (saintif.com)

$$A = 2 \times (pl + pt + lt) \quad (10)$$

Sementara itu, untuk perhitungan perimeter (keliling) pada pipa bentuk balok, dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = 4(p+l+t) \quad (11)$$

Dalam susunan pipa silang, fluida yang mendekati area A_1 pada (Gambar 2.5)



Gambar 5 arrangement Of Tube In Cross Flow Tube Bank
(sumber : Cengel, Yunus A., 2002 "Heat Transfer" Hal.390)

Ketika pipa-pipa tidak terlalu dekat satu sama lain, maka sifat aliran di sekitar pipa pada baris pertama mirip dengan sifat aliran diatas pipa tunggal. Akibatnya, setiap pipa dikolom pipa terdiri dari baris yang berada dalam aliran silang, dapat dianggap sebagai pipa tunggal. Namun, karena turbulensi yang dibawa oleh pipa

ke hulu, karakteristik aliran disekitar pipa pada baris kedua dan berikutnya secara substansial berbeda.

Jumlah Nusselt rata-rata untuk tabung cross-bank telah menjadi subyek dari beberapa hipotesis hubungan, semua berdasarkan bukti eksperimental. Zukauskas baru-baru ini mengajukan korelasi dengan bentuk umum sebagai berikut:

$$NU_D = \frac{h \cdot D}{k} = C Re_D Pr^n (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (12)$$

Dimana nilai konstanta C, m, dan n bergantung pada nilai bilangan Reynolds. Korelasi seperti itu diberikan pada Tabel 2 secara eksplisit untuk $0,7 < Pr < 500$ dan $0 < Re_D < 2 \times 10^6$.

Tabel 2 *Nusselt Number Correlations for cross Flow over tube banks for $N > 16$ and $0,7 < Pr < 500$ (form Zukauskas, Ref. 15, 1987)*

<i>Arrangement</i>	<i>Range Of ReD</i>	<i>Correlation</i>
<i>In - Line</i>	0 - 100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	100 - 1000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000- 2×10^5	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
<i>Staggered</i>	0 - 500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500 - 1000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1000- 2×10^5	$Nu_D = 0.35 (S_T / S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.031 (S_T / S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

Sumber : Cengel, Yunus A., 2002 "Heat Transfer" Hal.391

Laju perpindahan panas dapat ditentukan dari hukum pendinginan Newton menggunakan perbedaan suhu yang sesuai ΔT . Pikiran pertama yang terlintas dalam pikiran adalah menggunakan $\Delta T = T_s - T_m = T_s - (T_i + T_e) / 2$. Tapi ini akan, secara umum, memprediksi laju perpindahan panas. Kami akan menunjukkan di bab berikutnya bahwa perbedaan suhu yang tepat untuk aliran internal adalah perbedaan suhu rata-rata logaritmik ΔT_{ln} didefinisikan sebagai berikut:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_s - T_e) - (T_s - T_i)}{\ln \frac{(T_s - T_e)}{(T_s - T_i)}} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_e - \Delta T_i)} \quad (13)$$

Untuk mencari nilai suhu keluar fluida T_e dapat ditentukan

$$T_e = T_s - (T_s - T_i) \exp\left(-\frac{A_s h}{\dot{m} C_p}\right) \quad (14)$$

Dimana $A_s = N\pi DL$ adalah luas permukaan perpindahan panas dan $\dot{m} = \rho V (N_T S_T L)$ adalah laju aliran massa fluida. Disini N_T adalah jumlah tabung di bank, N_T adalah jumlah tabung di bidang melintang, L adalah panjang tabung, dan V adalah kecepatan fluida sebelum memasuki bank tabung. Kemudian laju perpindahan panas dapat ditentukan dari : (cengel, Yunus, 2002)

$$\bar{Q} = h A_s \Delta T_{ln} = \dot{m} C_p (\Delta_{LMTD}) \quad (15)$$

2.9 Aliran Didalam Pipa

Aliran viskos dapat dibedakan menjadi 2 (dua) tipe yaitu aliran turbulen dan aliran laminer. Dalam aliran turbulen gerak partikel-partikel zat cair tidak teratur. Aliran ini terjadi apabila kecepatan aliran besar dan kekentalan zat cair kecil. Pada aliran laminer partikel-partikel zat cair bergerak teratur mengikuti lintasan yang saling sejajar. Aliran ini terjadi apabila kecepatan kecil dan kekentalan besar.

2.9.1 Aliran turbulen di dalam Pipa

Telah disebutkan sebelumnya bahwa aliran dalam tabung halus sepenuhnya bergolak untuk $10.000 Re$. Aliran turbulen umumnya digunakan dalam praktik karena koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi yang terkait dengannya. Kebanyakan korelasi untuk koefisien gesekan dan perpindahan panas dalam aliran turbulen didasarkan pada studi eksperimental karena kesulitan dalam menangani aliran turbulen secara teoritis.

Untuk tabung halus, faktor gesekan dalam aliran turbulen dapat ditentukan dari persamaan Petukhov pertama yang eksplisit [Petukhov (1970), Ref. 21] diberikan sebagai berikut, (Ozisik M.N., 1985)

$$\text{Tabung halus: } f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad 10^4 < Re < 10^6 \quad (16)$$

Bilangan Nusselt dalam aliran turbulen terkait dengan faktor gesekan melalui analogi Chilton-Colburn yang dinyatakan sebagai

$$Nu = 0,125 f Re Pr^{1/3} \quad (17)$$

Setelah faktor gesekan tersedia, persamaan ini dapat digunakan dengan mudah untuk mengevaluasi bilangan Nusselt untuk tabung halus dan kasar. Untuk aliran turbulen

yang berkembang sepenuhnya dalam tabung halus, hubungan sederhana untuk bilangan Nusselt dapat diperoleh dengan mengganti hubungan hukum pangkat sederhana $f = 0,184 Re^{-0,2}$ untuk faktor gesekan ke Persamaan.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (0.7 < Pr < 160, Re > 10.000) \quad (18)$$

Yang dikenal sebagai persamaan Colburn. Akurasi persamaan ini dapat ditingkatkan dengan memodifikasinya sebagai

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^n \quad (19)$$

Dimana $n = 0,4$ untuk pemanasan dan $0,3$ untuk pendinginan fluida yang mengalir melalui tabung. Persamaan ini dikenal sebagai persamaan Dittus – Boelter [Dittus and Boelter (1930), Ref. 6] dan ini lebih disukai daripada persamaan Colburn.

Sifat fluida dievaluasi pada temperatur fluida rata-rata $T_b = (T_i + T_e) / 2$. Jika perbedaan suhu antara fluida dan dinding sangat besar, mungkin perlu menggunakan faktor koreksi untuk menjelaskan perbedaan viskositas di dekat dinding dan di tengah tabung.

Hubungan di atas tidak terlalu sensitif terhadap kondisi termal pada permukaan tabung dan dapat digunakan untuk kasus $T_s = \text{konstanta}$ dan $q_s = \text{konstanta}$. Terlepas dari kesederhanaannya, korelasi yang telah disajikan memberikan hasil yang cukup akurat untuk sebagian besar tujuan teknik. Mereka juga dapat digunakan untuk memperoleh perkiraan kasar dari faktor gesekan dan koefisien perpindahan panas di daerah transisi $2300 < Re < 10.000$, terutama bila bilangan Reynolds lebih dekat ke 10.000 daripada ke 2300 .

2.9.2 Aliran laminar di dalam pipa

Kami telah menyebutkan sebelumnya bahwa aliran dalam tabung adalah laminar untuk $Re < 2300$, dan aliran berkembang sepenuhnya jika tabung cukup panjang (relatif terhadap panjang masuk) sehingga efek masuk dapat diabaikan. Pada bagian ini kami mempertimbangkan aliran laminar yang stabil dari fluida yang tidak dapat dimampatkan dengan sifat konstan di wilayah yang berkembang penuh dari tabung lingkaran lurus. Kami memperoleh persamaan momentum dan energi dengan menerapkan keseimbangan momentum dan energi ke elemen volume diferensial, dan memperoleh profil kecepatan dan suhu dengan menyelesaikannya. Kemudian kita akan menggunakannya untuk mendapatkan hubungan faktor gesekan dan bilangan

Nusselt. Aspek penting dari analisis di bawah ini adalah bahwa ini adalah salah satu dari sedikit yang tersedia untuk aliran kental dan konveksi paksa.

Dalam aliran laminar yang berkembang sepenuhnya, setiap partikel fluida bergerak dengan kecepatan aksial konstan sepanjang garis aliran dan profil kecepatan $V(r)$ tetap tidak berubah dalam arah aliran. Tidak ada gerakan pada arah radial, dan dengan demikian komponen kecepatan v pada arah normal mengalir adalah nol dimana-mana. Tidak ada percepatan karena alirannya stabil.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa jenis aliran fluida dapat diketahui dari Reynold numbernya. Dan untuk menghitung Reynold number, dapat digunakan persamaan: (Cengel, Yunus A., 2002)

$$Re = \frac{\rho \times v_i \times D_i}{\mu} \quad (20)$$

Dimana:

- Re = Reynold number
- P = Massa jenis fluida (Kg/m^3)
- v = Kecepatan Fluida (m/s)
- μ = Viskositas dinamik fluida (kg/m.s)

2.10 Metode Efektivitas – NTU

Metode perbedaan suhu rata-rata log (LMTD) analisis ini mudah digunakan dalam menganalisis penukar panas ketika suhu masuk dan keluar cairan panas dan dingin diketahui atau dapat ditentukan dari neraca energi. Setelah ΔT_{LMTD} , laju aliran massa, dan koefisien perpindahan panas keseluruhan tersedia, luas permukaan perpindahan panas dari penukar panas dapat ditentukan dari rumus oleh karena itu, metode LMTD sangat cocok untuk menentukan ukuran penukar panas untuk mewujudkan suhu keluaran yang ditentukan ketika laju aliran massa dan suhu masuk dan keluar dari fluida panas dan dingin ditentukan.

Metode LMTD masih dapat digunakan untuk masalah alternatif, tetapi prosedur tersebut membutuhkan pengulangan yang membosankan, dan oleh karena itu tidak praktis. Dalam upaya untuk menghilangkan iterasi dari solusi masalah seperti itu, Kays dan London menemukan metode pada tahun 1955 yang disebut metode efektivitas-NTU, yang sangat menyederhanakan analisis penukar panas. Metode ini didasarkan

pada parameter tak berdimensi yang disebut efektivitas perpindahan panas ϵ , yang didefinisikan sebagai Hubungan efektivitas dari penukar panas biasanya melibatkan UA / C_{min} grup tanpa dimensi. Kuantitas ini disebut jumlah unit transfer NTU dan dinyatakan sebagai:

$$NTU = \frac{UAs}{C_{min}} = \frac{UAs}{(\dot{m}C_p)_{min}} \quad (21)$$

dimana U adalah koefisien perpindahan panas keseluruhan dan As adalah luas permukaan perpindahan panas dari penukar panas. Perhatikan bahwa NTU sebanding dengan As. Oleh karena itu, untuk nilai U dan C_{min} yang ditentukan, nilai NTU adalah ukuran luas permukaan perpindahan panas As. Jadi, semakin besar NTU, semakin besar heat exchangernya. Hubungan efektivitas telah dikembangkan untuk sejumlah besar penukar panas, dan hasilnya disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 3 *Effectiveness Relations For Heat Exchangers*

No	Heat Exchanger Type	Effectiveness Relation
1	Dauble Pipe Parallel – Flow	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1+c)]}{1+c}$
	Counter – Flow	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-c)]}{1 - \exp[-NTU(1-c)]}$
2	Shell and tube One – shell pass 2,4,... tube passes	$\epsilon = 2 \left\{ 1 + c + \sqrt{1 + c^2} \frac{1 + \exp[-NTU\sqrt{1+c^2}]}{1 + \exp[-NTU\sqrt{1+c^2}]} \right\}^{-1}$
3	Cross - Flow (Singel - pass) Both Fluids unmixed	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ \frac{NTU^{0,22}}{c} \left[\exp(-c NTU^{0,78}) - 1 \right] \right\}$
	Cmax Mixed,	$\epsilon = \frac{1}{c} (1 - \exp \{ 1 - c [1 - \exp(-NTU)] \})$
	Cmin unmixed	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{c} [1 - \exp(-NTU)] \right\}$
	Cmin mixed	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{c} [1 - \exp(-NTU)] \right\}$
4	All heat exchangers with $c = 0$	$\epsilon = 1 - \exp(-NTU)$

Sumber : Cengel, Yunus A., 2002 "Heat Trasfer" Hal.694

$$\epsilon = \epsilon_{max} = 1 \exp(-NTU) \quad (22)$$

Pendekatan LMTD dalam analisis penukar kalor berguna jika temperatur masuk dan keluar diketahui sehingga LMTD dapat dihitung, aliran kalor, luas permukaan dan koefisien perpindahan kalor menyeluruh. Metode efektifitas mempunyai beberapa

keuntungan dalam menganalisis serta memilih jenis yang terbaik. Efektivitas penukar kalor (*Heat Exchanger Effectivities*) didefinisikan sebagai:

LMTD (*Log Mean Temperature Difference*)

Pada aliran sejajar, dua fluida masuk bersama2 dalam alat penukar kalor, bergerak dalam arah yang sama dan keluar bersama-sama pula. Sedangkan pada aliran berlawanan, dua fluida bergerak dengan arah yang berlawanan, dan pada aliran menyilang, dua fluida saling menyilang/bergerak saling tegak lurus. Untuk laju perpindahan-panas yang tidak menyangkut suhu-keluar yang manapun, kita menggunakan keefektifan penukar panas (*heat exchanger effectiveness*). Keefektifan penukar panas berdefinisi perbandingan laju perpindahan panas yang sebenarnya dalam penukar panas tertentu terhadap laju pertukaran panas maksimum yang mungkin. Dalam satuan tipe ini, jika tidak ada kerugian panas keluar, maka suhu-keluar fluida yang lebih dingin sama dengan suhu masuk fluida yang lebih panas bilamana $\dot{m}_c \cdot c_{pc} < \dot{m}_h \cdot c_{ph}$ bila $\dot{m}_h \cdot c_{ph} < \dot{m}_c \cdot c_{pc}$ maka suhu keluar fluida yang lebih panas sama dengan suhu masuk fluida yang lebih dingin. Dengan kata lain, keefektifan membandingkan laju perpindahan panas yang sebenarnya terhadap laju maksimum.

2.11 Aplikasi Desain Rhinoceros 6

Aplikasi CAD (Computer Aided Design) dan program grafis computer 3D yang disebut Rhino atau Rhino 3D, juga dikenal sebagai Rhinoceros, dibuat oleh Robert McNeel & Associates. Berbeda dengan aplikasi yang menggunakan jaring poligon, Geometri pada rhinoceros didasarkan pada model matematika NURBS (*Non-Uniform Rational Base Splines*), yang berfokus pada menghasilkan representasi kurva dan permukaan bebas yang akurat pada Grafik komputer. Perancangan alat penukar panas tipe *keel cooler* dideskripsikan menggunakan aplikasi 3D ini, yang kemudian digunakan sebagai baseline untuk pengukuran dimensi permukaan *keel coller* yang kemudian digunakan dalam persamaan perhitungan.

Fitur modular Rhinoceros dan Open SDK memungkinkan pengguna untuk secara bebas mengubah antarmuka, perintah, dan menu. Keterampilan Rhino dapat ditingkatkan dan dilengkapi dengan berbagai Plug-in dari McNeel dan penyedia perangkat lunak lain di bidang yang lebih khusus seperti rendering, animasi, arsitektur, teknik, maritim, dan banyak lainnya.



Gambar 6 Aplikasi Desain RhinoCeros 6

Format penyimpanan utama untuk Rhino adalah 3DM yang digunakan sebagai pengganti geometri NURBS yang memberikan pengembangan perangkat lunak secara tepat mengangkut geometri 3-D antar program. Untuk membuka dan membaca format penyimpanan pada platform yang didukung, open NURBS adalah program sumber terbuka yang mencakup format penyimpanan spesifikasi 3DM, dokumentasi, pustaka kode C++, dan NET 2.0 (*Microsoft Windows, Linux atau IOS*).

2.12 Software Ansys

Ansys adalah produk dari perusahaan ANSYS Inc, yang digunakan untuk simulasi dan desain teknik dari produk-produk 3D. Ansys merupakan sebuah paket permodelan elemen secara numerik dapat memecahkan masalah mekanis yang berbagai macam. Masalah yang ada mencakup analisa struktur statis dan dinamis baik linear dan non-linear, distribusi panas dan masalah cairan, begitu juga dengan ilmu bunyi dan masalah elektromagnetik. Teknologi ansys mekanis mempersatukan struktur dan material yang bersifat non-linear. Ansys merupakan tujuan utama dari paket permodelan elemen hingga untuk secara numerik memecahkan masalah mekanis yang berbagai macam. ANSYS multiphysic juga mengatasi masalah panas, struktur, elektromagnetik, dan ilmu bunyi. Ansys bekerja menggunakan metode *finite element* analysis dimana analisa suatu objek dilakukan dengan memecah objek tersebut menjadi bagian-bagian kecil (*Finite elements*) yang disebut *mesh* dan dihubungkan oleh node.

Dinamika fluida komputasi atau biasa dikenal dengan CFD adalah analisis sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena terkait seperti reaksi kimia melalui simulasi berbasis komputer. Teknik ini sangat kuat dan mencakup berbagai bidang aplikasi industri dan non-industri. Beberapa contohnya adalah aerodinamika pesawat dan kendaraan (angkat dan seret), hidrodinamika kapal, hidrodinamika pembangkit listrik kapal, teknik listrik dan elektronik, rekayasa proses kimia, teknik kelautan beban pada struktur lepas pantai, teknik lingkungan distribusi polutan dan limbah, meteorologi prediksi cuaca, rekayasa biomedis dan lain sebagainya.



Gambar 7 Aplikasi Ansys
(Sumber: <https://id.linkedin.com/company/ansys-inc>)