

Analisa Perhitungan Tabung Intercooler Pada Kompresor Udara Dua Tingkat

Arief Yulistianto^{1*}, Aryan Winanda^{1*}, Seno Adi Prayitno^{1*}, Taufan Firdhaus^{1*}

¹Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, DKI Jakarta, 12630, Indonesia

*Email Corresponding Author : arief.yulis@gmail.com, aryanwinanda@gmail.com, senoadiprayitno15@gmail.com, taufanfirdhaus@gmail.com,

ABSTRAK

Kompresor mempunyai peran sangat penting disemua industri manufaktur sebagai peralatan penghasil udara bertekanan. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi kompresor adalah menggunakan intercooler. Intercooler pada kompresor dua tingkat digunakan untuk mendinginkan udara dari kompresi kompresor tingkat pertama (LP) sebelum memasuki kompresor tingkat kedua (HP). Fungsi utamanya adalah untuk menurunkan suhu gas terkompresi antar tingkat, yang memiliki beberapa manfaat bagi efisiensi dan efektivitas proses kompresi. Karya ilmiah ini bertujuan untuk melakukan perhitungan untuk menentukan desain intercooler yang paling optimal pada kompresor dua tingkat. Oleh karena itu dibutuhkan analisa perhitungan untuk menentukan desain jumlah tabung intercooler yang paling optimal pada sistem kompresor udara 2 tingkat. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa dengan tekanan kompresor 36 bar, panjang maksimal tabung penukar kalor 1 meter dan diameter 10 mm, serta koefisien laju perpindahan panas sebesar 100 W/m²K, maka jumlah tabung yang diperlukan adalah sebanyak 21 buah.

Kata kunci : Desain thermal; Kompresor udara dua tingkat; Intercooler

ABSTRACT

Compressors have a very important role in all manufacturing industries as equipment to produce compressed air. One way to increase compressor efficiency is to use an intercooler. The intercooler on a two-stage compressor is used to cool the compressed air from the first stage compressor (LP) before entering the second stage compressor (HP). Its main function is to lower the temperature of the compressed gas between stages, which has several benefits for the efficiency and effectiveness of the compression process. This scientific work aims to carry out calculations to determine the most optimal intercooler design for a two-stage compressor. Therefore, a calculation analysis is needed to determine the most optimal design for the number of intercooler tubes in a 2-stage air compressor system. The calculation results show that with a compressor pressure of 36 bar, a maximum heat exchanger tube length of 1 meter and a diameter of 10 mm, and a heat transfer rate coefficient of 100 W/m²K, the number of tubes required is 21.

Keywords: Thermal design; Two stage air compressor; Intercooler

PENDAHULUAN

Di era modern saat ini, kompresor udara menjadi salah satu komponen vital dalam berbagai industry, mulai dari industry produksi maupun manufaktur. Kompresor udara digunakan untuk menghasilkan udara yang bertekanan tinggi yang diperlukan pada proses pengelasan, pengecatan alat pneumatic dan lainnya.

Aspek yang harus diperhatikan pada jurnal ini adalah desain kompresor udara yang melibatkan pemilihan dan pengaturan tabung intercooler sebagai peran pengatur transfer panas dan memastikan kinerja seluruh system.

Kompresor yang digunakan dalam penelitian ini adalah Kompresor Torak (Reciprocating Compressor) dimana perubahan volume ruang kerja diakibatkan oleh gerakan bolak-balik translasi dari torak (piston).

Pengertian Kompresor

Kompresor adalah mesin untuk memampatkan udara atau gas. Secara umum

biasanya mengisap udara dari atmosfer, yang secara fisika merupakan campuran beberapa gas dengan susunan 78% Nitrogen, 21% Oksigen dan 1% Campuran Argon, Carbon Dioksida, Uap Air, Minyak, dan lainnya.

Sebaliknya ada pula kompresor yang mengisap gas yang bertekanan lebih rendah dari pada tekanan atmosfer. Dalam hal ini kompresor disebut pompa vakum. Banyak alat dan cara untuk mengolah udara misalnya kompresor dengan tenaga manusia atau yang digerakan dengan mesin/motor. Udara mempunyai manfaat sangat luas sehingga banyak dibuat peralatan untuk menghasilkan udara bertekanan, seperti pengisian udara pada ban kendaraan dan alat kerja yang memanfaatkan tenaga pneumatik. Oleh karena itu udara dikelola agar dapat dikumpulkan atau ditampung, dipadatkan dan disimpan, bahkan untuk kebutuhan tertentu dilengkapi komponen pendukung lain, dari cara yang sederhana hingga teknologi khusus [1].

Prinsip Kerja Kompresor

Prinsip kerja kompresor adalah udara dihisap oleh piston bertekanan rendah melalui filter dan masuk ke silinder melalui katup hisap bertekanan rendah. Setelah kompresi di dalam silinder. Udara keluar dari katup tekanan rendah, didinginkan di intercooler, kemudian masuk ke silinder tekanan tinggi melalui katup hisap tekanan tinggi dan keluar dari intercooler ke tabung udara (botol udara) melalui katup bertekanan tinggi.

Jenis Kompresor

Kompresor angin atau air compressor memiliki beberapa tipe, tapi pada dasarnya menggunakan dua prinsip utama: *positive displacement compression* dan *dynamic compression*.

Pada kompresor angin *positive displacement compression* tipe kompresor yang termasuk adalah;

1. Piston Kompresor (Reciprocating)
2. Scroll compressors (Rotor ganda)
3. Screw Kompresor (Rotor tunggal)

Sedangkan pada kompresor angin dengan prinsip *dynamic compression*, atau lebih dikenal dengan kompresor sentrifugal. Kompresor bekerja dengan prinsip tekanan yang konstan dan bukan aliran.

Kompresor yang dibahas dalam jurnal ini adalah tipe piston (reciprocating). Kompresor Piston dapat menggabungkan beberapa tahap kompresi untuk mencapai tekanan yang diinginkan yang membuatnya sangat cocok untuk aplikasi tekanan tinggi. Baik mesin yang dilumasi oli dan bebas oli tersedia dengan desain khusus dan mampu mengompres gas selain udara.

Komponen Utama Kompresor

Adapun komponen-komponen utama dari kompresor udara adalah sebagai berikut:

1. Kerangka (frame)
Fungsi utama adalah untuk mendukung seluruh beban dan berfungsi juga sebagai tempat kedudukan bantalan, poros engkol, silinder dan tempat penampungan minyak pelumas.
2. Low pressure suction and delivery valve
Untuk strukturnya, katup hisap terletak dibagian bawah dan katup pengiriman pada bagian atasnya. Karena daerah di sekitar katup sangat dibutuhkan, maka diperlukan daya angkat yang kecil dari katup. Akibatnya, rotasi kecepatan tinggi dapat dipertahankan tanpa mengurangi efisiensinya. Low pressure valve terdiri dari beberapa bagian yang mudah untuk dipisahkan dan diperbaiki.
3. High pressure suction and delivery valve
High pressure valve juga terdiri dari beberapa bagian yang mudah untuk dipisahkan dan diperbaiki. Tergantung dari model kompresor udara, katup pengisapan dan katup pengiriman

terpisah dari low pressure suction and delivery valve.

4. High pressure safety valve
Katup ini berfungsi untuk mencegah bahaya ketika tekanan udara menjadi terlalu tinggi. Ketika tekanan udara meningkat sekitar 10% dari tekanan normal, katup ini bekerja mengeluarkan udara kompresi ke atmosfer untuk mencegah tekanan udara terus meningkat. Tekanan kerja dari katup ini dapat dengan mudah dikontrol dengan mengatur baut yang terdapat pada katup ini.
5. Air cooler
Air cooler berfungsi untuk mendinginkan suhu udara kompresi dan untuk memisahkan drainase.
6. Pressure gauge
Pressure gauge berfungsi untuk menunjukkan tekanan sebesar 0.45 Mpa – 0.7 Mpa ketika kompresor udara bekerja dengan normal (2.94Mpa).Pastikan keran ditutup ketika kompresor udara beroperasi dan buka keran ketika memeriksa pressure yang ditunjukkan.
7. Oil gauge
Minyak pelumas di dalam crank case berfungsi untuk melumasi silinder (daerah tekanan tinggi), piston, metal, crankpin and main bearing. Untuk melumasi silinder dan katup udara di daerah low pressure digunakan pipa minyak dan konsumsi minyak dapat dilihat dari luar melalui oil gauge.
8. Saringan Udara (Air filter)
Air filter merupakan komponen pada kompresor yang sangat penting. Air filter berfungsi untuk menyaring udara yang akan masuk ke dalam silinder sehingga debu dan kotoran tidak masuk ke dalam silinder. Debu dan kotoran dapat mengakibatkan kerusakan pada silinder, lengketnya katup, merusak silinder, dan pemakaian yang berlebihan.
9. Motor
Motor merupakan penggerak utama kompresor. Motor penggerak kompresor dibedakan menjadi 2 macam yaitu motor listrik dan motor bakar
10. Sistem pelumasan
Sistem pelumasan yaitu pelumasan yang melibatkan semua komponen dalam kompresor yang bergerak. Pelumasan ini sangat penting karena sangat berpengaruh dalam pengoperasian kompresor.
11. Cylinder oil
Cylinder oil berfungsi untuk melumasi piston dan silinder pada saat kompresor beroperasi agar silinder tidak aus dan tidak terjadi gesekan antar metal yang mengakibatkan panas yang berlebihan. Cylinder oil tidak boleh telat dalam pengisian.

12. Piston

Piston adalah komponen yang terletak di dalam silinder dan berfungsi untuk mengkompresikan udara sehingga menghasilkan udara bertekanan yang kemudian menuju ke low pressure valve dan high pressure valve.

13. Piston ring(piston rings)

Piston ring merupakan komponen yang digunakan untuk mencegah terjadinya udara lolos dalam silinder dalam proses pemampatan udara.

14. Batang Penghubung (Connecting rod)

Connecting rod berfungsi sebagai penghubung antara piston dan poros engkol.

15. Poros engkol

Poros engkol merupakan komponen yang merubah putaran menjadi langkah yang menyebabkan piston bergerak naik turun.

16. Silinder (cylinder)

Berfungsi sebagai tempat kedudukan liner silinder dan water jacket

17. Liner silinder (cylinder liner)

Berfungsi sebagai lintasan gerakan piston torak saat melakukan proses ekspansi, pemasukan, kompresi, dan pengeluaran

18. Front and rear cylinder cover

Adalah tutup silinder bagian head end/front cover dan bagian crank end/rear cover yang berfungsi untuk menahan gas/udara supaya tidak keluar silinder.

19. Water Jacket

Adalah ruangan dalam silinder untuk bersirkulasi air sebagai pendingin

20. Cincin Penahan Gas (packing rod)

Berfungsi menahan kebocoran gas akibat adanya celah (clearance) antara bagian yang bergerak (batang torak) dengan bagian yang diam (silinder). Cincin penahan gas ini terdiri dari beberapa ring segment.

21. Oil Scraper

Berfungsi untuk mencegah kebocoran minyak pelumas pada frame.

22. Katup kompresor (compressor valve)

Berfungsi untuk mengatur pemasukan dan pengeluaran gas/udara, kedalam atau keluar silinder. Katup ini dapat bekerja membuka dan menutup sendiri akibat adanya perbedaan tekanan yang terjadi antara bagian dalam dengan bagian luar silinder.

Kompresor Udara 2 Tingkat

Kompresor 2 tingkat adalah kompresor yang di dalamnya terdapat beberapa silinder dengan diameter berbeda. Asupan udara pada tahap pertama dikompresi dan kemudian dilewatkan ke pendingin untuk mencapai suhu yang sangat dekat dengan udara sekitar. Udara dingin ini dilewatkan ke tahap peralihan di mana ia kembali dikompresi dan dipanaskan. Udara ini kembali dilewatkan melalui pendingin untuk mencapai suhu sedekat

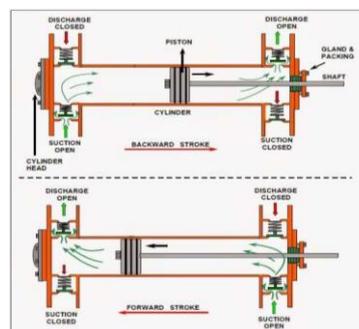
mungkin dengan suhu sekitar. Kemudian udara terkompresi ini dialirkan ke kompresor udara tahap terakhir atau ketiga di mana udara tersebut dikompresi sesuai kebutuhan.

Kompresor udara bertingkat digunakan untuk menghasilkan tekanan udara yang lebih tinggi. Udara masuk akan dikompresi oleh torak pertama, kemudian didinginkan, selanjutnya dimasukkan dalam silinder kedua untuk dikompresi oleh torak kedua sampai pada tekanan yang diinginkan. Pemampatan (pengompresian) udara tahap kedua lebih besar, temperatur udara akan naik selama terjadi kompresi, sehingga perlu mengalami proses pendinginan dengan memasang sistem pendingin.

Metode pendinginan yang sering digunakan misalnya dengan sistem udara atau dengan sistem air bersirkulasi. Batas tekanan maksimum untuk jenis kompresor torak resiprokal antara lain, untuk kompresor satu tingkat tekanan hingga 4 bar, sedangkan dua tingkat atau lebih tekanannya hingga 15 bar.

Keuntungan Kompresor Udara 2 Tingkat

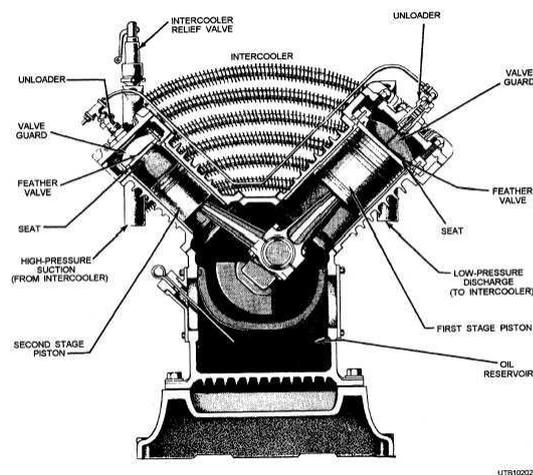
1. Mengurangi kerja kompresi per kg zat pendingin
2. COP meningkat
3. Ketebalan dinding silinder LP berkurang karena harus menahan tekanan yang lebih rendah. Hal ini membuat kompresor lebih ringan dan murah.
4. Pembuangan panas selama kondensasi berkurang sehingga ukuran kondensor berkurang.
5. Efisiensi volumetrik kompresor meningkat karena berkurangnya rasio tekanan di setiap tahap.
6. Suhu pada akhir kompresi akan lebih kecil. Akibatnya pelumasan akan efektif. Oleh karena itu, umur kompresor meningkat.
7. Kebocoran melewati piston berkurang
8. Biaya operasional berkurang
9. Memberikan torsi yang lebih seragam, sehingga ukuran flywheel diperkecil.



Gambar 1 Kompresor 2 tingkat [2]

Prinsip Kerja Kompresor Udara 2 Tingkat

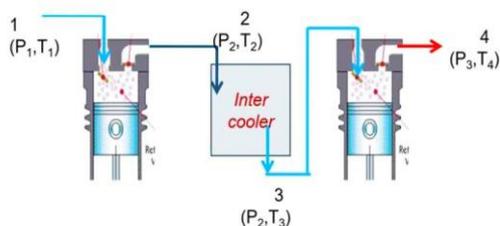
Prinsip Kompresor udara dua tingkat, yaitu pada gambar dibawah ini:



Gambar 2 Kompresor 2 tingkat dengan intercooler [3]

Selama kompresor bekerja perlu adanya pendinginan, pendinginan diambil dari air dan agar kompresor tidak mengalami kerusakan maka bagian tertentu dipasang Zink Anoda untuk menghindari korosi.

Temperatur gas hasil kompresi akan makin besar bila perbandingan kompresinya makin besar, kenaikan temperatur gas akan berakibat pada kenaikan temperatur kompresor. Suhu kompresor yang terlalu tinggi harus dihindari agar kekuatan bahan terjamin dan kerja yang diperlukan untuk kompresi dapat dihemat. Bila perbandingan kompresi lebih besar dari 8 bar maka perlu dibuat kompresor bertingkat. Pada kompresor bertingkat dibuat pendingin antara tingkat (intercooler) untuk menghindari overheating akibat tekanan tinggi [3].



Gambar 3 Kompresor 2 tingkat dengan intercooler [4]

Intercooler berfungsi untuk menurunkan temperatur udara bertekanan yang keluar dari discharge setiap stage pada kompresor. Intercooler dibagi menjadi 2 bagian yakni bagian fin dan bagian tube. Bagian fin pada intercooler berfungsi untuk meningkatkan area permukaan yang bersentuhan dengan udara atau cairan pendingin (biasanya udara luar atau air). Sirip-sirip ini membantu meningkatkan efisiensi pertukaran panas antara udara yang dikompresi dan medium pendingin sedangkan bagian tube pada intercooler

adalah tempat di mana udara yang dikompresi mengalir. Tabung-tabung ini berfungsi sebagai jalur untuk udara yang sedang didinginkan dan sering kali dibuat dari bahan yang memiliki konduktivitas termal tinggi untuk memaksimalkan transfer panas. Fluida yang mengalir pada sisi fin adalah udara, sedangkan pada bagian tube dialiri oleh air.

Kompresor membutuhkan sistem pendingin untuk berbagai alasan penting. Berikut adalah penjelasan dari alasan-alasan tersebut:

a. Untuk memperkecil suhu udara

Saat udara dikompresi, suhunya akan meningkat secara signifikan karena proses kompresi adalah proses adiabatik, di mana tekanan naik menyebabkan peningkatan suhu. Pendinginan diperlukan untuk mengurangi suhu udara yang telah dikompresi. Suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada kompresor dan komponen lainnya serta mengurangi efisiensi sistem secara keseluruhan.

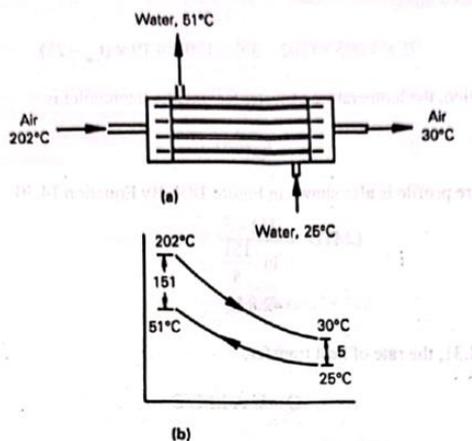
b. Untuk memperbesar rendemen volumetric

Rendemen volumetrik mengacu pada seberapa efektif kompresor mengisi silinder dengan udara pada setiap siklus kompresi. Ketika udara yang masuk lebih dingin, volumenya lebih kecil untuk massa udara yang sama (karena densitas udara meningkat saat suhu turun). Ini berarti lebih banyak udara dapat dimasukkan ke dalam silinder, meningkatkan rendemen volumetrik kompresor. Dengan kata lain, udara yang lebih dingin memungkinkan kompresor bekerja lebih efisien dengan mengompres lebih banyak udara dalam volume yang sama.

c. Memperkecil kenaikan suhu pada kompresor

Ketika udara dikompresi, tidak hanya suhu udara yang meningkat, tetapi juga suhu komponen-komponen kompresor itu sendiri. Jika suhu kompresor terlalu tinggi, ini dapat menyebabkan berbagai masalah, termasuk pelumasan yang tidak efektif, keausan yang lebih cepat pada komponen, dan potensi kerusakan pada segel dan bantalan. Pendinginan membantu menjaga suhu kompresor dalam batas yang aman, memastikan umur panjang dan kinerja yang optimal dari kompresor.

Metode pendinginan yang sering digunakan misalnya dengan sistem udara yaitu menggunakan aliran udara untuk menghilangkan panas dari kompresor. Udara dingin dari lingkungan dialirkan melalui sirip atau pipa yang terpasang pada kompresor untuk menyerap dan membuang panas yang dihasilkan selama proses kompresi atau dengan sistem air bersirkulasi yaitu menggunakan air untuk menyerap dan menghilangkan panas dari kompresor. Air bersirkulasi melalui pipa atau jaket pendingin yang terpasang pada kompresor,



Gambar 7 Diagram Skematik pada intercooler

Penelitian ini difokuskan pada pengoptimalan desain thermal kompresor udara dua tingkat untuk mencapai efisiensi yang akan di analisis untuk menilai hasil dari perpindahan panas. Menghitung jumlah tube pada kompresor udara dua tingkat ini dapat dilakukan dengan mengumpulkan data informasi awal dimana:

- Kompresor udara memiliki tekanan 36 Bar
- Laju aliran massa udara 65 kg/h
- Diameter heat exchanger tube 10 mm
- Panjang maksimum heat exchanger tube 1 m
- Laju aliran air pada intercooler 110 kg/h
- Efisiensi perpindahan panas keseluruhan 100 W/m²k.

Pada penelitian ini asumsi digunakan untuk mempermudah dalam penyelesaian permasalahan, yaitu:

- Tekanan atmosfer 1 bar
- Temperatur atmosfer 30°C
- Temperatur Cooling water 25° C
- Panas Spesifik udara, Cp 1.005 kJ/kg.K
- Panas Spesifik air, CL 4.19 kJ/kg.K
- Kompresi pada pV^{1.3} konstan
- Proses pendinginan sempurna

Rumus-rumus yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

- Menghitung tekanan interediate:

$$P_i = \sqrt{P_1 P_2}$$

- Menghitung suhu udara yang masuk ke intercooler:

$$\frac{T_i}{T_1} = \left(\frac{P_i}{P_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}}$$

- Menghitung suhu udara yang keluar dari intercooler:
Panas yang dilepaskan udara = Panas yang diterima air
 $\dot{m}_a C_{pa} (\text{Temp. Drop}) = \dot{m}_w C_L (\text{Temp. rise})$
- Menghitung Log mean temperature difference / LMTD:
$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$
- Menghitung laju perpindahan panas untuk mendapatkan luas area perpindahan panas:
 $Q = U \cdot A \cdot LMTD$
Q = Panas yang dilepaskan udara
 $= \dot{m}_a \cdot C_p \cdot (\text{Temp. drop})$
- Menghitung jumlah tabung yang paling optimal:
 $A = n \pi d L$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menemukan tekanan perantara :

$$\begin{aligned} P_i &= \sqrt{P_1 P_2} \\ &= \sqrt{1 \times 36} \\ &= 6 \text{ bar} \end{aligned}$$

Untuk menemukan suhu udara yang masuk ke intercooler :

$$\frac{T_i}{T_1} = \left(\frac{P_i}{P_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}}$$

$$\text{substitusikan; } \frac{T_i}{303} = \left(\frac{6}{1} \right)^{\frac{(1.3-1)}{1.3}}$$

$$T_i = 458 \text{ K} = 185^\circ\text{C}$$

Jika intercooling ingin sempurna, maka intercooler harus mendinginkan udara ke $T_1 = 30^\circ\text{C}$, dengan keseimbangan energi pada intercooler :

Panas yang dilepaskan udara = Panas yang diterima air

$$\dot{m}_a C_{pa} (\text{Temp. Drop}) = \dot{m}_w C_L (\text{Temp. rise})$$

$$65 \times 1.005 \times (185 - 30) = 110 \times 4.19 \times (t_{out} - 25)$$

$$t_{out} = 47^\circ\text{C}$$

LMTD adalah rata rata logaritmik dari perbedaan suhu antara aliran panas dan dingin pada akhir exchanger, semakin besar LMTD maka semakin besar juga panas yang di tranfer. Penggunaan LMTD diperoleh dari analisis penukaran panas dengan laju alir konstan dan sifat termal fluida.

$$LMTD = \frac{151 - 5}{\ln \frac{151}{5}} = 42.8 \text{ K}$$

Laju Perpindahan Panas :

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD$$

Jika *heat loss* diabaikan, maka:

$$\dot{Q} = \text{Panas yang dilepaskan udara}$$

$$= \dot{m}_a C_p (\text{Temp. drop})$$

$$= \frac{65}{3600} \times 1.005 \times (185 - 30)$$

$$= 3.8 \text{ kW} = 2800 \text{ W}$$

Jika $Q = \dot{Q}$ maka :

$$2800 = 100 \times A \times 42.8$$

$$A = 0,65 \text{ m}^2$$

Untuk mencari jumlah tabung :

$$A = n \pi d L$$

$$0.65 = n \pi \times 0.01 \times 1$$

$$n = 21$$

KESIMPULAN

Berdasarkan analisa pembahasan data yang sudah di paparkan, maka desain intercooler yang paling optimal dengan panjang maksimal sebesar 1 m, banyaknya tabung yang dibutuhkan sistem adalah sejumlah $n = 21$ dengan luas area $A = 0.65 \text{ m}^2 = 100750,2 \text{ inchi}^2$. Maka diperlukan pembuatan desain penukar kalor dengan jumlah dan luas area tabung sesuai dengan kebutuhan, sehingga sistem akan berjalan dengan efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kabral, R., Du, L., Abom, M., & Knutsson, M. 2016. *Optimization of Compact Non-Fibrous Silencer for the Control of Compressor Noise*. SAE Technical Papers.
- [2] Khawarita, S., Khalida, S., Anizar, R. M. S., Indah, R., & Mangara, M. T. 2018. *Effectiveness of compressor machine by using overall equipment effectiveness (OEE) method*. E3S Web of Conferences.
- [3] Adam Rahmat. 2023. Perbaikan Dan Analisa Unjuk Kerja Testbed Sistem Kompresor Torak Dua Tingkat. Sekolah vokasi Universitas Diponogoro.
- [4] Ignatius Gunawan, dkk. 2019. Pengujian Unjuk Kerja (Performance) Kompresor Torak Multi Stage Dengan Tabung Tambahan Pada

Saluran Keluaran Pada Silinder Pertama, Jurusan Teknik Mesin, Politkanik Negeri Semarang.

- [5] Ir. Made Suarda, M.eng. 2016. *Pompa dan Kompresor*, Bahan ajar Teknik Mesin Universitas Udayana.