



TUGAS AKHIR - TF 181801

**ANALISIS EKSERGI DAN OPTIMISASI TERMOEKONOMI
PADA SISTEM REFRIGERASI DI *DATA CENTER*
MENGUNAKAN METODE ALGORITMA GENETIKA**

**MAHARANI SARAH HOLLE
NRP. 0231164000015**

Dosen Pembimbing:
Ir. Roekmono, M.T

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



TUGAS AKHIR - TF 181801

**ANALISIS EKSERGI DAN OPTIMISASI TERMOEKONOMI
PADA SISTEM REFRIGERASI DI *DATA CENTER*
MENGUNAKAN METODE ALGORITMA GENETIKA**

**MAHARANI SARAH HOLLE
NRP. 02311640000015**

Dosen Pembimbing:
Ir. Roekmono, M.T

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



FINAL PROJECT - TF 181801

***EXERGY ANALYSIS AND THERMOECONOMIC
OPTIMIZATION OF REFRIGERATION SYSTEM AT DATA
CENTER USING GENETIC ALGORITHM METHOD.***

**MAHARANI SARAH HOLLE
NRP. 02311640000015**

Supervisors:
Ir. Roekmono, M.T

*Department Of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020*

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Maharani Sarah Holle
NRP : 02311640000015
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**Analisis Eksergi dan Optimisasi Termoekonomi Pada Sistem Refrigerasi di Data Center Menggunakan Metode Algoritma Genetika**” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 30 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,



Maharani Sarah Holle

NRP. 02311640000015

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

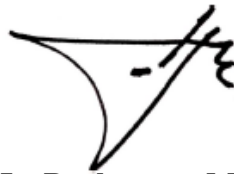
**ANALISIS EKSERGI DAN OPTIMISASI TERMOEKONOMI
PADA SISTEM REFRIGERASI DI *DATA CENTER*
MENGUNAKAN METODE ALGORITMA GENETIKA**

Oleh:

Maharani Sarah Holle
NRP. 02311640000015

Surabaya, 3 Agustus 2020

Menyetujui,
Pembimbing I

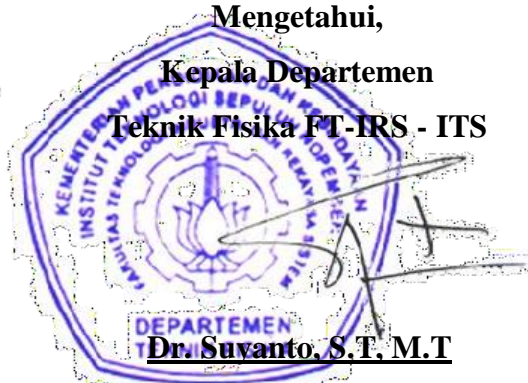


Ir. Roekmono, M.T

NIP. 19580908 198601 1 001

Mengetahui,

**Kepala Departemen
Teknik Fisika FT-IRS - ITS**



Dr. Suvanto, S.T, M.T

NIP. 19711113 199512 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS EKSERGI DAN OPTIMISASI TERMOEKONOMI PADA SISTEM REFRIGERASI DI *DATA CENTER* MENGGUNAKAN METODE ALGORITMA GENETIKA

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh:

MAHARANI SARAH HOLLE

NRP. 0231164000015

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:


1. Ir. Roekmono, M.T

 (Pembimbing I)

2. Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T

 (Ketua Penguji)

3. Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D

 (Penguji I)

4. Ir. Harsono Hadi, Ph.D

 (Penguji II)

5. Erna Septyaningrum, S.T, M.T

 (Penguji III)

SURABAYA

2020

**ANALISIS EKSERGI DAN OPTIMISASI TERMOEKONOMI
PADA SISTEM REFRIGERASI DI *DATA CENTER*
MENGUNAKAN METODE ALGORITMA GENETIKA**

Nama : Maharani Sarah Holle
NRP : 02311640000015
Departemen : Teknik Fisika FT-IRS - ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Roekmono, M.T.

ABSTRAK

Refrigerasi adalah sistem termodinamika yang melibatkan transfer energi berupa sejumlah panas yang diserap sistem dan dilepas oleh sistem ke lingkungan. Proses perpindahan panas merupakan sumber utama terjadinya ireversibilitas pada siklus tersebut yang berdampak pada penurunan kinerja sistem. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan analisis dan optimisasi terhadap sistem refrigerasi dari aspek energi dan ekonomi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa temperatur kondensor dan evaporator sangat mempengaruhi performansi sistem. Kenaikan temperatur kondensor menyebabkan meningkatnya perbedaan temperatur dengan lingkungan sehingga COP, efisiensi eksergi dan *total cost rate* menurun. Sedangkan, kenaikan temperatur evaporator naik mengakibatkan penurunan rasio tekanan kompresor pada sistem sehingga COP dan efisiensi eksergi terus mengalami peningkatan sedangkan *total cost rate* mengalami penurunan. Proses optimisasi multiobjektif dengan metode algoritma genetika digunakan untuk menentukan parameter operasi paling optimum dari aspek energi dan ekonomi pada sistem refrigerasi dan *TOPSIS decision making* untuk menentukan solusi paling terbaik. Berdasarkan optimisasi ini didapatkan parameter operasi optimum berada pada temperatur kerja kondensor 53,65°C dan temperatur evaporator -3,92°C dengan hasil nilai efisiensi eksergi yaitu 69,1% dan *total cost rate* senilai 108.832 USD/year.

Kata Kunci: *eksergi, optimisasi, refrigerasi*

Halaman ini sengaja dikosongkan

**EXERGY ANALYSIS AND THERMOECONOMIC
OPTIMIZATION OF REFRIGERATION SYSTEM AT DATA
CENTER USING GENETIC ALGORITHM METHOD.**

Name : *Maharani Sarah Holle*
NRP : *0231164000015*
Department : *Engineering Physics FT-IRS - ITS*
Supervisors : *Ir. Roekmono, M.T.*

ABSTRACT

Refrigeration is a thermodynamic system involving heat transfer across the interface between system and environment. The heat transfer process is the main source of irreversibility in the cycle, which results in a decrease in the system performance. Therefore, in this study an analysis and optimization of the refrigeration system will be carried out in terms of energy and economy. The results indicate that the condenser and evaporator temperatures significantly affect system performance. Increasing condenser temperature yields a higher temperature difference relative to the environment which decreases COP, exergy efficiency, and total cost rate. Meanwhile, higher evaporator temperature decreases the compressor pressure ratio leading to an increase in COP and exergy efficiency and a decrease in the total cost rate. The multiobjective optimization process with genetic algorithm methods was used to determine the optimum operating parameters from the energy and economic aspects of the refrigeration system and TOPSIS decision making to determine the best solution. Based on this optimization, the optimum operating parameters were found at the condenser temperature of 53,65°C and the evaporator temperature of -3,92°C with the results of an exergy efficiency value of 69,1% and a total cost rate of 108.832 USD/year.

Keywords: *exergy, optimization, refrigeration*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena berkat rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini dengan judul "**Analisis Eksergi dan Optimisasi Termoekonomi Pada Sistem Refrigerasi di *Data Center* Menggunakan Metode Algoritma Genetika**" hingga selesai.

Dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, penulis banyak mendapatkan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga penulis. Bapak yang selalu dirindukan semoga bahagia di sisi-Nya, Ibu Fauziah, Caca Danti, Abang Alwi, Kakak Bram dan Maryam yang telah menjadi semangat terbesar dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Terima kasih atas doa, nasihat, dukungan, kebahagiaan dan kepercayaan yang selalu diberikan.
2. Bapak Dr. Suyanto, S.T, M.T selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS
3. Bapak Ir. Roekmono, M.T selaku dosen pembimbing tugas akhir, terima kasih atas semua bimbingan dan pembelajaran selama ini.
4. Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa' M.Sc selaku dosen wali yang telah mengayomi dan memberikan banyak nasihat kepada penulis.
5. Bapak Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D selaku kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan, terima kasih atas fasilitas dan dukungan yang telah diberikan.
6. Bapak dan Ibu Dosen Penguji Tugas Akhir, yang telah memberikan kritik dan saran sehingga tugas akhir ini dapat selesai dengan sangat baik.
7. Geng Kurcil tersayang, Caca Dila, Opi, Abang Farhan, Agi dan Tima yang selalu saling mendoakan, memberi dukungan dan semangat serta senantiasa menghibur penulis setiap saat.
8. Teman-teman KSE Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan, Nuril, Qori', Aris, Shafly, Indjra, Nesa, Rodzan, KSE 2017, dan

KSE 2018 terima kasih karena selalu menemani, membantu, dan memberi dukungan selama di Lab. *See you guys on top!*

9. Septi, KAyas, Nadya, Dika, Fikri, Ijal, Yusril, Reza, Budi yang sedari dulu selalu bersama, terima kasih atas semua doa, dukungan, hiburan dan gangguannya. Sayang kalian.
10. Nina dan Zhave terima kasih untuk selalu ada dan percaya, memberi doa dan dukungan, serta menghibur penulis dengan berbagai canda dan tawa. *I purple you Freaky!*
11. Rachma dan Lina, serta seluruh teman-teman Thalassinus Fortis terima kasih atas bantuan, kepedulian, solidaritas, dan berbagai memori indah yang akan selalu dikenang oleh penulis. Kalian terbaik, Semoga sukses!
12. Teman-teman TAWan Bidang Minat Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan.
13. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademika Departemen Teknik Fisika ITS, terima kasih atas kerjasamanya.
14. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan laporan tugas akhir ini.

Penulis berharap agar laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembacanya. Tentunya penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam laporan ini, maka dari itu kritik dan saran yang membangun akan diterima.

Surabaya, 30 Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
<i>COVER PAGE</i>	v
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	vii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
LEMBAR PENGESAHAN.....	xi
ABSTRAK	xiii
<i>ABSTRACT</i>	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
DAFTAR SIMBOL	xxv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Laporan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Sistem Refrigerasi.....	7
2.2 Analisis Termodinamika	9
2.3 Analisis Ekonomi	10
2.4 Beban Pendinginan	13
2.5 Optimisasi Multiobjektif dengan Algoritma Genetika	14

2.6	TOPSIS <i>Decision Making</i>	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		19
3.1	Studi Literatur	19
3.2	Pengumpulan Data.....	20
3.3	Analisis Termodinamika.....	22
3.4	Analisis Ekonomi	23
3.5	Optimisasi Menggunakan Metode Algoritma Genetika	23
3.6	Penarikan Kesimpulan dan Saran.....	24
3.7	Penulisan Laporan	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		25
4.1	Analisis Termoekonomi.....	25
4.2	Analisis Optimisasi Multiobjektif	30
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		37
1.1	Kesimpulan.....	37
5.2	Saran	37
DAFTAR PUSTAKA		39
LAMPIRAN		43
BIODATA PENULIS		49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Siklus dan komponen sistem refrigerasi kompresi uap	7
Gambar 2.2 Diagram $T-s$ (kiri) dan $p-h$ (kanan) pada sistem refrigerasi kompresi uap ideal	8
Gambar 2. 3 Skema daerah objektif.	15
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian	19
Gambar 3. 2 Sistem Refrigerasi CITEC ESD80.	20
Gambar 4. 1 Pengaruh temperatur kondensor terhadap nilai COP.....	26
Gambar 4. 2 Pengaruh temperatur kondensor terhadap nilai efisiensi eksergi. ...	26
Gambar 4. 3 Pengaruh temperatur kondensor terhadap biaya total.	27
Gambar 4. 4 Pengaruh temperatur evaporator terhadap nilai COP.....	28
Gambar 4. 5 Diagram $p-h$ sistem refrigerasi.....	28
Gambar 4. 6 Pengaruh temperatur evaporator terhadap efisiensi eksergi.	29
Gambar 4. 7 Pengaruh temperatur evaporator terhadap biaya total.	30
Gambar 4. 8 <i>Pareto front</i> dari optimisasi multiobjektif pada sistem refrigerasi.	32
Gambar 4. 9 Eksergi <i>destruction</i> pada parameter operasi optimum.	35

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Daftar data yang dibutuhkan.	21
Tabel 3. 2 Data daya server	22
Tabel 3. 3 <i>Decision Variabel</i>	23
Tabel 4. 1 Beban Pendinginan <i>Data Center</i>	31
Tabel 4. 2 Hasil optimisasi multiobjektif termoekonomi.	32
Tabel 4. 3 Hasil performansi sistem refrigerasi pada nilai optimum.	33
Tabel 4. 4 Perbandingan <i>Operational Cost Rate</i> Eksisting dan Optimisasi.....	34

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL

Q	Kapasitas kalor (kW)
h	Entalpi (kJ/kg)
s	Entropi (kJ/kg.K)
\dot{m}	<i>Mass flow rate</i> (kg/s)
T_0	Temperatur lingkungan ($^{\circ}\text{C}$)
W	Kerja (kW)
Exd	<i>Exergy Destruction</i> (kW)
η_{ex}	Efisiensi Exergi (%)
C	<i>Cost/biaya</i> (USD/year)
A	Luas penampang panas (m^2)
U	Koefisien perpindahan kalor ($\text{kW}/\text{m}^2.\text{K}$)
H	Waktu operasi sistem (jam)
Φ	<i>Maintenance factor</i>
i	<i>interest rate</i>
n	<i>lifetime</i> (tahun)
a_{ij}	Matriks keputusan
V_{ij}	Matriks keputusan ternormalisasi
A_j^+	Solusi ideal positif
A_j^-	Solusi ideal negatif
S_i^+	Separasi solusi ideal positif
S_i^-	Separasi solusi ideal negative
C_i	kedekatan terhadap solusi ideal

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Refrigerasi adalah sistem termodinamika yang melibatkan transfer energi berupa sejumlah panas yang diserap sistem dan dilepas oleh sistem ke lingkungan. Perbedaan temperatur antara sistem dan lingkungan menyebabkan terjadinya proses perpindahan panas serta merupakan sumber utama terjadinya irreversibilitas pada siklus tersebut yang berdampak pada penurunan kinerja sistem. Metode analisis termal yang paling umum digunakan saat ini ialah analisis energi berdasarkan hukum pertama Termodinamika. Akan tetapi, hukum pertama Termodinamika hanya berlandaskan pada prinsip konservasi energi tanpa memberikan informasi tentang bagaimana, di mana, dan seberapa banyak kinerja sistem terdegradasi. Sehingga, analisis eksergi berdasarkan hukum kedua Termodinamika dibutuhkan sebagai pelengkap analisis. Eksergi merupakan kerja teoretis maksimum yang dapat diperoleh dari keseluruhan sistem yang ada, yakni antara sistem dan lingkungan ketika menuju keadaan kesetimbangan. Analisis eksergi berguna untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya energi karena luaran analisis memberikan informasi tentang lokasi, jenis, dan besarnya kerugian [1]. Oleh karena itu, metode ini memungkinkan untuk mengetahui distribusi rugi-rugi eksergi (*exergy loss*) dan efisiensi eksergi pada sistem dan pada komponen mana rugi-rugi eksergi paling tinggi terjadi. Dengan demikian, eksergi merupakan salah satu cara yang tepat untuk dapat melakukan evaluasi dan optimisasi terhadap kerja suatu sistem termodinamika khususnya sistem refrigerasi.

Optimisasi dilakukan untuk dapat mengetahui parameter operasi yang paling optimum dari suatu proses, penentuan parameter operasi menyangkut beberapa aspek yang menjadi pertimbangan, sebagai contoh aspek termodinamika, ekonomi atau lingkungan. Jika penentuan parameter hanya berdasarkan salah satu aspek saja, misal termodinamika, maka sistem akan bersifat sangat ideal dari sudut pandang termodinamika tetapi belum tentu ideal dalam sudut pandang ekonomi karena sistem tidak mungkin diterapkan jika biaya yang dibutuhkan terlalu tinggi. Begitu juga sebaliknya, apabila penentuan dititikberatkan pada aspek ekonomi yang

memiliki harga sangat murah tetapi bukan merupakan sistem yang baik dalam segi termodinamika. Sehingga, kedua aspek tersebut harus dipertimbangkan secara bersamaan dalam pengambilan keputusan agar menghasilkan sistem yang baik dari aspek termodinamika atau pun ekonomi [2]. Optimisasi dengan mempertimbangkan dua aspek termasuk kedalam kelompok optimisasi multiobjektif.

Metode optimisasi umumnya diklasifikasikan menjadi dua kategori yakni *gradient based method* atau *non-gradient based method* dalam mencari solusi optimum [3]. Beberapa metode gradien yang sering digunakan ialah *finite difference estimation*, *frequency domain analysis*, dan *infinitesimal perturbation analysis*. Namun, metode gradien sulit digunakan untuk fungsi objektif non-linier karena sulitnya menentukan nilai gradien dari fungsi tersebut. Sehingga, *non-gradient based method* merupakan metode yang paling banyak digunakan dalam proses optimisasi bidang keteknikan karena sebagian besar dimodelkan sebagai fungsi non-linier. Metode *non-gradient* yang sering digunakan salah satunya yaitu algoritma genetika [3].

Pada penelitian ini optimisasi multiobjektif pada sistem refrigerasi akan dilakukan dengan metode algoritma genetika karena beberapa studi telah membuktikan bahwa metode ini sangat baik digunakan untuk optimisasi yang memiliki fungsi objektif lebih dari satu. Sebagai contoh, studi oleh Faqih melakukan optimisasi termoekonomi dengan metode algoritma genetika terhadap sistem refrigerasi yang menggunakan campuran refrigeran antara karbon dioksida dan propana, karbon dioksida dan etana, serta karbon dioksida dan etilen [3]. Metode yang sama juga pernah dilakukan terhadap sistem refrigerasi jenis *double effect absorption* [4]. Adapun yang melakukan optimisasi multiobjektif berdasarkan tiga aspek yaitu eksergi, ekonomi dan lingkungan terhadap sistem refrigerasi *cascade* dengan refrigeran yang digunakan yaitu ammonia dan propana [5] [6]. Pada *Geothermal Power Plant Binary Cycle System Model* [7] juga pernah dilakukan studi dengan metode yang sama dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan (*sustainability*) dari *plant* dengan parameter optimisasi/*multiobjective function*-nya ialah *total exergy destruction* dan biaya tahunan yang dikeluarkan. Studi dari Borup dkk, dan Jansson dkk juga menunjukkan

bahwa algoritma genetika dapat diterapkan untuk mengoptimisasi fungsi objektif dengan parameter operasi real maupun diskrit [8] [9], sehingga metode ini akan sangat baik untuk diterapkan pada optimisasi multiobjektif sistem refrigerasi.

Salah satu penggunaan sistem refrigerasi yang intensif berada pada *data center* sehingga parameter operasi memungkinkan untuk dioptimalkan. *Data center* adalah struktur yang didedikasikan untuk akomodasi terpusat, interkoneksi, operasi IT dan peralatan telekomunikasi jaringan yang menyediakan penyimpanan data, pengolahan, dan jasa transportasi. *Data center* merupakan bangunan yang berdiri bebas di mana semua ruang dan infrastruktur pendukung (HVAC, penerangan, listrik) secara langsung berhubungan dengan pengoperasian *data center*. Dari beberapa pengertian tersebut, diambil kesimpulan bahwa *data center* adalah sebuah ruangan yang dirancang untuk tempat *server*, penyimpanan data, dan jaringan yang digunakan sebagai wadah untuk melakukan pengolahan data [10]. *Data center* berhubungan langsung dengan sistem pengondisian udaranya sehingga apabila pendinginan tidak mencukupi maka akan mengurangi umur dan energi dari peralatan IT yang digunakan. Pada sebuah rak *server*, panas diproduksi dari pemakaian energi listrik yang dikonsumsi oleh peralatan-peralatan tersebut. Jika panas ini tidak disirkulasikan dengan benar, maka akan menimbulkan kerusakan pada sistem kabinet *data center*. Oleh sebab itu, dibutuhkan sistem refrigerasi dengan kinerja yang baik dan optimum agar bisa mengkondisikan sirkulasi udara di *data center*. Saat ini sistem refrigerasi yang terpasang pada *data center* di Surabaya ialah *precision air conditioning*. *Air conditioning* tersebut telah digunakan sejak tahun 2016 sehingga penurunan kinerja mungkin telah terjadi. Hal tersebut melatarbelakangi pelaksanaan penelitian tugas akhir ini, yaitu akan dilakukannya analisis eksergi dan optimisasi termoekonomi untuk menentukan parameter operasi yang optimum dari sistem refrigerasi di *data center*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah pada penelitian ini ialah:

1. Bagaimana pengaruh temperatur kondensor dan evaporator terhadap nilai *Coefficient of Performance*, efisiensi eksergi, dan *total cost rate* yang ada pada sebuah sistem refrigereasi?
2. Bagaimana cara menentukan parameter operasi yang optimum secara termoekonomi pada sistem?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini ialah :

1. Mengetahui pengaruh temperatur kondensor dan evaporator terhadap nilai *Coefficient of Performance*, efisiensi eksergi, dan *total cost rate* pada sebuah sistem refrigerasi.
2. Menentukan parameter operasi yang optimum secara termoekonomi pada sistem.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem refrigerasi yang dibahas pada penelitian ini ialah *precision air conditioning* di *data center* yang menggunakan refrigeran R407C.
2. Sistem diasumsikan beroperasi dalam keadaan *steady state*, serta energi kinetik dan potensial diabaikan.
3. Kapasitas refrigerasi sebesar 76.88 kW.
4. Optimisasi multi-objektif (eksergi dan ekonomi) dilakukan menggunakan perangkat lunak yang dimiliki oleh program MATLAB 2019a yaitu *Optimization Toolbox* dengan metode algoritma genetika.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan penelitian tugas akhir ini terdiri atas lima bab. Bab pertama yaitu pendahuluan yang terdiri atas latar belakang, rumusan masalah dan tujuan penelitian serta batasan-batasan sebagai penyederhanaan masalah dan sistematika laporan. Bab kedua yaitu tinjauan Pustaka yang memaparkan teori dasar dan

penunjang berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan sebagai landasan untuk menyelesaikan penelitian ini. Bab ketiga yaitu metodologi penelitian yang menjelaskan alur penelitian dari awal yakni perumusan masalah hingga penulisan laporan. Selanjutnya, bab keempat yaitu analisis data dan pembahasan berisikan hasil yang didapat dari penelitian, sebagian data dan hasil perhitungan yang disajikan dalam bentuk grafik ataupun tabel. Terakhir, bab kelima berisi kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini dan saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut kedepannya.

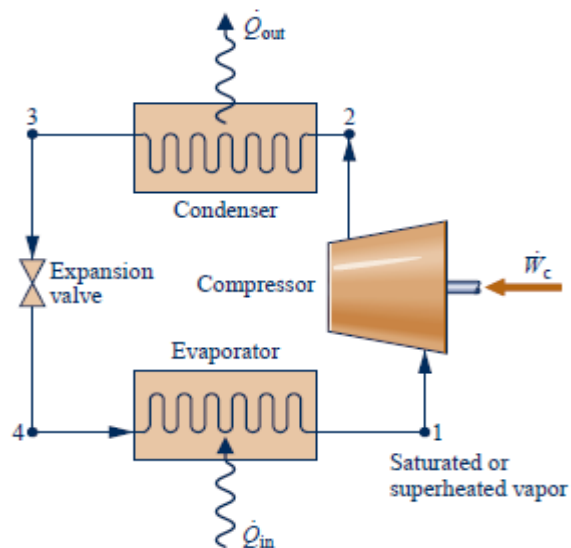
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Sistem Refrigerasi

Siklus refrigerasi merupakan kebalikan dari siklus *Carnot* uap panas yang membutuhkan kerja untuk memindahkan kalor dari temperatur lebih tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Pada sistem refrigerasi, tingkat keadaan refrigeran baik pada kondensor maupun evaporator senantiasa berada pada tingkat keadaan campuran cair-uap. Hal ini berkaitan dengan sifat laten zat sehingga refrigeran dapat menyerap dan membuang kalor sebanyak panas spesifik fluida tersebut. Di dalam operasinya, refrigeran selalu bercampur dengan minyak pelumas untuk mengurangi efek erosi pada instalasi yang akan dilalui refrigeran [11].

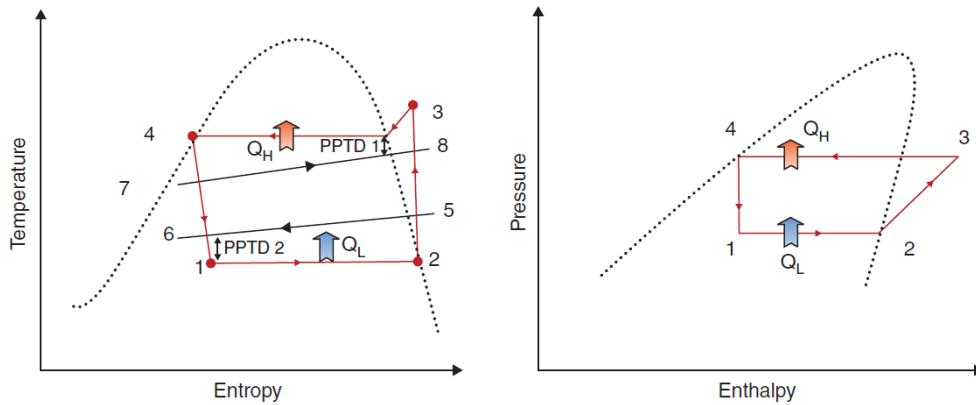


Gambar 2. 1 Siklus dan komponen sistem refrigerasi kompresi uap [12].

Komponen–komponen utama sistem refrigerasi biasanya terdiri dari sebagai berikut:

1. Kompresor
2. Kondensor
3. Evaporator
4. Katup Ekspansi`

Keempat komponen di atas merupakan komponen sistem refrigerasi kompresi uap. Adapun siklus kerja mesin refrigerasi kompresi uap digambarkan pada skematik dan diagram di bawah ini:



Gambar 2.2 Diagram $T-s$ (kiri) dan $p-h$ (kanan) pada sistem refrigerasi kompresi uap ideal [12].

Di dalam siklus kompresi uap ideal ini, refrigeran mengalami empat proses yaitu:

1. Proses 1-2: Refrigeran meninggalkan evaporator dalam wujud uap jenuh dengan temperatur dan tekanan rendah yang kemudian dikompresikan dengan tekanan yang tinggi (tekanan kondensor). Temperatur refrigeran naik selama proses kompresi ini di atas temperatur lingkungan. Proses kompresi ini berlangsung secara *isentropic* (adiabatik *reversible*).
2. Proses 2-3: Setelah mengalami proses kompresi, refrigeran berada dalam fase panas lanjut dengan tekanan dan temperatur tinggi dan masuk bagian kondesor, refrigeran akan membuang panas ke lingkungan sehingga temperatur turun dan menjadi cair.
3. Proses 3-4: Refrigeran dalam wujud cair jenuh bertekanan tinggi mengalir melalui katup ekspansi dan terjadi proses ekspansi dimana tekanan refrigeran akan diturunkan dan masuk ke dalam evaporator.
4. Proses 4-1: Refrigeran yang keluar dari ekspansi mempunyai temperatur yang rendah. Refrigeran tersebut akan masuk ke evaporator untuk menyerap kalor dari ruangan yang akan didinginkan. Proses penyerapan kalor menyebabkan temperatur

refrigeran naik dan berubah menjadi uap. Selanjutnya, refrigeran berfase uap akan masuk kembali ke kompresor.

2.2 Analisis Termodinamika

Hukum pertama termodinamika didefinisikan sebagai hukum kekekalan energi. Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan. Hal ini dapat dinyatakan untuk sistem umum sebagaimana perubahan bersih dalam total energi dari sistem selama proses adalah sama dengan perbedaan antara total energi masuk dan total energi keluar meninggalkan sistem [13].

Dari hukum pertama termodinamika, pengukuran kinerja dari siklus refrigerasi ditunjukkan oleh COP (*Coefficient of Performance*). Pada siklus kompresi uap, COP didefinisikan sebagai jumlah beban pendingin (Q_e) yang dapat diproduksi per satuan kerja (W_{net}) sebagaimana dirumuskan seperti pada persamaan berikut [14]:

$$COP = \frac{Q_e}{W_{net}} = \frac{T_e}{T_c - T_e} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (2.1)$$

Proses termodinamik *reversible* adalah proses yang dapat berbalik ke keadaan semula tanpa merubah sedikitpun kondisi lingkungan sehingga sistem dan lingkungan dapat kembali ke keadaan awalnya pada akhir dari proses balik. Jika ini terjadi, maka pertukaran panas bersih dan kerja bersih antara sistem dengan lingkungannya dapat dikatakan tidak ada (nol) [15].

Semua proses nyata adalah tidak mampu balik (*irreversible*). Beberapa faktor yang menyebabkan ketidakmampubalikan pada siklus refrigerasi adalah gesekan dan perpindahan panas melalui perbedaan temperatur batas pada evaporator, kompresor, kondensor dan pipa-pipa refrigeran, kondisi *subcooling* agar seluruh refrigeran berada pada kondisi cair pada saat memasuki katup ekspansi, dan *superheating* agar seluruh refrigeran berada pada kondisi uap sebelum memasuki kompresor, dan *input* panas pada pipa-pipa saluran refrigeran [16].

Ekerja merupakan bagian energi yang dapat dikonversikan menjadi kerja. Analisis eksergi adalah suatu metode analisis yang menerapkan hukum

termodinamika kedua yang digunakan untuk mengetahui efisien tidaknya suatu proses dalam penggunaan energi. Tujuan analisis eksergi adalah untuk mencari lokasi dalam proses yang transfer energinya tidak efisien [17]

Persamaan-persamaan yang mewakili energi dan kerugian eksergi di tiap komponen sistem refrigerasi adalah sebagai berikut [12] [14]:

a. Evaporator

$$Q_{evap} = \dot{m} (h_1 - h_4) \quad (2.2)$$

$$E_{xd,evap} = T_0 \left(\dot{m} (s_1 - s_4) - \frac{q_{evap}}{T_{evap}} \right) \quad (2.3)$$

b. Kondensor

$$Q_{cond} = \dot{m} (h_2 - h_3) \quad (2.4)$$

$$E_{xd,cond} = T_0 \left(\dot{m} (s_3 - s_2) + \frac{q_{cond}}{T_{cond}} \right) \quad (2.5)$$

c. Kompresor

$$W_{comp} = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (2.6)$$

$$E_{xd,comp} = \dot{m} T_0 (s_2 - s_1) \quad (2.7)$$

d. Katup Ekspansi

$$h_3 = h_4 \quad (2.8)$$

$$E_{xd,exp} = \dot{m} T_0 (s_3 - s_4) \quad (2.9)$$

e. Total exergy destruction

$$E_{xdest,total} = E_{xd,comp} + E_{xd,cond} + E_{xd,evap} + E_{xd,exp} \quad (2.10)$$

f. Efisiensi eksergi

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{E_{xdest,total}}{W} \quad (2.11)$$

2.3 Analisis Ekonomi

Faktor ekonomi pada penelitian ini akan difokuskan pada harga pembelian (*purchased cost of equipment*), *maintenance cost* dan biaya operasional dari masing-masing komponen. Faktor ini mempengaruhi nilai-nilai parameter sistem pada harga energi yang harus dibayar.

a. Investment and Maintenance Cost

Purchased cost of equipment (PCE) ditetapkan berdasarkan karakteristik termodinamika setiap komponen yang dirumuskan sebagai berikut [5] [18]:

PCE kompresor sebagai fungsi dari kerja (dalam kW):

$$C_{comp} = 10167.5 W_{comp}^{0.46} \quad (2.12)$$

PCE alat penukar kalor dapat ditulis sebagai fungsi dari kerja (kW) dan luas dimensi penukar kalor (A_o , dalam m^2)

Untuk kondensor:

$$C_{Cond} = 1397 A_{o,C}^{0.89} + 629.05 W_{Fan,Cond}^{0.76} \quad (2.13)$$

Untuk evaporator:

$$C_{Evap} = 1397 A_{o,E}^{0.89} + 629.05 W_{Fan,Evap}^{0.76} \quad (2.14)$$

Serta untuk katup ekspansi dapat ditulis sebagai berikut:

$$C_{expv} = 114.5 \dot{m} \quad (2.15)$$

Luas dari masing-masing penukar kalor dapat ditulis sebagai fungsi dari laju perpindahan kalor (Q), koefisien perpindahan kalor (U_o), dan perbedaan temperatur antara penukar kalor dengan lingkungan (ΔT), sebagai berikut [2] [19]:

$$A_o = \frac{Q}{U_o \Delta T} \quad (2.16)$$

Untuk mengkonversi biaya pembelian menjadi biaya per unit waktu pemakaian, maka digunakan persamaan :

$$C_k = C_k^0 \times CRF \times \Phi \quad (2.17)$$

Dimana Φ adalah *maintenance factor* diasumsikan 1.06 [18]. Pada *engineering economics*, variabel CRF merupakan *Capital Recovery Factor* yang seolah-olah memiliki arti sebagai faktor pengembalian modal dari biaya pembelian komponen per tahun [20]:

$$CRF = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.18)$$

Interest rate diasumsikan 5% dan umur pakai sistem ialah 4 tahun.

Sehingga *investment and maintenance cost rate* pada sistem ($\sum_k C_k$), dapat ditulis:

$$\sum_k C_k = C_{compressor} + C_{evaporator} + C_{kondensor} + C_{expv} \quad (2.19)$$

b. Operational Cost

Biaya operasional dari sistem ini berdasarkan pemakaian konsumsi daya pada kompresor dan *fan* evaporator-kondensor. Oleh karena itu, untuk menghitung biaya operasional digunakan persamaan berikut:

$$C_{op} = C_{electricity} \times \sum W_{component} \times H \quad (2.20)$$

dengan:

\dot{C}_{op} = Biaya operasional (*USD/year*)

$C_{electricity}$ = Biaya listrik (*USD/kWh*)

$W_{component}$ = Kerja setiap komponen (kW)

H = Total waktu operasi dalam setahun (*hour/year*)

Dengan demikian, dapat dihitung nilai dari *total cost rate* yang harus dikeluarkan sebagai berikut:

$$C_{TOT} = \sum C_k + \sum C_{op} \quad (2.21)$$

2.4 Beban Pendinginan

Beban pendinginan adalah suatu nilai yang biasa digunakan untuk menunjukkan berapa besar beban pendinginan dari suatu ruangan ataupun keseluruhan gedung yang nantinya akan dipasang sistem tata udara. Beban pendinginan secara keseluruhan merupakan gabungan dari beban eksternal dan beban internal. Beban eksternal merupakan beban yang berasal dari perpindahan panas yang berasal dari luar ruangan contohnya *heat transfer* yang terjadi lewat dinding, atap, jendela, pintu, dll. Selain itu, beban juga didapatkan dari dalam ruangan atau biasa disebut beban internal yang berasal dari panas yang ditimbulkan oleh manusia, alat elektronik, dan alat penerangan seperti lampu [21]. Dengan mengetahui besarnya beban pendinginan (*cooling load*) yang dihasilkan oleh ruangan maka kita dapat menentukan besarnya kapasitas beban pendinginan (*cooling capacity*) yang akan dipasang agar sesuai dengan kebutuhan.

Pada ruang data center ini, dikarenakan berada pada tengah bangunan perusahaan, sehingga perhitungan beban eksternal diabaikan. Beban internal yang berasal dari dalam ruangan bersumber dari panas server/peralatan IT yang terpasang dan panas lampu. Berikut adalah penjelasan mengenai beban internal yang terjadi di dalam ruangan.

a. Beban Pendinginan akibat Lampu

Beban pendinginan akibat lampu berasal dari panas yang dihasilkan lampu saat beroperasi. Lampu beroperasi dengan cara mengubah energi listrik menjadi panas dan cahaya. Panas yang terjadi pada lampu disalurkan menjadi tiga bagian, yaitu melalui radiasi ke permukaan sekitar, melalui konduksi ke material terdekat dan konveksi ke udara sekitar. Beban internal ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Q_{lampu} = 1,2 \times \text{total lights watt} \times CLF \quad (2.22)$$

CLF atau *Cooling Load Factor* bernilai 1 untuk ruangan data center yang beroperasi 24 jam sehari.

b. Beban Pendinginan akibat Perangkat Listrik

Beban pendinginan akibat perangkat listrik yang ada pada data center ini ialah perangkat server. Peralatan ini akan memberikan beban pendinginan sensibel. Besar beban peralatan sebanding dengan konsumsi daya masing-masing server, disipasi kalor yang dihasilkan peralatan server dapat dikatakan sama dengan besar daya masukan. Lebih dari 99% energi yang masuk ke peralatan server dikonversikan menjadi panas, sehingga perlu diketahui besarnya daya server yang dimiliki.

Persamaan

$$Q_{server} = total\ jumlah\ server \times total\ daya \quad (2.23)$$

2.5 Optimisasi Multiobjektif dengan Algoritma Genetika

Optimisasi terbagi menjadi dua kelompok berdasarkan aspek keputusan yang dijadikan pertimbangan, yakni optimisasi objektif tunggal dan optimisasi multiobjektif. Pada kasus multiobjektif, tidak hanya didapatkan solusi tunggal yang bersifat optimum terhadap seluruh fungsi objektif sehingga solusi yang dihasilkan bersifat optimum lokal. Permasalahan objektif didefinisikan oleh persamaan berikut [2]:

$$\min/\max F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \quad (2.24)$$

$$g(x) \leq 0; h(x) = 0 \quad (2.25)$$

$$x_l < x < x_u \quad (2.26)$$

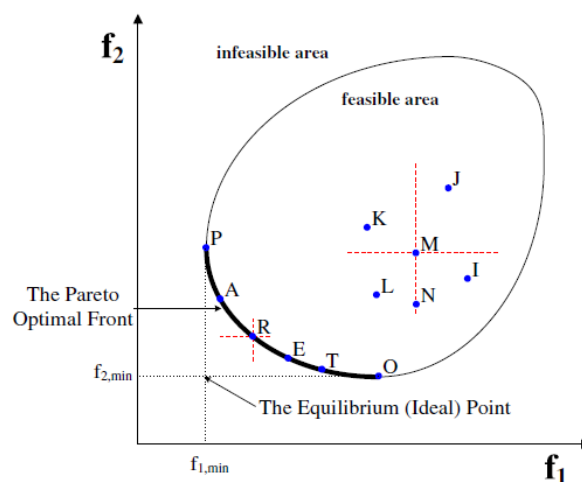
dengan:

$f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$: Sejumlah fungsi objektif dengan nilai x merupakan parameter yang dicari nilai optimumnya yang biasa disebut variabel keputusan (*decision variable*).

$g(x)$ dan $h(x)$: Batasan-batasan yang dihadapi oleh fungsi

x_u dan x_l : Batas nilai tertinggi dan batas nilai terkecil dari parameter yang dicari

Namun, optimisasi terhadap fungsi $F(x)$ sering dihadapi oleh permasalahan terkait nilai objektif yang dicari. Di satu sisi, diharapkan $f_1(x)$ bernilai maksimum, dan di sisi lain $f_2(x)$ diharapkan bernilai minimum sehingga optimisasi secara multiobjektif akan memberikan sekumpulan solusi yang optimum terhadap kedua fungsi tersebut secara simultan. Sekumpulan solusi optimum yang dihasilkan dari permasalahan optimisasi multiobjektif disebut sebagai *pareto optimality solutions* atau lebih dikenal *pareto frontier*. Setiap solusi *pareto frontier* merupakan solusi yang optimum karena tidak ada solusi yang secara mutlak lebih baik dibanding solusi lainnya. Sehingga, pemilihan solusi yang diambil akan bergantung pada preferensi kriteria yang diinginkan oleh pengambil keputusan [21].



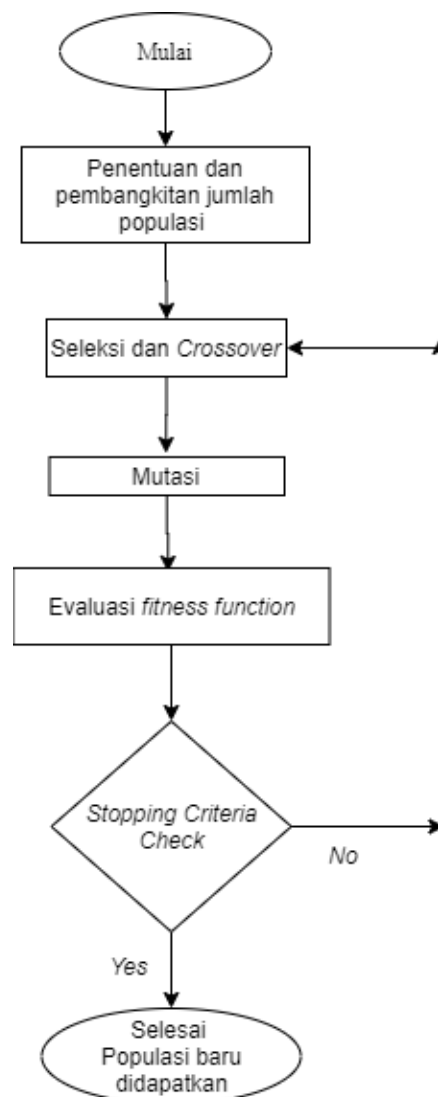
Gambar 2. 3 Skema daerah objektif. [21]

Algoritma genetika ialah teknik pencarian yang digunakan dalam komputasi untuk mendapatkan solusi yang tepat atau perkiraan solusi untuk optimisasi. Algoritma genetika membutuhkan dua hal untuk didefinisikan [3], yaitu:

- a. Sebuah *genetic representation* dari sebuah *solution domain* (domain solusi).
- b. Sebuah *fitness function* untuk mengevaluasi sebuah domain solusi.

Pada algoritma genetika, setiap individu memiliki solusi yang diseleksi berdasarkan nilai kecocokan (*fitness*). Solusi dari individu yang dianggap lebih memiliki kecocokan dibanding yang lain diukur dalam *fitness function* yang akan diseleksi ke dalam populasi. Pemberian peringkat (*rate*) untuk setiap individu

dilakukan dalam proses seleksi dan hanya individu terbaik yang akan terseleksi. Selama proses pencocokan, individu baru akan tercipta melalui rekombinasi gen dari individu yang berbeda, atau disebut persilangan (*crossover*). Karakteristik dari tiap-tiap individu yang berhasil melewati generasi berikutnya diwakili oleh suatu nilai solusi yang baru. Maka tercipta kembali kumpulan individu baru di dalam populasi sehingga siklus evolusi terus berjalan [22].



Gambar 9.4 Diagram alir algoritma genetika [3].

Pada penelitian ini, metode algoritma genetika diterapkan pada sistem refrigerasi untuk melakukan optimisasi multi-objektif. Pada penelitian ini, terdapat

dua fungsi objektif, yaitu efisiensi eksergi dan *total cost rate* dimana efisiensi eksergi sistem diharapkan bernilai maksimum namun biaya yang dikeluarkan minimum.

2.6 TOPSIS Decision Making

Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) adalah metode untuk pengambilan keputusan alternatif pilihan yang merupakan alternatif yang mempunyai jarak terkecil dari solusi ideal positif dan jarak terbesar dari solusi negatif dari sudut pandang geometris dengan menggunakan jarak *Euclidean*. TOPSIS menghasilkan solusi dengan menentukan kedekatan relatif suatu alternatif terhadap solusi ideal positif. Alternatif-alternatif yang telah diranking kemudian dijadikan sebagai referensi bagi pengambil keputusan untuk memilih solusi terbaik yang diinginkan [23].

Langkah-langkah penyelesaian seperti berikut [18]:

Langkah ke-1: Membuat matriks keputusan mengacu pada sejumlah m alternatif yang akan dievaluasi berdasarkan n kriteria:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mj} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Langkah ke-2: Membuat matrik keputusan yang ternormalisasi:

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (2.27)$$

Langkah ke-3: Membuat matriks keputusan yang ternormalisasi terbobot atau mengalikan dengan faktor massa.

$$V_{ij} = w_i \times a_{ij} \quad (2.28)$$

Langkah ke-4: Menentukan matriks solusi ideal positif dan negatif.

$$A_j^+ = \{ \text{Max } V_{ij} \mid j \in K \}, \{ \text{Min } V_{ij} \mid j \in K^I \} \quad (2.29)$$

$$A_j^- = \{ \text{Min } V_{ij} \mid j \in K \}, \{ \text{Max } V_{ij} \mid j \in K^I \} \quad (2.30)$$

dimana K adalah *benefit* parameter dan K^I adalah *non-benefit* parameter atau *cost* parameter.

Langkah ke-5: Menghitung pemisahan solusi ideal positif dan negatif.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - A_j^+)^2} \quad (2.31)$$

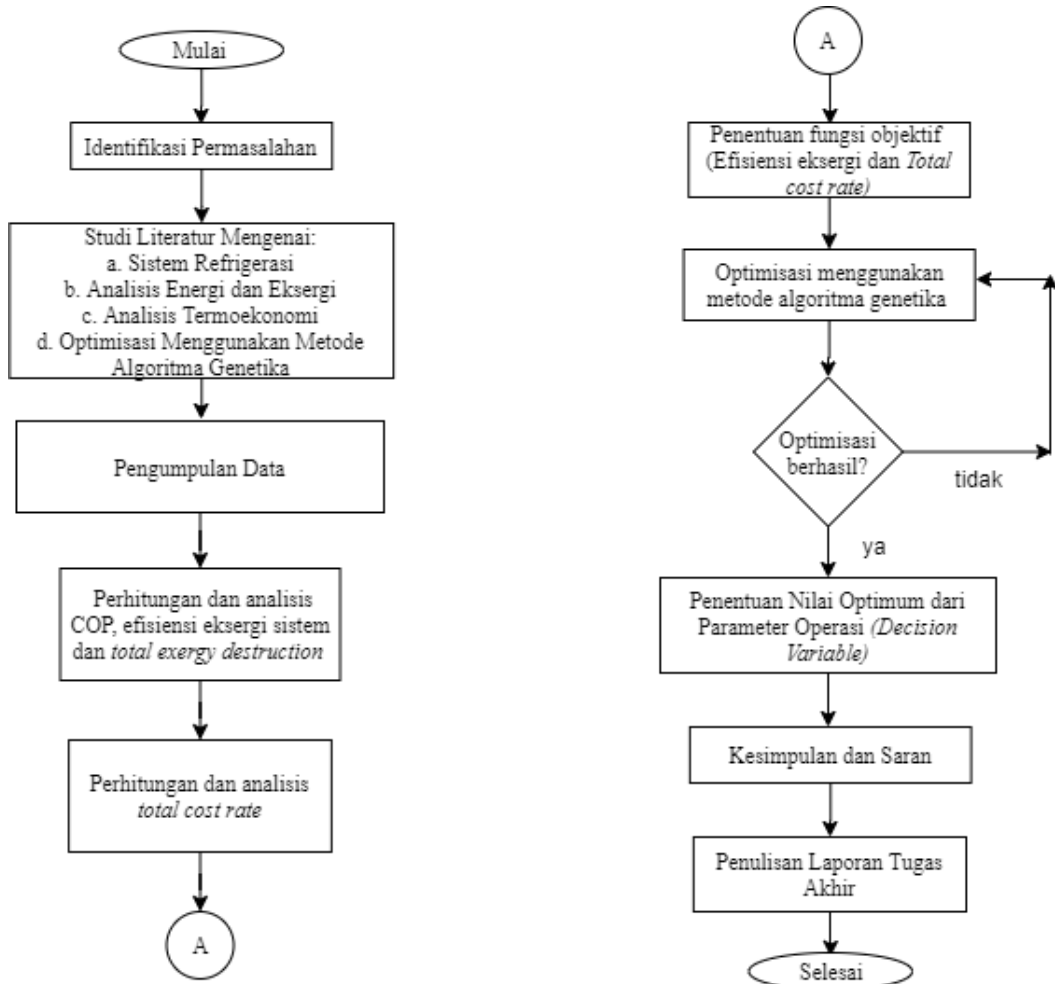
$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - A_j^-)^2} \quad (2.32)$$

Langkah ke-6: Menghitung kedekatan terhadap solusi ideal positif:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (2.33)$$

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Adapun tahapan pelaksanaan aktivitas dalam penelitian tugas akhir kali ini dapat dilihat dalam diagram alir sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep-konsep yang berhubungan dengan penelitian ini. Literatur yang digunakan adalah buku dan artikel jurnal dengan topik-topik yang meliputi sistem refrigerasi, hukum pertama dan hukum kedua termodinamika, serta perhitungan *total exergy destruction* dan efisiensi eksergi, proses analisis termoekonomi dan optimisasi menggunakan metode algoritma genetika. Pematangan konsep terkait topik tersebut sangat

diperlukan untuk dapat memahami fenomena yang akan dihitung dan menganalisis hasil perhitungan dengan baik.

3.2 Pengumpulan Data

Pada data center PT.X sistem refrigerasi yang digunakan ialah sistem refrigerasi berjenis *precision air conditioning* (PAC) tipe CITEC ESD80. Tipe refrigerasi seperti ini sangat cocok digunakan untuk ruangan yang membutuhkan pendinginan secara kontinyu karena mampu beroperasi dengan baik selama 24 jam sehari.



Gambar 3. 2 Sistem Refrigerasi CITEC ESD80.

Data-data yang dikumpulkan didapatkan langsung ketika melakukan survei ke *data center* PT. X dengan rincian data yang perlukan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Daftar data yang dibutuhkan.

Analisis Termodinamika	Nilai	Satuan
Rentang temperatur kerja evaporator	-6 – 6	°C
Rentang temperatur kerja kondensor	40 – 60	°C
Temperatur lingkungan	32	°C
Entalpi	*	Kj/Kg
Entropi	*	Kj/Kg.K
Kapasitas pendingin	76,88	kW
Daya kerja fan evaporator	2,4	kW
Daya kerja fan kondensor	2,2	kW
Analisis Ekonomi	Nilai	Satuan
Umur pemakaian	4	Tahun
Total waktu operasi	8760	Jam/tahun
Biaya listrik	0,099	USD/kWh
<i>Interest rate</i>	5	%
<i>Maintenance factor</i>	1,06	-
Analisis Cooling Load	Nilai	Satuan
Total daya lampu	0,8	kW

(*)Data entalpi dan entropi yang dibutuhkan untuk penelitian ini didapatkan berdasarkan tabel properti termodinamika sesuai dengan refrigeran yang digunakan pada sistem refrigerasi di *data center* yaitu R407C.

Pada data center PT.X ini terdiri dari 13 baris kumpulan rak server yang mana 12 baris terdiri dari 7 rak server dan 1 baris terdiri dari 3 rak server. Namun tidak semua rak tersebut telah terisi saat ini, seperti ditunjukkan pada tabel 3.2

Tabel 3. 2 Data daya server

Daya Server (W)							
Row (Baris)	Rak						
	1	2	3	4	5	6	7
1	-	-	-	-	-	825	1647
2	-	-	-	-	-	756	-
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	5782	7432	8452	8827	5832	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	746	450	-
9	8352	8792	8876	-	-	-	-
10	2547	-	-	-	290	484	290
11	8560	568	290	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-

Jenis server yang digunakan pada *data center* ini ialah *Supermicro* dan HP

3.3 Analisis Termodinamika

Pada bagian ini yang akan dihitung dan dianalisis meliputi COP, *total exergy destruction* dan efisiensi eksergi sistem terhadap temperatur evaporator dan kondensor. Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menyelesaikan perhitungan ini telah dijabarkan pada sub bab 2.2. Analisis termodinamika dari sistem refrigerasi yang dilakukan pada penelitian tugas akhir ini menggunakan asumsi-asumsi:

- Semua komponen pada sistem bekerja dalam kondisi *steady*.
- Perubahan energi kinetik dan dan potensial diabaikan.

3.4 Analisis Ekonomi

Faktor ekonomi pada penelitian ini dibatasi oleh dua hal, yakni harga pembelian dan biaya operasional dari masing-masing komponen. Pada penelitian tugas akhir ini, persamaan-persamaan dan variabel-variabel yang digunakan untuk menentukan harga pembelian dan biaya operasional komponen sistem refrigerasi bersifat fleksibel, yang artinya dapat berubah suatu waktu bergantung pada kondisi perekonomian dan faktor lain yang berpengaruh. Persamaan yang digunakan seperti yang telah dijabarkan pada sub bab 2.3.

Analisis ekonomi yang dilakukan pada penelitian sistem refrigerasi ini menggunakan data sebagai berikut:

- a. Umur pakai sistem (*lifetime, n*) selama 4 tahun.
- b. Total waktu operasi sistem (*H*) selama 8760 jam dan sistem dioperasikan 24 jam sehari.
- c. Biaya listrik diasumsikan sebesar \$0,099 per kWh.
- d. Laju suku bunga (*interest rest, i*) diasumsikan sebesar 5%, berdasarkan laju suku bunga bank indonesia 2020.
- e. *Maintenance factor* diasumsikan $1.06^{[18]}$.

3.5 Optimisasi Menggunakan Metode Algoritma Genetika

Pada penelitian ini terdapat dua fungsi objektif yaitu efisiensi eksergi dan *total cost rate* yang dikeluarkan. Penentuan kondisi operasi yang optimum dari sistem ditentukan berdasarkan parameter-parameter operasi yang paling mempengaruhi sistem atau biasanya disebut *decision variable* seperti pada Tabel 3.2 dengan batasan yang telah ditentukan. Metode optimisasi dilakukan dengan cara memvariasikan kedua *decision variable* tersebut pada rentang nilai tertentu, kemudian dicari nilai kombinasi dari kedua nilai yang menghasilkan kondisi optimum menggunakan TOPSIS *Decision Making*.

Tabel 3. 3 *Decision Variabel*

<i>Decision Variabel</i>	Rentang nilai
Temperatur Evaporator	$-6^{\circ}\text{C} \leq T_{evap} \leq 6^{\circ}\text{C}$
Temperatur Kondensor	$40^{\circ}\text{C} \leq T_{cond} \leq 60^{\circ}\text{C}$

Constraint ditentukan berdasarkan kondisi operasi *plant*. Proses optimisasi multiobjektif dengan metode algoritma genetika dilakukan menggunakan program MATLAB 2019a melalui fungsi *multiobjective optimization using genetic algorithm* yang terdapat pada *optimization tools* dengan dua *decision variable*. *Script* fungsi objektif telah terlampir pada lampiran penelitian ini.

3.6 Penarikan Kesimpulan dan Saran

Tahap ini berisi jawaban dari permasalahan-permasalahan yang telah dirumuskan, selain itu terdapat pula saran dari penulis tentang hasil penelitian yang telah dilakukan.

3.7 Penulisan Laporan

Setelah mendapatkan semua hasil penelitian sesuai dengan yang telah direncanakan, maka tahapan terakhir ialah penyusunan laporan Tugas Akhir, sesuai dengan sistematika laporan yang telah dijelaskan pada sub bab 1.5.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

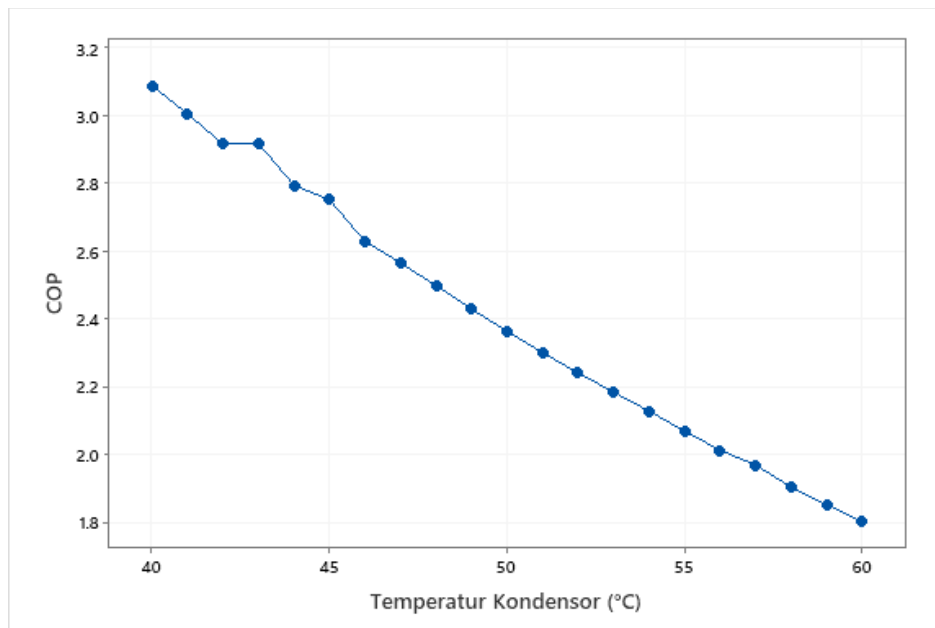
4.1 Analisis Termoekonomi

Pada *data center* PT. X, sistem refrigerasi digunakan untuk menjaga temperatur ruang yang berisikan berbagai macam *server* yang tersusun rapi pada *rack server*. Oleh karena temperatur ruangan sangat berpengaruh pada kinerja dan *lifetime server*, maka sistem refrigerasi yang ada pada *data center* tersebut digunakan selama 24 jam sehari tanpa henti. Peningkatan dan penurunan temperatur pada alat penukar panas menyebabkan terjadinya ireversibilitas atau ketidakmampu balikan sistem sehingga sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem (COP). COP merupakan perbandingan tingkat keluaran panas dengan masukan energi atau disebut juga sebagai jumlah beban pendingin yang dapat diproduksi per satuan kerja, serta *exergy destruction* dan efisiensi eksergi yang dimana analisis eksergi ini bertujuan untuk mengetahui apakah sistem refrigerasi yang terpasang telah bekerja secara efisien dalam penggunaan energinya.

Penggunaan sistem refrigerasi secara terus menerus untuk mendinginkan suatu ruangan membutuhkan biaya yang tidak sedikit. Biaya yang dikeluarkan ini pun dipengaruhi oleh beban pendinginan, kerja kompresor, kerja kipas pada kondensor dan evaporator. Pada penelitian ini, analisis ditekankan pada bagaimana respon sistem terhadap peningkatan temperatur kondensor dan evaporator dengan rentang temperatur kerja kondensor 40°C hingga 60°C dan evaporator -6°C hingga 6°C.

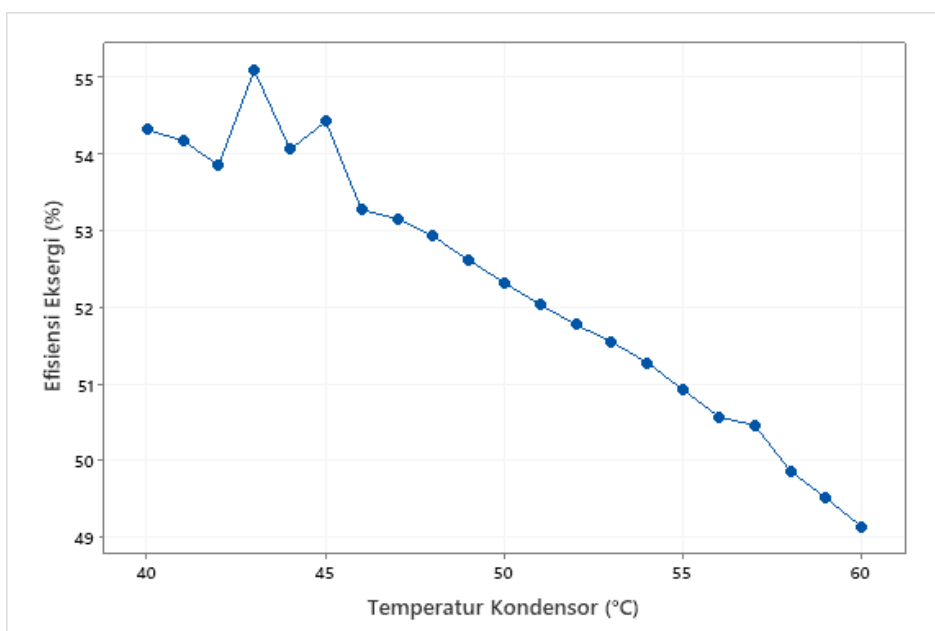
4.1.1 Pengaruh Temperatur Kondensor

Pada Gambar 4.1 dan 4.2 ditunjukkan nilai COP yang menurun dari 3,09 hingga 1,8 dan efisiensi eksergi juga turun dari 54,32% menjadi 49,14%. Namun, pada temperatur kondensor 43, 44, dan 45°C efisiensi eksergi mengalami kenaikan sebelum akhirnya turun kembali, hal ini terjadi sejalan dengan perubahan *exergy destruction* yang terjadi pada temperatur kondensor tersebut. Keduanya, COP dan efisiensi eksergi mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya temperatur kondensor ketika temperatur evaporator tetap pada -6°C.



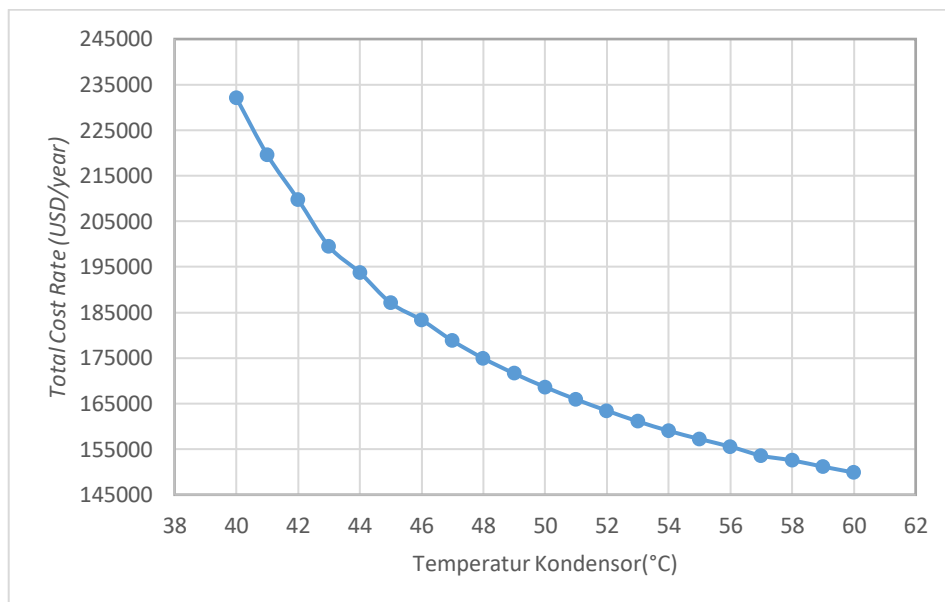
Gambar 4. 1 Pengaruh temperatur kondensator terhadap nilai COP

Dalam sistem refrigerasi, temperatur kondensator harus lebih tinggi dibandingkan temperatur lingkungan agar dapat membuang kalor ke lingkungan. Oleh karena itu daya listrik yang dibutuhkan oleh kompresor untuk melakukan proses kompresi juga semakin meningkat karena dipaksa untuk menghasilkan tekanan yang cukup tinggi agar temperatur yang dihasilkan juga tinggi. Hal tersebut menyebabkan COP sistem menurun sejalan dengan naiknya temperatur kondensator.



Gambar 4. 2 Pengaruh temperatur kondensator terhadap nilai efisiensi eksergi.

Namun dengan semakin tinggi temperatur kondensor, maka semakin besar pula *exergy destruction* (kehancuran eksergi) yang didapatkan karena nilai entropi yang semakin meningkat disebabkan oleh perbedaan temperatur alat penukar panas ini dengan lingkungan. *Exergy destruction* berbanding terbalik dengan efisiensi eksergi sebagaimana mengacu pada persamaan 2.11 semakin tinggi *exergy destruction*, maka semakin rendah efisiensi eksergi yang dicapai. Proses ini juga disebut sebagai ireversibilitas atau ketidakmampu balikan sistem yang biasanya terjadi pada suatu sistem aktual.

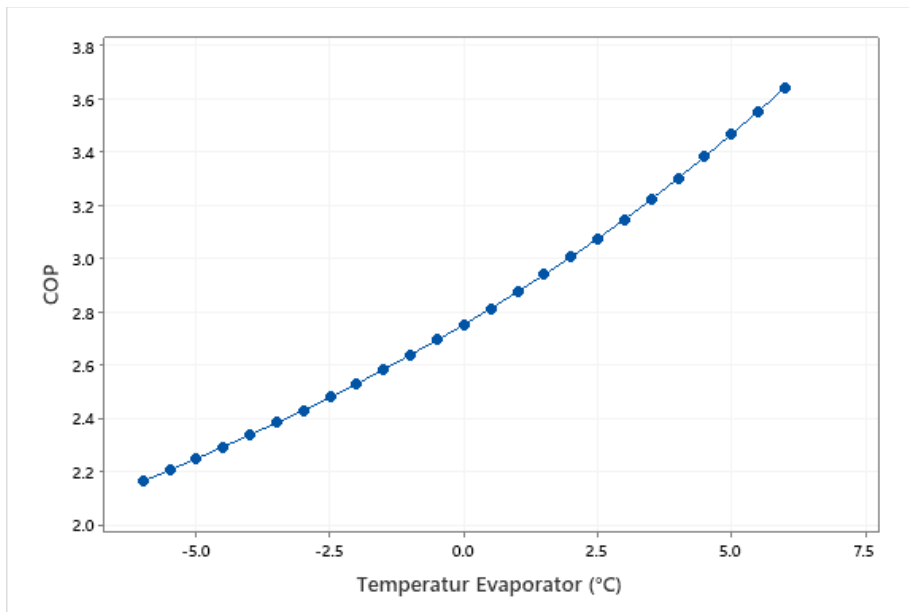


Gambar 4. 3 Pengaruh temperatur kondensor terhadap biaya total.

Total cost rate mengalami penurunan seiring dengan naiknya temperatur kondensor. Hal ini dikarenakan dengan meningkatnya temperatur kondensor maka semakin berkurang area perpindahan panas secara keseluruhan pada kondensor namun kerja kompresor yang dibutuhkan tetap lebih besar. Dengan demikian, biaya operasional pun akan terus meningkat seiring dengan naiknya temperatur kondensor dan berbanding terbalik dengan biaya *investment and maintenance* yang menurun dalam jumlah *total cost rate* selama setahun.

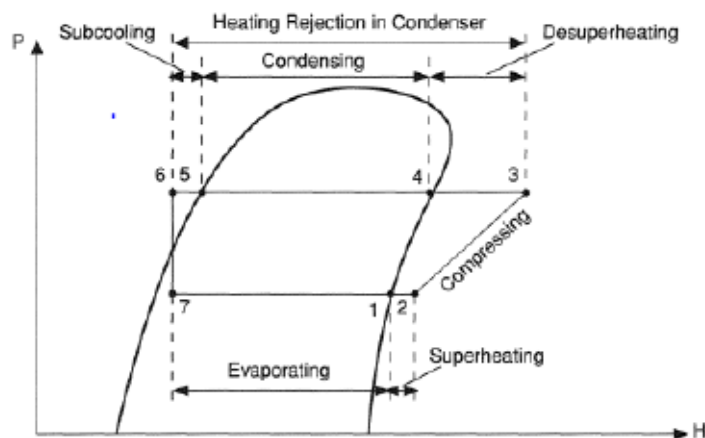
4.1.2 Pengaruh Temperatur Evaporator

Pada Gambar 4.4 dan 4.5 ditunjukkan nilai COP yang meningkat dari 2,16 hingga 3,64 dan efisiensi eksergi yang meningkat dari 43,60% hingga 52,88%. Kedua parameter meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur evaporator ketika temperatur kondensor dijaga konstan pada 60°C.



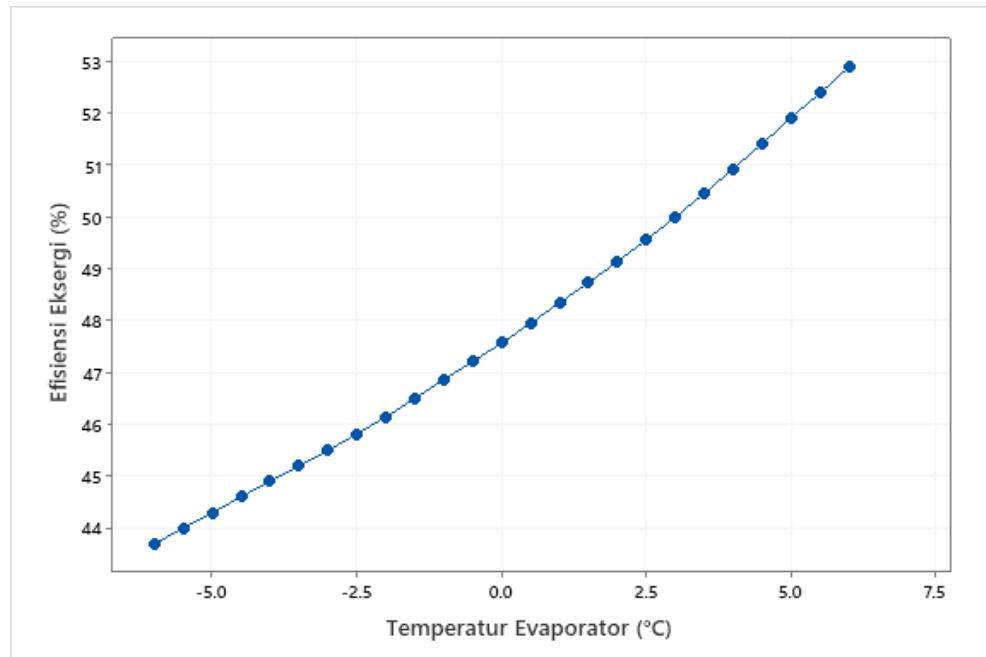
Gambar 4. 4 Pengaruh temperatur evaporator terhadap nilai COP.

Setelah refrigeran diubah dari campuran uap cair menjadi cairan penuh di dalam kondensor, refrigeran melewati katup ekspansi untuk diturunkan tekanannya sehingga temperatur refrigeran juga menurun yang kemudian diarahkan menuju evaporator.



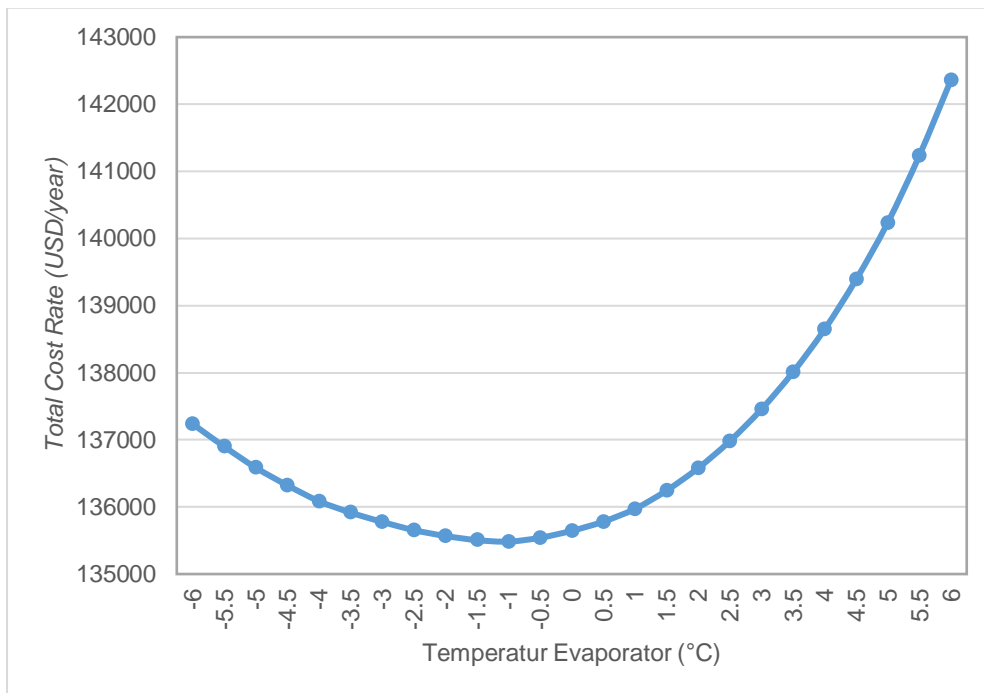
Gambar 4. 5 Diagram $p-h$ sistem refrigerasi [24]

Pada titik 2 (Gambar 4.5), ketika temperatur evaporator rendah maka rasio tekanan kompresor meningkat hal tersebut kemungkinan terjadi karena masih terdapat sedikit refrigerant yang berfase cair saat menuju kompresor, sehingga kompresor akan dipaksa bekerja lebih untuk menghasilkan tekanan yang lebih tinggi agar refrigeran sepenuhnya berfase uap panas setelah melewati kompresor.



Gambar 4. 6 Pengaruh temperatur evaporator terhadap efisiensi eksergi.

Oleh karena itu, ketika temperatur evaporator terus meningkat maka rasio tekanan dan daya kompresor menurun sehingga COP dan efisiensi eksergi mengalami peningkatan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan 4.6.



Gambar 4. 7 Pengaruh temperatur evaporator terhadap biaya total.

Total cost rate seperti ditunjukkan Gambar 4.6 mengalami penurunan namun pada titik temperatur evaporator $-0,5^{\circ}\text{C}$ kembali mengalami kenaikan biaya. Hal ini bisa saja terjadi disebabkan oleh fakta bahwa ketika temperatur evaporator meningkat, kebutuhan daya kompresor menurun sehingga biaya yang diperlukan juga mengalami penurunan [14].

4.2 Analisis Optimisasi Multiobjektif

Optimisasi terhadap sistem refrigerasi pada PT. X ini dilakukan dengan cara menetapkan nilai parameter-parameter operasi yang akan menghasilkan kondisi paling optimum. Kondisi optimum dapat berupa nilai maksimum efisiensi eksergi ataupun biaya minimum yang dikeluarkan. Parameter-parameter operasi atau yang disebut juga sebagai variabel keputusan (*decision variable*) ini akan menentukan kondisi sistem secara menyeluruh dari aspek energi dan ekonomi. Sehingga, pada penelitian ini *decision variable* terdiri dari temperatur evaporator dan temperatur kondensor.

Tujuan dari dilakukannya optimisasi ini untuk mendapatkan kondisi optimum secara termoekonomi, dimana sistem refrigerasi dapat bekerja dengan efisiensi

eksergi yang besar namun biaya yang dikeluarkan rendah sehingga dilakukanlah optimisasi secara multi-objektif.

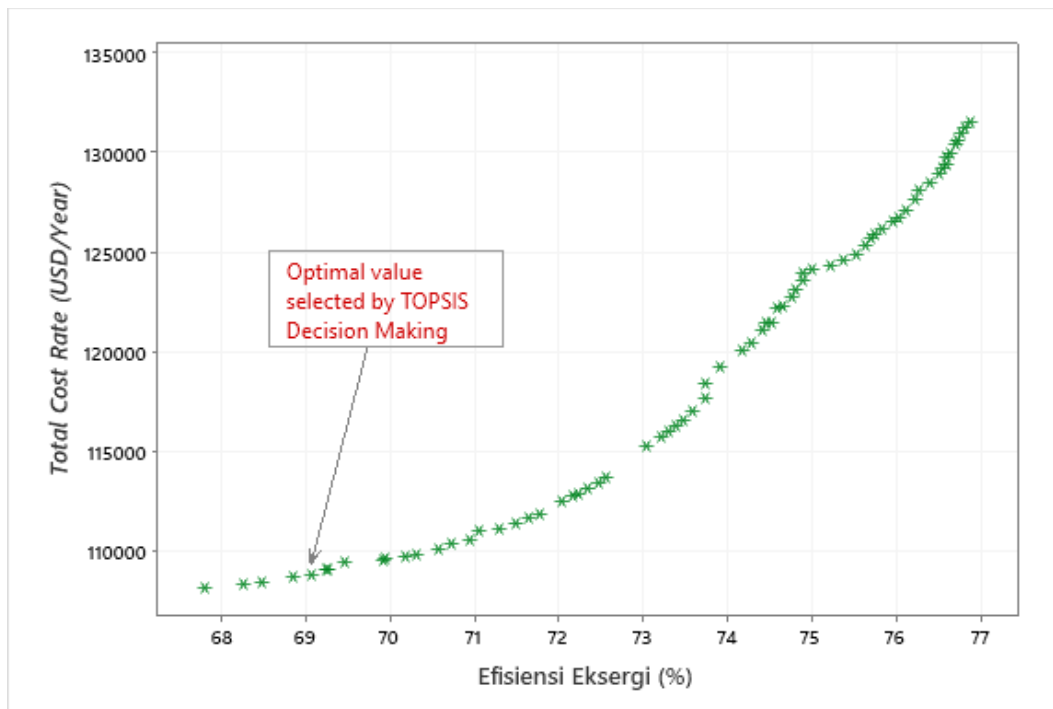
Diketahui bahwa beban pendinginan (*cooling load*) yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada tabel 4.1 ialah sebesar 80,658 kW dengan 20 peralatan server yang sedang aktif terpasang pada setiap rak dari 91 rak yang tersedia dengan besar daya yang berbeda-beda (tabel 3.2). Pada *data center* PT.X dengan luas ruangan 180,18 m² terdapat tiga sistem yang terpasang masing-masing memiliki spesifikasi kapasitas beban pendinginan maksimum (*cooling capacity*) sebesar 76,88 kW sehingga total kapasitas refrigerasi yang terpasang dalam ruangan tersebut ialah 230,64 kW, pemasangan sistem telah memperkirakan jika seluruh rak server telah terisi. Optimisasi pada penelitian ini hanya dilakukan pada satu sistem refrigerasi maka besar kapasitas beban pendinginan yang digunakan tetap sesuai spesifikasi maksimum per sistem yaitu 76.88 kW.

Tabel 4. 1 Beban Pendinginan *Data Center*

Beban Lampu	Beban Server	Total Beban Pendinginan
kW		
0,96	79,698	80,658

Kapasitas pendinginan tersebut ditetapkan sebagai batasan-batasan (*constraints*) yang ada pada optimisasi ini. Nilai *decision variable* divariasikan berdasarkan daerah operasi yang dapat dilakukan oleh sistem, dengan temperatur evaporator antara -6°C sampai 6°C, dan temperatur kondensor antara 40°C sampai 60°C.

Hasil dari optimisasi secara multi-objektif ini merupakan sekumpulan solusi optimum dari parameter operasi yang ditetapkan, tidak ada solusi yang lebih baik dibanding solusi lainnya. Sehingga, untuk memilih solusi yang akan digunakan, dikembalikan kepada pengambil keputusan apakah aspek termodinamika yang lebih diperhatikan atau aspek ekonomi. Untuk mempermudah penulis dalam menentukan keputusan ini, maka penulis menggunakan metode TOPSIS *decision making*.



Gambar 4. 8 Pareto front dari optimisasi multiobjektif pada sistem refrigerasi.

TOPSIS decision making method, metode ini telah terbukti menjadi salah satu *tools* yang kuat dalam prosedur pengambilan keputusan setelah sistem dioptimisasi [5]. Dengan menggunakan metode TOPSIS sebagaimana yang telah dijabarkan pada sub bab 2.5, poin solusi ideal positif S_i^+ dan ideal negatif S_i^- (*non ideal*) harus diperoleh terlebih dahulu. Titik ideal positif ialah titik dimana nilai optimal dari setiap solusi akan dicapai. Sementara titik ideal negatif ialah titik dimana nilai terburuk untuk setiap solusi diperoleh [25]. Oleh karena itu, jarak pada ideal positif dan ideal negatif dievaluasi untuk semua hasil solusi dan solusi dengan nilai maksimum koefisien kedekatan (C_i) paling maksimum akan dipilih sebagai nilai optimum akhir.

Tabel 4. 2 Hasil optimisasi multiobjektif termoekonomi.

<i>Decision Variable / Parameter Operasi</i>	Nilai Optimum
Temperatur Evaporator (°C)	-3,92
Temperatur Kondensor (°C)	53,65

Seperti pada Gambar 4.7, titik nilai optimum ditunjukkan berada pada nilai efisiensi eksergi sebesar 69,1% dan biaya total tahunan yang dikeluarkan ialah 108.832 USD/year. Pada Tabel 4.1 ditampilkan nilai parameter operasi yang dibutuhkan untuk mencapai performansi sistem paling optimum berdasarkan metode optimisasi multiobjektif. Hasil performansi sistem lainnya dapat dilihat pada Tabel 4.2

Tabel 4. 3 Hasil performansi sistem refrigerasi pada nilai optimum.

Parameter	Nilai
Kerja kompresor (kW)	34,86
COP	2,2
Efisiensi Eksergi (%)	69,1
<i>Total Investment and Maintenance Cost (USD/year)</i>	74.606,71
<i>Total Operational Cost (USD/year)</i>	34.224,39
<i>Total Cost Rate (USD/year)</i>	108.832

Untuk mendapatkan dan mempertahankan kondisi ruangan tetap nyaman bagi server yang terpasang maka dibutuhkan daya alat pendingin sebesar 34,86 kW. Perhitungan COP secara manual menggunakan persamaan 2.1 dan tabel refrigeran R407C didapatkan nilai COP yang sama dengan hasil optimisasi, sebagai berikut:

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$COP = \frac{406,79 - 283,05}{462,90 - 406,79}$$

$$COP = 2.2$$

Pada tabel 4.3 ditunjukkan biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan untuk mengoperasikan sistem sesuai kondisi saat ini (eksisting) dibandingkan dengan hasil optimisasi yang didapatkan. Berdasarkan perbandingan ini dapat dilihat

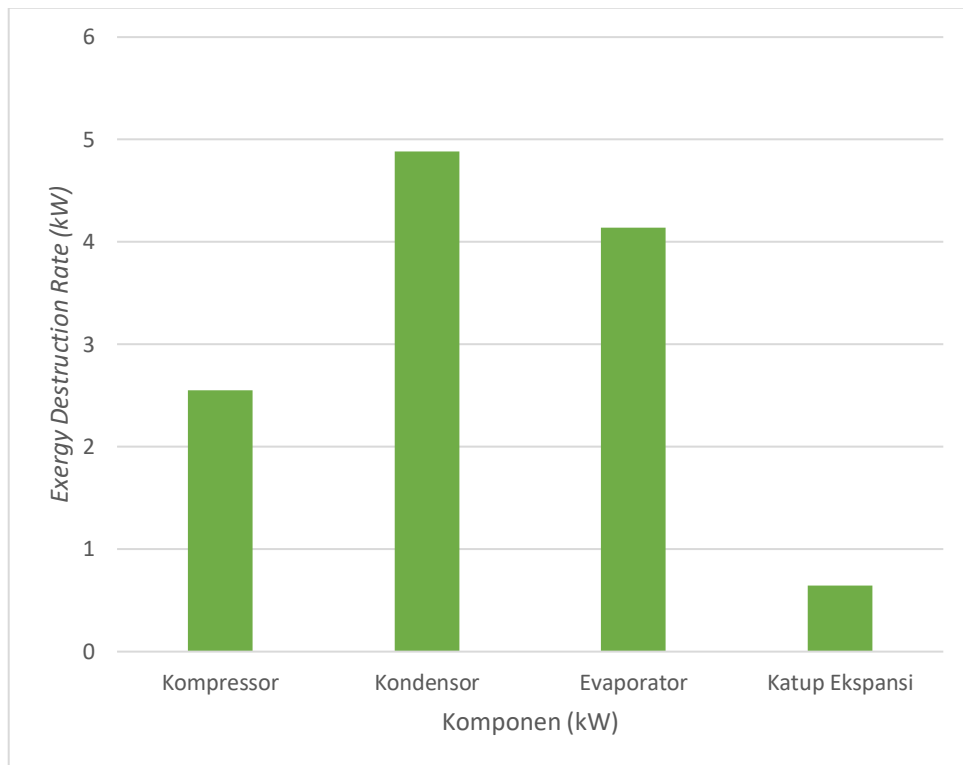
bahwa biaya yang dikeluarkan ketika sistem telah dioptimisasi lebih besar dibanding kondisi eksisting atau terjadi kenaikan sebesar 52% dari keadaan awal namun tentunya kualitas performansi yang dihasilkan oleh sistem lebih baik setelah dilakukannya optimisasi. Hal ini dapat dijadikan pertimbangan untuk perusahaan sebelum mengaplikasikan parameter operasi yang didapatkan pada penelitian ini.

Tabel 4. 4 Perbandingan *Operational Cost Rate* Eksisting dan Optimisasi

<i>Total Operational Cost Rate</i> (USD/year) (Kondisi Eksisting)	<i>Total Operational Cost Rate</i> (USD/year) (Kondisi Setelah Dioptimisasi)
22.513,55	34.224,39

Pada siklus termodinamika dalam sistem refrigerasi seperti perubahan fase pada evaporator dan kondensor, meningkatnya tekanan dan temperatur setelah proses kompresi dan penurunan tekanan pada proses ekspansi, ini semua merupakan salah satu penyebab terjadinya pembangkitan entropi sehingga mengakibatkan terjadinya irreversibilitas atau proses yang tidak mampu balik ke kondisi semula. Irreversibilitas menyebabkan terjadinya kehancuran eksergi (*exergy destruction*) pada sistem. Sistem refrigerasi akan selalu mengalami pertukaran panas sehingga akan selalu ada kerugian yang terjadi, dalam artian sistem refrigerasi tidak dapat mengalami kondisi setimbang dengan lingkungannya.

Pada parameter operasi hasil optimisasi didapatkan *exergy destruction* yang terjadi pada setiap komponen untuk sistem refrigerasi seperti ditampilkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Eksergi *destruction* pada parameter operasi optimum.

Seperti pada Gambar 4.9, jumlah tertinggi tingkat *exergy destruction* terjadi pada kondensor sebesar 4,8813 kW dan evaporator 4,1367 kW dimana keduanya merupakan alat yang berfungsi sebagai penukar panas. Sehingga, ketika terjadi perbedaan temperatur yang tinggi antara sistem dengan lingkungan, maka sistem menghasilkan nilai *exergy destruction* yang tinggi pula. Selanjutnya, kompresor yang memiliki nilai *exergy destruction* sebesar 2,5551 kW terjadi karena proses kompresi yang menyerap daya listrik cukup tinggi pada kompresor. Hal ini menyebabkan laju aliran massa, temperatur dan tekanan refrigeran meningkat sehingga perubahan nilai entropi atau pembangkitan nilai entropi menjadi tinggi. Pada katup ekspansi, *exergy destruction* yang dihasilkan relatif kecil yaitu 0,6454 kW karena pada alat ini hanya terjadi proses penurunan tekanan sehingga tidak banyak energi yang hilang selama beroperasi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis data yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa temperatur kondensor dan evaporator sangat mempengaruhi performansi sistem. Ketika temperatur kondensor mengalami kenaikan, maka terjadi perbedaan temperatur dengan lingkungan yang semakin tinggi yang menyebabkan COP, efisiensi eksergi dan *total cost rate* menurun. Sedangkan, ketika temperatur evaporator naik terjadi penurunan rasio tekanan kompresor pada sistem sehingga COP dan efisiensi eksergi terus mengalami peningkatan sementara *total cost rate* mengalami penurunan namun meningkat kembali pada temperatur $-0,5^{\circ}\text{C}$.
- b. Proses optimisasi multiobjektif dengan metode algoritma genetika dapat digunakan untuk menentukan parameter operasi paling optimum dari aspek energi dan ekonomi pada sistem refrigerasi. Berdasarkan optimisasi ini didapatkan parameter operasi optimum berada pada temperatur kerja kondensor $53,65^{\circ}\text{C}$ dan temperatur evaporator $-3,92^{\circ}\text{C}$ dengan hasil nilai efisiensi eksergi yaitu 69,1% dan *total cost rate* 108.832 USD/year. Pada parameter operasi tersebut diketahui *exergy destruction* tertinggi diperoleh oleh kondensor dan evaporator yang merupakan alat penukar panas, diikuti oleh kompresor, serta katup ekspansi sebagai komponen dengan *exergy destruction* paling rendah.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan sebagai berikut:

- a. Untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan metode optimisasi yang lain sehingga dapat dibuat perbandingan.
- b. Untuk perusahaan, agar dapat mengoperasikan sistem refrigerasi dengan parameter operasi seperti hasil yang didapatkan pada penelitian ini, karena

sebagaimana diketahui bahwa pada saat ini sistem refrigerasi di *data center* PT.X belum mengoperasikan sistem dengan nilai parameter seperti hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. H. Prasad, K. P. Reddy und D. Reddy, „Exergy Analysis of Vapour Compression Refrigeration System,“ *International Journal of Applied Engineering Research*, Bd. 4, pp. 2505-2526, 2009.
- [2] A. Faqih, „[SKRIPSI] Optimisasi Termoekonomi dan Analisis Exergy dari Sistem Refrigerasi Cascade Menggunakan Campuran Refrigeran Karbon Dioksida dan Hidrokarbon pada Sirkuit Temperatur Rendah,“ Fakultas Teknik, Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok, 2012.
- [3] M. B. Adhitya, [SKRIPSI] Optimisasi Proses Produksi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Jenis Single-Flash dengan Metode Genetic Algorithm, Surabaya: Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [4] M. U. Arshad, U. Ghani, A. Ullah und A. Gungor, „Thermodynamic analysis and optimization of double effect absorption refrigeration system using genetic algorithm,“ *Energy Conversion and Management*, Bd. 192, pp. 292-307, 2019.
- [5] M. Aminyavari, B. Najafi, A. Shirazi und F. Rinaldi, „Exergetic, economic and environmental (3E) analyses, and multiobjective optimization of a CO₂/NH₃ cascade refrigeration system,“ *Applied Thermal Engineering*, Bd. 65, pp. 42-50, 2014.
- [6] S. Eini, H. Shahhosseini, N. Delgarm, A. Bahadori und M. Lee, „Multi-objective optimization of a cascade refrigeration system: Exergetic, economic, environmental, and inherent safety analysis,“ *Applied Thermal Engineering*, Bd. 107, pp. 804-817, 2016.
- [7] Nasruddin, S. Nasution, N. Aisyah, A. Surachman und A. Wibowo, „Exergy Analysis And Exergoeconomic Optimization Of A Binary Cycle System Using A Multi Objective Genetic Algorithm,“ *International Journal of Technology*, Bd. 2, pp. 275-286, 2018.

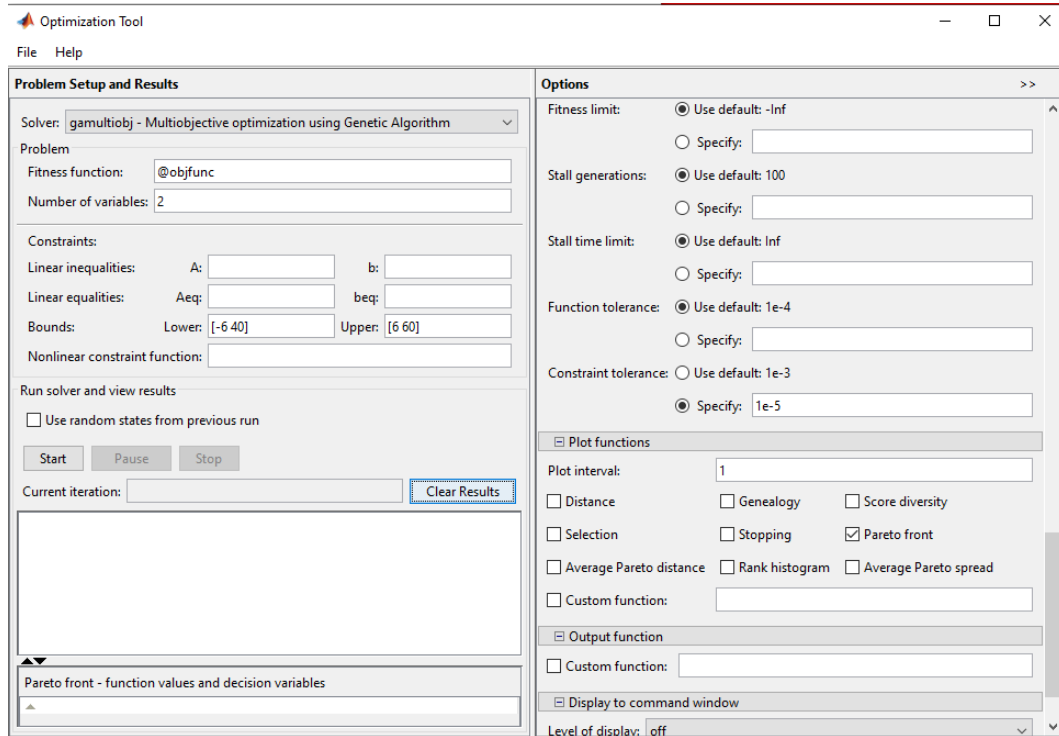
- [8] B. a. Parkinson, „Comparision of four non-derivative optimization methods on twi problem containing heuristic and analythic knowledge,“ *ASME Advances in Design Automation*, 1992.
- [9] A. Jansson, „Fluid Power System Design - A Simulation Approach,“ Dissertation, Department of mechanical engineering, Linkoping University, 1994.
- [10] S. W. Utomo, R. Saedudin und A. Widjajarto, „Analisa Dan Desain Data Center Building Facilities Berdasarkan Humidity Monitoring System Di Rumah Sakit Islam Muhammadiyah Sumberrejo Menggunakan Standar Tia-942 Dengan Metode Ppdioo Life-Cycle Approach,“ *e-Proceeding of Engineering*, Bd. 5, Nr. 2, p. 3055, 2018.
- [11] B. S. Majanasastra, „Analisis Kinerja Mesin Pendingin Kompresi Uap Menggunakan Fe-36 Sebagai Alternatif Pengganti R-22,“ *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Bd. 4, Nr. 1, 2015.
- [12] I. Dincer, M. Rosen und P. Ahmadi, *Optimization of Energy Systems*, Canada: John Wiley & Sons Ltd, 2017.
- [13] M. Jafri, M. Dwinanto, Gusnawati und F. Sogen, „Analisis Energi Dan Exergi Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Multi Evaporator,“ *Lontar Jurnal Teknik Mesin UNDANA*, Bd. 04, Nr. 02, pp. 21-29, 2017.
- [14] R. Roy und M. Bijan, „Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of vapour cascade refrigeration system using different refrigerant combination,“ *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019.
- [15] S. R. Silalahi, *Analisis Eksergi Penggunaan Refrigeran Pada Sistem Refrigerasi Kompresi Uap*, Bogor: Departemen Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, 2006.
- [16] R. Yumrutas, M. Kunduz und M. Kanoglu, „Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems,“ *Exergy, An International Journal*, Bd. 2, Nr. 4, pp. 266-272, 2002.

- [17] Sutanto, *Termodinamika Pencairan Gas Alam*, Depok: Universitas Indonesia Press, 1985.
- [18] R. Roy und B. K. Mandal, „Thermo-economic Assessment and Multi-Objective Optimization of Vapour Compression Refrigeration System using Low GWP Refrigerants,“ in *2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, 2019.
- [19] O. Rezayan und A. Behbahaninia, „Thermoeconomic optimization and exergy analysis of CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems,“ *Energy*, Bd. 36, pp. 888-895, 2011.
- [20] A. Bejan, G. Tsatsaronis und M. Moran, *Thermal Design & Optimization*, Wiley, 1996.
- [21] A. Konak, D. W. Coit und A. E. Smith, „Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial,“ *Reliability Engineering and System Safety*, Bd. 91, pp. 992-1007, 2006.
- [22] A.K.Gholap, „design tool for multiobjective optimization of heat exchanger in domestic refrigerator with a single and dual evaporator,“ p. UMI Number: 3350341, 2019.
- [23] I. Muzakir, „Penerapan Metode Topsis Untuk Sistem Pendukung Keputusan Penentuan Keluarga Miskin Pada Desa Panca Karsa Ii,“ *ILKOM Jurnal Ilmiah*, Bd. 9, pp. 247-281, 2017.
- [24] B. Orr, 16 Maret 2018. [Online]. Available: hvacschool.com/compression-ratio-matters/.
- [25] Z. Yue, „A method for group decision-making based on determining weights of decision makers using TOPSIS,“ *Applied Mathematical Modelling*, Bd. 35, Nr. 4, pp. 1926-1936, 2011.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Optimtool pada Matlab 2019a



Matlab Function untuk Fungsi Multiobjektif untuk Optimisasi Termoekonomi

```
function f = objfunc (x)
```

```
%SATUAN
```

```
%Temp = K
```

```
%Q = kW
```

```
X0(1)=x(1); %-6 s.d 6 C
```

```
X0(2)=x(2); %40 s.d 60 C
```

```
%decision variable
```

```
Tevap = X0(1) + 273.15; % Kelvin
```

```
Tcond = X0(2) + 273.15; % Kelvin
```

```
%constraint
```

```
Qevap = 76.88; % kW cooling capacity
```

```

%state 1
TE = [-6+273.15 -5.5+273.15 -5+273.15 -4.5+273.15 -
4+273.15 -3.5+273.15 -3+273.15 -2.5+273.15 -2+273.15 -
1.5+273.15 -1+273.15 -0.5+273.15 0+273.15 0.5+273.15
1+273.15 1.5+273.15 2+273.15 2.5+273.15 3+273.15
3.5+273.15 4+273.15 4.5+273.15 5+273.15 5.5+273.15
6+273.15];

H1 = [405.75 406.000 406.250 406.500 406.750 406.995
407.240 407.480 407.720 407.965 408.210 408.450 408.690
408.925 409.160 409.395 409.630 409.865 410.100 410.335
410.570 410.800 411.030 411.255 411.480];

S1 = [1.7816 1.7809 1.7802 1.7796 1.7789 1.7783 1.7777
1.7771 1.7764 1.7758 1.7751 1.7745 1.7739 1.7733 1.7726
1.7720 1.7714 1.7708 1.7702 1.7696 1.7690 1.7684 1.7678
1.7673 1.7667];

T1 = Tevap;
h1 = spline (TE, H1, T1); %interpolasi matrix
s1 = spline (TE, S1, T1); %interpolasi matrix

%state 2
PKOMP = [17.45 17.88 18.31 18.76 19.21 19.67 20.14
20.62 21.11 21.60 22.10 22.62 23.14 23.67 24.21 24.75
25.31 25.88 26.45 27.04 27.63];

TKOMP = [40+273.15 41+273.15 42+273.15 43+273.15
44+273.15 45+273.15 46+273.15 47+273.15 48+273.15
49+273.15 50+273.15 51+273.15 52+273.15 53+273.15
54+273.15 55+273.15 56+273.15 57+273.15 58+273.15
59+273.15 60+273.15];

T2 = Tcond;

H2 = [453.00 453.76 454.67 454.07 455.62 455.79 457.49
458.11 458.84 459.64 460.41 461.15 461.85 462.48 463.14
463.90 464.63 465.01 466.05 466.73 467.41];

S2 = [1.8096 1.8077 1.8098 1.8082 1.8099 1.8081 1.8116
1.8116 1.8119 1.8124 1.8129 1.8132 1.8111 1.8127 1.8137
1.8121 1.8146 1.8129 1.8113 1.8155 1.8139];

h2 = spline (TKOMP, H2, T2); %interpolasi matrix
s2 = spline (TKOMP, S2, T2); %interpolasi matrix

```

```

%state 3
TK = [40+273.15 41+273.15 42+273.15 43+273.15 44+273.15
45+273.15 46+273.15 47+273.15 48+273.15 49+273.15
50+273.15 51+273.15 52+273.15 53+273.15 54+273.15
55+273.15 56+273.15 57+273.15 58+273.15 59+273.15
60+273.15];

H3 = [259.98 261.59 263.22 264.86 266.5 268.16 269.83
271.52 273.21 274.92 276.64 278.38 280.13 281.9 283.68
285.48 287.3 289.13 290.99 292.86 294.76];

S3 = [1.2016 1.2067 1.2118 1.2169 1.2221 1.2272 1.2323
1.2375 1.2427 1.2478 1.2530 1.2582 1.2635 1.2687 1.2740
1.2792 1.2845 1.2898 1.2951 1.3005 1.3058];

T3 = Tcond;

h3 = spline (TK, H3, T3); %interpolasi matrix
s3 = spline (TK, S3, T3); %interpolasi matrix

%state 4
TEV = [-6+273.15 -5.5+273.15 -5+273.15 -4.5+273.15 -
4+273.15 -3.5+273.15 -3+273.15 -2.5+273.15 -2+273.15 -
1.5+273.15 -1+273.15 -0.5+273.15 0+273.15 0.5+273.15
1+273.15 1.5+273.15 2+273.15 2.5+273.15 3+273.15
3.5+273.15 4+273.15 4.5+273.15 5+273.15 5.5+273.15
6+273.15];

T4 = Tevap;

h4 = h3;

S4 = [1.3605 1.3597 1.3589 1.3581 1.3572 1.3565 1.3558
1.3550 1.3542 1.3534 1.3527 1.3520 1.3514 1.3506 1.3497
1.3490 1.3484 1.3477 1.3470 1.3463 1.3456 1.3449 1.3442
1.3436 1.3430];

s4 = spline (TEV, S4, T4); %interpolasi matrix

%dead state condition
T0 = 20+273.15; %kelvin
P0 = 1036; %Kpa
h0 = 417.38;
s0 = 1.7511;

T01 = 32+273.15; %kelvin
P01 = 1428; %Kpa

```

```

h01 = 421.55; %
s01 = 1.7383;

m = Qevap/(h1-h4);

%energy analysis
Qcond = m*(h2-h3);
Wcomp = m*(h2-h1);
Wfancond = 2.2; %kW
Wfanevap = 2.4; %kW
W= Wcomp+Wfancond+Wfanevap; % Daya total

%COP
COP = (h1-h4)/(h2-h1);

%exergy destruction
EXDevp = (T0*((m*(s1-s4))-(Qevap/T1)));
EXDcond = (T0*((m*(s3-s2))+(Qcond/T3)));
EXDcomp = m*T0*(s2-s1);
EXDexp = m*T0*(s4-s3);

%Total Exergy Destruction

EXDtotal = EXDevp + EXDcond + EXDcond + EXDexp;

%Efisiensi Exergy
Eff_exergy = (1-(EXDtotal/W))*100;

%-----[Optimisasi Termoekonomi]-----%

%Asumsi Ekonomi
H = 8760; % total annual working hour in a year
Cel = 0.099; % electricity cost ($/kWh)
n = 4; % lifetime of operation (years) since 2016
int = 0.05; % interest rate
M = 1.06; % maintenance factor
%Capital Recovery Factor
CRF = (int*((1+int)^n))/(((1+int)^n)-1);
Uoe = 0.03 ; %Evaporator, kW/m2.K
Uoc = 0.04 ; %kondensor , kW/m2.K

%Heat transfer area
Aoc = Qcond/ (Uoc*(abs(Tcond-T01)));% condenser
Aoe = Qevap/ (Uoe*(abs(Tevap-T0)));% evaporator

%investment and maintenance Cost
Ccomp = 10167.5*(Wcomp)^0.46);

```



```
Ccond = (1397*(Aoc^0.89)) + (629.05*((Wfancond)^0.76));
Cevap = (1396*(Aoe^0.89)) + (629.05*((Wfanevap)^0.76));
Cexp = 114.5*m;

Ckcomp = (Ccomp*CRF*M);
Ckcond = (Ccond*CRF*M);
Ckevap = (Cevap*CRF*M);
Ckexp = (Cexp*CRF*M);

Ccost = (Ckcomp + Ckcond + Ckevap + Ckexp);

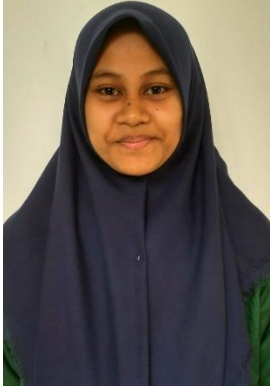
%Operational Cost
Wtotal = Wcomp + Wfanevap + Wfancond;
Cop = H*Cel*Wtotal; %satuan: $ atau rupiah/year

Ctotal = Ccost + Cop;

f(1) = -Eff_exergy; % fungsi objektif 1
f(2) = Ctotal; % fungsi objektif 2
end
```

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Ambon, 11 Maret 1999. Penulis menempuh pendidikan di SD Negeri 6 Ambon (2004-2010), SMP Negeri 2 Ambon (2010-2013), SMA Negeri 13 Ambon (2013-2016) dan pendidikan S-1 di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama menjadi mahasiswa, penulis mengambil bidang minat Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan dan menjadi asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan. Penulis juga pernah menjadi Staff Departemen Riset dan Teknologi, Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika ITS periode 2017-2018. Pada September 2019, penulis melakukan kerja praktek di PT. Indonesia Power Semarang *Power Generation Unit* (PGU), bidang instrumentasi dan kontrol. Pada kerja praktek tersebut, penulis melakukan analisis pengendalian *level lowe pressure drum* pada *heat recovery steam generator* PLTGU Blok 2 dengan metode Ziegler Nichols. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail maharani.sarah11@gmail.com.