

Analisis Eksergi dan Optimisasi Termoekonomi Pada Sistem Refrigerasi di *Data Center* Menggunakan Metode Algoritma Genetika

Maharani Sarah Holle dan Roekmono

Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: roekmono @ep.its.ac.id

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. 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.

I. PENDAHULUAN

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 ireversibilitas 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

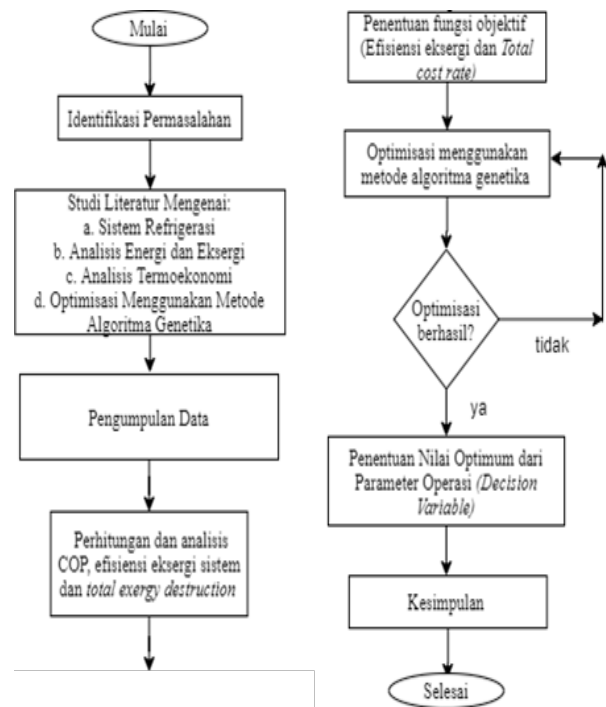
Tabel 1.
Hasil Pengumpulan Data

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
Interest rate	5	%
Maintenance factor	1,06	-
Analisis Cooling Load	Nilai	Satuan
Total daya lampu	0,8	kW
Total daya server	76,936	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

dilakukan terhadap sistem refrigerasi jenis *double effect absorption* [4]. Adapun yang melakukan optimisasi mutliobjektif 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 mutliobjektif 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



Gambar 1. Diagram alir pelaksanaan penelitian

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*.

II. METODOLOGI

Diagram alir dari metodologi pelaksanaan penelitian ditunjukkan oleh Gambar 1.

A. 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.

Data-data yang dikumpulkan didapatkan langsung ketika melakukan survei ke *data center* PT. X dengan rincian data yang perlukan untuk penelitian seperti pada Tabel 1.

B. Analisis Termodinamika

Pada bagian ini yang akan dihitung dan dianalisis meliputi COP, *total exergy destruction* dan efisiensi eksergi sistem terhadap temperatur evaporator dan kondensor. 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. Sehingga Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menyelesaikan analisis ini ialah:

$$COP = \frac{Q_e}{W_{net}} = \frac{T_e}{T_c - T_e} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

Persamaan-persamaan yang mewakili energi dan kerugian eksergi di tiap komponen sistem refrigerasi adalah sebagai berikut [11], [12]:

- Evaporator

$$Q_{evap} = \dot{m} (h_1 - h_4) \quad (2)$$

$$E_{xd, evap} = \dot{m} T_0 \left(s_1 - s_4 - \frac{q_{evap}}{T_{evap}} \right) \quad (3)$$

- Kondensator

$$Q_{cond} = \dot{m}_{cond} (h_3 - h_2) \quad (4)$$

$$E_{xd, cond} = \dot{m} T_0 \left(s_3 - s_2 + \frac{q_{cond}}{T_{cond}} \right) \quad (5)$$

- Kompresor

$$W_{comp} = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (6)$$

$$E_{xd, comp} = \dot{m} T_0 (s_2 - s_1) \quad (7)$$

- Katup Ekspansi

$$h_3 = h_4 \quad (8)$$

$$E_{xd, exp} = \dot{m} T_0 (s_3 - s_4) \quad (9)$$

- Total exergy destruction

$$E_{xdest, total} = E_{xd, comp} + E_{xd, cond} + E_{xd, evap} + E_{xd, exp} \quad (10)$$

- Efisiensi eksergi

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{E_{xdest, total}}{W} \quad (11)$$

C. Analisis Ekonomi

Faktor ekonomi 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. 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.

1) Investment and Maintenance Cost

Purchased cost of equipment (PCE) ditetapkan berdasarkan karakteristik termodinamika setiap komponen yang dirumuskan sebagai berikut [5], [13]:

PCE kompresor sebagai fungsi dari kerja (dalam kW):

$$C_{comp} = 10167.5 W_{comp}^{0.46} \quad (12)$$

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

$$C_{Cond} = 1397 A_{o,C}^{0.89} + 629.05 W_{Fan, Cond}^{0.76} \quad (13)$$

Untuk evaporator:

$$C_{Evap} = 1397 A_{o,E}^{0.89} + 629.05 W_{Fan, Evap}^{0.76} \quad (14)$$

Serta untuk katup ekspansi dapat ditulis sebagai berikut:

$$C_{expv} = 114.5 \dot{m} \quad (15)$$

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], [14]:

$$A_o = \frac{Q}{U_o \Delta T} \quad (16)$$

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

$$C_k = C_k^0 \times CRF \times \Phi \quad (17)$$

Dimana Φ adalah *maintenance factor* diasumsikan 1.06 [13]. Pada *engineering economics*, variabel CRF merupakan *Capital Recovery Factor* yang seolah-olah memiliki arti sebagai faktor pengembalian modal dari biaya pembelian komponen per tahun [15]:

$$CRF = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (18)$$

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:

$$\sum_k C_k = C_{compresor} + C_{evaporator} + C_{kondensator} + C_{expv} \quad (19)$$

2) Operational Cost

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

$$C_{op} = C_{electricity} \times \sum W_{component} \times H \quad (20)$$

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:

$$C_{TOT} = \sum C_k + \sum C_{op} \quad (21)$$

D. 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 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 2.
Decision Variabel

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

Tabel 3.
Beban Pendinginan Data Center

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

Tabel 4.
Hasil optimisasi multiobjektif termoekonomi.

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

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.

E. 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. 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.

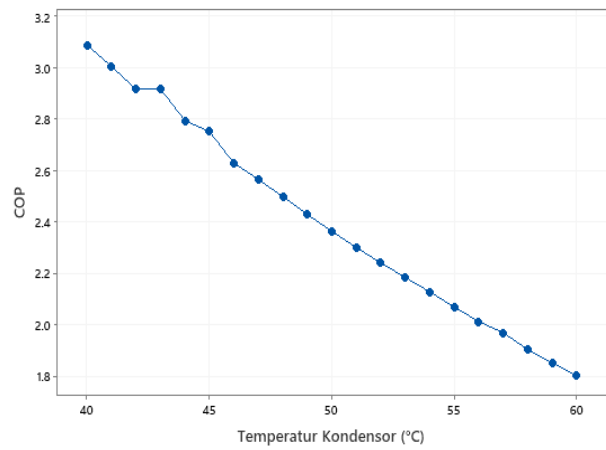
1) Beban Pendinginan akibat Lampu

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:

$$Q_{\text{lampu}} = 1,2 \times \text{total lights watt} \times \text{CLF} \tag{22}$$

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

2) Beban Pendinginan akibat Perangkat Listrik



Gambar 2. Pengaruh temperatur kondensor terhadap nilai COP

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

$$Q_{\text{server}} = \text{total jumlah server} \times \text{total daya} \tag{23}$$

F. Penentuan Nilai Optimum

Penentuan nilai optimum dari hasil optimisasi multiobjektif akan dilakukan menggunakan metode TOPSIS.

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 [16]. Langkah-langkah penyelesaian seperti berikut [13]:

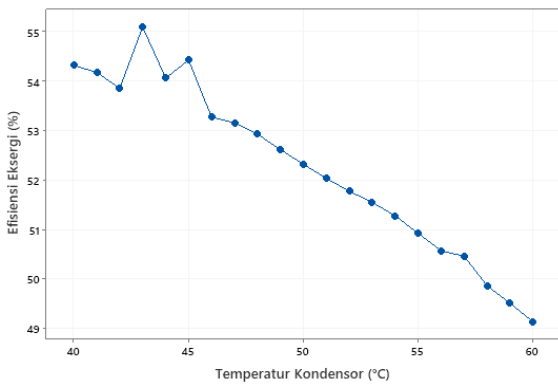
Langkah ke-1: Membuat matriks keputusan mengacu pada sejumlah *m* alternatif yang akan dievaluasi berdasarkan *n* kriteria:

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

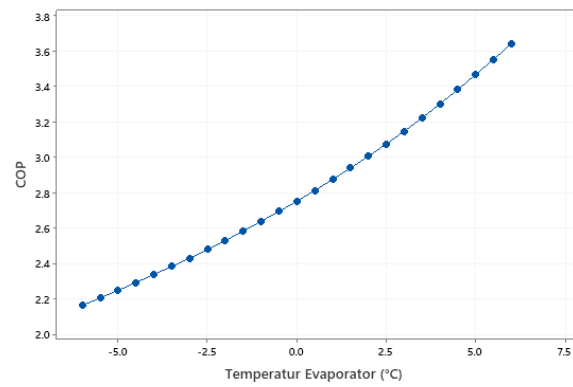
Langkah ke-2: Membuat matrik keputusan yang ternormalisasi:

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \tag{24}$$

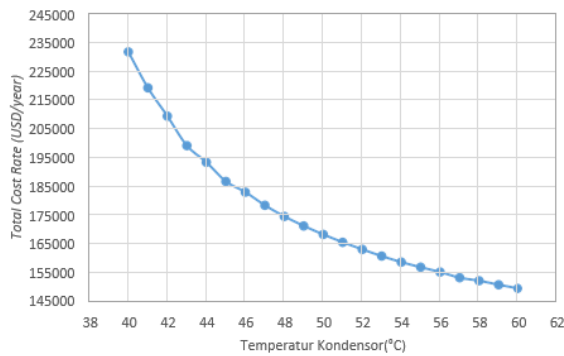
Langkah ke-3: Membuat matriks keputusan yang ternormalisasi terbobot atau mengalikan dengan faktor massa.



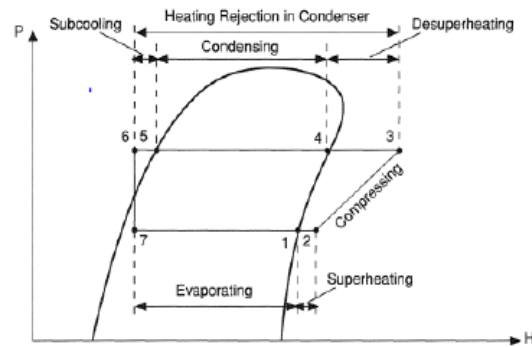
Gambar 3. Pengaruh temperatur kondensor terhadap nilai efisiensi eksergi.



Gambar 5. Pengaruh temperatur evaporator terhadap nilai COP.



Gambar 4. Pengaruh temperatur kondensor terhadap biaya total.



Gambar 6. Diagram p-h sistem refrigerasi [17]

$$V_{ij} = w_i \times a_{ij} \tag{25}$$

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

$$A_j^+ = \{ \text{Max } V_{ij} \mid j \in K \}, \{ \text{Min } V_{ij} \mid j \in K^I \} \tag{26}$$

$$A_j^- = \{ \text{Min } V_{ij} \mid j \in K \}, \{ \text{Max } V_{ij} \mid j \in K^I \} \tag{27}$$

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.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - A_j^+)^2} \tag{28}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - A_j^-)^2} \tag{29}$$

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

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \tag{30}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. 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

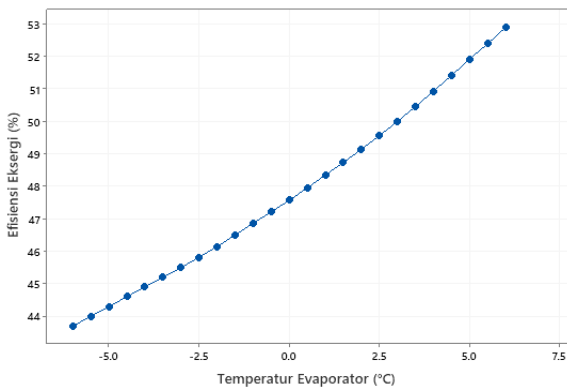
panas menyebabkan terjadinya ireversibilitas atau ketidakmampu balikan sistem sehingga sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem (COP). COP merupakan perbandingan tingkat keluaran panas dengan masukan energi atau disebut juga sebagai jumlah beban pendingin yang dapat diproduksi per satuan kerja, serta *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.

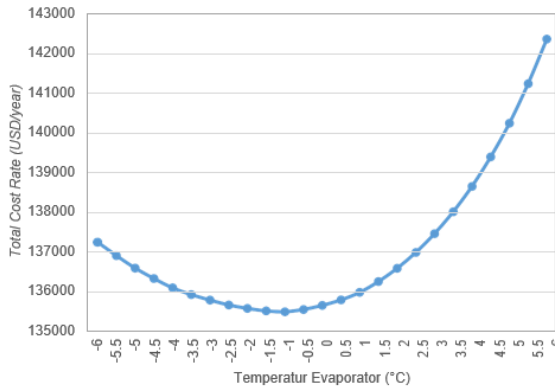
1) Pengaruh Temperatur Kondensor

Pada Gambar 2 dan 3 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.

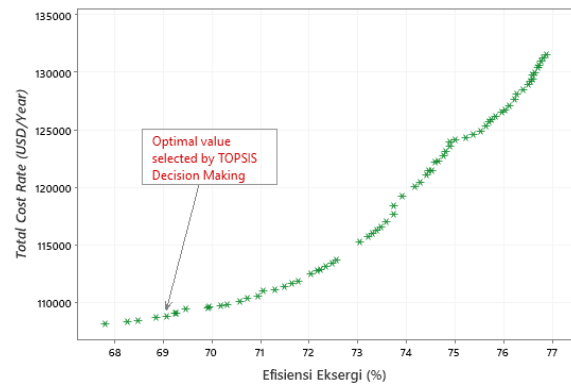
Dalam sistem refrigerasi, temperatur kondensor harus lebih tinggi dibandingkan temperatur lingkungan agar dapat membuang kalor ke lingkungan. Oleh karena itu daya listrik yang dibutuhkan oleh kompresor untuk melakukan proses



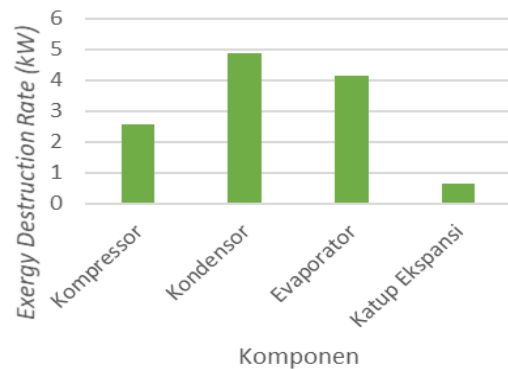
Gambar 7. Pengaruh temperatur evaporator terhadap efisiensi eksergi.



Gambar 8. Pengaruh temperatur evaporator terhadap biaya total.



Gambar 9. Pareto front dari optimisasi multiobjektif pada sistem refrigerasi.



Gambar 10. Eksergi destruction pada parameter operasi optimum.

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 kondensor.

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 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.

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.

2) Pengaruh Temperatur Evaporator

Pada Gambar 6 dan 7 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.

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.

Pada titik 2 (Gambar 6), ketika temperatur evaporator rendah maka rasio tekanan kompresor meningkat karena semakin sedikit uap yang terkandung saat kembali menuju kompresor, sehingga kompresor akan dipaksa bekerja lebih untuk menghasilkan tekanan yang lebih tinggi agar refrigeran sepenuhnya berfase uap jenuh setelah melewati kompresor.

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 5 dan 7.

Total cost rate seperti ditunjukkan Gambar 8 mengalami penurunan namun pada titik temperatur evaporator 1°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 [12].

B. Analisis Optimisasi Multiobjektif

Sistem refrigerasi pada PT. X memiliki spesifikasi kapasitas pendinginan sebesar 76.88 kW dan temperatur sekitar ruangan 20°C. Keduanya ditetapkan sebagai batasan-batasan (*constraints*) yang ada pada optimisasi ini.

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.

Tabel 5.

Hasil performansi sistem refrigerasi pada nilai optimum.

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

Tabel 6.

Perbandingan Operational Cost Rate Eksisting dan Optimisasi

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

Diketahui bahwa beban pendinginan (*cooling load*) yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada Tabel 3 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 1). 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.

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.

Penulis menggunakan *TOPSIS decision making* untuk membantu menentukan solusi paling optimum diantara solusi optimum lainnya. Metode ini telah terbukti menjadi salah satu *tools* yang kuat dalam prosedur pengambilan keputusan setelah sistem dioptimisasi [5]

Seperti pada Gambar 9, titik nilai optimum ditunjukkan berada pada nilai efisiensi eksergi sebesar 69,1% dan biaya total tahunan yang dikeluarkan ialah 108832 USD/year. Pada Tabel 4 ditampilkan nilai parameter operasi yang dibutuhkan untuk mencapai performansi sistem paling optimum berdasarkan metode optimisasi multiobjektif. Hasil performansi sistem lainnya dapat dilihat pada Tabel 5.

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 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 6 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.

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 exergi (*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 10.

Seperti pada Gambar 10, 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.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

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 1°C.

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°C dan temperatur evaporator -3,92°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.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. H. Prasad, K. P. Reddy, and D. R. R. Reddy, "Exergy analysis of vapour compression refrigeration system," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 4, no. 12, pp. 2505–2526, 2009.
- [2] A. Faqih, "Optimisasi Termoekonomi dan Analisis Exergy dari Sistem Refrigerasi Cascade Menggunakan Campuran Refrigeran Karbon Dioksida dan Hidrokarbon pada Sirkuit Temperatur Rendah," Universitas Indonesia, 2012.
- [3] M. B. Adhitya, "Optimasi Proses Produksi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Jenis Single-Flash Dengan Metode Genetic Algorithm," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [4] M. U. Arshad, M. U. Ghani, A. Ullah, A. Güngör, and M. Zaman, "Thermodynamic analysis and optimization of double effect absorption refrigeration system using genetic algorithm," *Energy Convers. Manag.*, vol. 192, pp. 292–307, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.03.083.
- [5] M. Aminyavari, B. Najafi, A. Shirazi, and F. Rinaldi, "Exergetic, economic and environmental (3E) analyses, and multi-objective optimization of a CO₂/NH₃ cascade refrigeration system," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 65, no. 1–2, pp. 42–50, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.075.
- [6] S. Eini, H. Shahhosseini, N. Delgarm, M. Lee, and A. Bahadori, "Multi-objective optimization of a cascade refrigeration system: Exergetic, economic, environmental, and inherent safety analysis," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 107, pp. 804–817, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.013.
- [7] N. Nasruddin, S. Nasution, N. Aisyah, A. Surachman, and A. S. Wibowo, "Exergy analysis and exergoeconomic optimization of a binary cycle system using a multi objective genetic algorithm," *Int. J. Technol.*, vol. 9, no. 2, p. 286, Apr. 2018, doi: 10.14716/ijtech.v9i2.1040.
- [8] L. Borup and A. Parkinson, "Comparison of four non-derivative optimization methods on two problems containing heuristics and analytic knowledge," in *Proceedings of the 18th Annual ASME Design Automation Conference*, 1992, pp. 137–143.
- [9] A. Jansson, "Fluid Power System Design A Simulation Approach," Linköping University, Linköping, Swedia, 1994.
- [10] S. W. Utomo, R. R. Saedudin, and 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 PPDI00 life-cycle approach," *e-Proceeding Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 3067–3075, 2018.
- [11] I. Dinçer, M. Rosen, and P. Ahmadi, *Optimization of Energy Systems*. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd., 2017.
- [12] R. Roy and B. K. Mandal, "Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of vapour cascade refrigeration system using different refrigerant combinations: A comparative study," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 139, no. 5, pp. 3247–3261, 2020, doi: 10.1007/s10973-019-08710-x.
- [13] R. Roy and B. K. Mandal, "Thermo-economic assessment and multi-objective optimization of vapour compression refrigeration system using Low GWP refrigerants," 2019, doi: 10.1109/ICMSAO.2019.8880390.
- [14] O. Rezayan and A. Behbahaninia, "Thermoeconomic optimization and exergy analysis of CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems," *Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 888–895, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2010.12.022.
- [15] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. J. Moran, *Thermal Design and Optimization*. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [16] I. Muzakkir, "Penerapan metode topsis untuk sistem pendukung keputusan penentuan keluarga miskin pada Desa Panca Karsa II," *Ilk. J. Ilm.*, vol. 9, no. 3, pp. 274–281, 2017, doi: 10.33096/ilkom.v9i3.156.274-281.