

## Pemodelan dan Optimasi Multiobjektif Refrigerator Kompresi Uap Menggunakan Metode Meminimalkan Pembangkitan Entropi

Thomas P. Angelo, Matheus M. Dwinanto\*

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana  
Jl. Adi Sucipto, Penfui, Kupang, Nusa Tenggara Timur, 85001 Indonesia

\*E-mail: matheus.dwinanto@staf.undana.ac.id

### Abstract

*The vapor compression refrigerators have many applications for cooling and freezing. The advantage of this system has good performance, and can meet the needs of a relatively large cooling capacity with a small system size. But behind its advantages, the energy consumption of this system is high so that energy saving is the main goal of optimization and this will continue to be done in a sustainable manner in the future. In this article, thermodynamic design optimization is presented to minimization entropy generation, minimization total power input, maximization the efficiency of the second law, and maximization the performance coefficient, simultaneously. A multi-objective genetic algorithm is used during the optimization process, and based on the Pareto frontier a decision-making strategy is obtained and then used to determine the final solution. The optimization results show that the method of minimization entropy generation can experience a paradox, where minimizing the entropy generation number of the system will not automatically result in the maximum efficiency of the second law but there is an optimal point which indicates that the generation of entropy is minimum. From the results of thermodynamic design optimization of the refrigerator, the total input power is 0.281 kW, the second law efficiency is 0.311 and coefficient of performance is 2.95.*

**Keywords:** optimization, refrigerator, entropy generation, genetic algorithm

### Abstrak

Refrigerator kompresi uap telah banyak diaplikasikan untuk pendinginan dan pembekuan. Sistem ini, memiliki kinerja yang baik, dan dapat memenuhi kebutuhan kapasitas pendinginan yang relatif besar dengan ukuran sistem yang kecil. Tetapi dibalik keunggulannya, konsumsi energi sistem ini tinggi sehingga penghematan energi menjadi tujuan utama optimasi dan hal ini akan terus dilakukan secara berkelanjutan pada masa yang akan datang. Dalam artikel ini, optimasi desain termodinamika disajikan untuk meminimalkan pembangkitan entropi, meminimalkan total masukan daya, memaksimalkan efisiensi hukum kedua, dan memaksimalkan koefisien kinerja secara simultan. Algoritma genetika multiobjektif digunakan selama proses optimasi, dan berdasarkan Pareto *frontier* yang diperoleh sebuah strategi pengambilan keputusan kemudian digunakan untuk menentukan solusi akhir. Hasil optimasi menunjukkan bahwa metode meminimalkan pembangkitan entropi dapat mengalami paradoks, di mana meminimalkan angka pembangkitan entropi sistem tidak akan dengan serta merta menghasilkan efisiensi hukum kedua yang maksimal tetapi ada sebuah titik optimal yang menandakan pembangkitan entropi adalah minimum. Dari hasil optimasi desain termodinamika refrigerator ini diperoleh total daya masukan adalah 0,281 kW, efisiensi hukum kedua adalah 0,311 dan koefisien kinerja adalah 2,95.

**Kata kunci:** optimasi, refrigerator, pembangkitan entropi, algoritma genetika

### 1. Pendahuluan

Refrigerasi merupakan proses penyerapan kalor dari suatu media atau ruangan sehingga temperatur dari media atau ruangan tersebut menjadi lebih rendah dari temperatur lingkungannya. Refrigerasi dapat dicapai dengan metode bersiklus, dan yang paling banyak digunakan adalah siklus kompresi uap. Refrigerator kompresi uap memiliki keunggulan, yaitu mudah dioperasikan, kinerja yang baik, dan dapat memenuhi kebutuhan kapasitas pendinginan yang relatif besar dengan ukuran sistem yang kecil. Tetapi dibalik keunggulannya, konsumsi energi sistem ini tinggi dan diperkirakan sistem refrigerasi dan pengkondisian udara kompresi uap mengkonsumsi  $\pm 17\%$  dari total konsumsi energi dunia [1]. Dalam refrigerator kompresi uap, masukan daya terbesar dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor, dan masukan daya yang kecil untuk menggerakkan kipas kondensor dan kipas evaporator. Masukan daya yang dibutuhkan kompresor, digunakan untuk mensirkulasikan sejumlah tertentu massa refrigeran sehingga proses penyerapan kalor di evaporator dan pembuangan kalor di kondensor dapat terjadi di dalam sistem. Kipas kondensor digunakan untuk mengalirkan sejumlah tertentu massa udara pendingin sehingga proses pembuangan kalor dapat terjadi di kondensor,

sedangkan di evaporator, kipas digunakan untuk mengalirkan sejumlah tertentu massa udara yang didinginkan sehingga terjadilah proses penyerapan kalor. Dengan demikian, tidak dapat dipungkiri bahwa perpindahan kalor dan perpindahan massa selalu berhubungan langsung dengan penghematan daya, dan kedua variabel ini akan menentukan kinerja sistem refrigerasi. Oleh karena itu, optimasi keseluruhan sistem terus menjadi isu sentral dalam penghematan daya sistem refrigerasi [2].

Penghematan daya adalah tujuan utama dari optimasi sistem refrigerasi dan akan terus dilakukan secara berkelanjutan pada masa yang akan datang. Hal ini sejalan dengan program Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tentang pelabelan efisiensi energi (*energy efficiency labeling*) di Indonesia untuk produk refrigerator dan pengkondisian udara yang ditetapkan melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 7 Tahun 2015 tentang Penerapan Standar Kinerja Energi Minimum (SKEM) dan pencantuman Label Tanda Hemat Energi untuk refrigerator dan pengkondisian udara. Metode meminimalkan pembangkitan entropi (*Entropy Generation Minimization = EGM*) merupakan metode optimasi desain hukum kedua termodinamika yang dapat diterapkan pada sistem refrigerasi. Metode ini digunakan untuk memodelkan, mengembangkan pembangkitan entropi sebagai fungsi model parameter fisik, dan meminimalkan laju pembangkitan entropi sistem.

Saat ini, metode EGM telah diakui sebagai metode pemodelan dan optimasi sistem atau komponen yang mengalami ketidaksempurnaan termodinamika akibat perpindahan kalor dan gesekan fluida [3-6]. Penerapan metode meminimalkan pembangkitan entropi (EGM) untuk analisis dan optimasi sistem-sistem termodinamika telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya Cheng dan Liang (2013) melaporkan hasil analisis terhadap beberapa sistem termodinamika dengan konsep pembangkitan entropi, angka pembangkitan entropi, dan angka pembangkitan entropi yang direvisi, serta angka *exergy destruction* dan efisiensi konversi kerja-*exergy* telah diusulkan dalam makalah ini. Penerapan EGM bersyarat jika tujuan optimasi adalah daya keluaran (sistem pembangkit daya). EGM mengarah pada keluaran daya maksimum ketika laju aliran *exergy* bersih ke dalam sistem adalah tetap, tetapi mungkin tidak tepat jika laju aliran *exergy* bersih ke dalam sistem tidak tetap. Di sisi lain, angka *exergy destruction* yang lebih kecil selalu sesuai dengan efisiensi kerja-*exergy* yang lebih besar. Sistem refrigerasi dengan mesin Carnot terbalik juga dianalisa kerja mekanik adalah masukan (sistem yang mengonsumsi daya). Hasilnya menunjukkan bahwa EGM mengarah ke COP terbesar jika temperatur dari sumber kalor bertemperatur tinggi adalah tetap [7].

Dwinanto, dkk., (2017) melakukan analisis *exergy* sistem refrigerasi evaporator ganda berdasarkan koefisien kinerja *exergetic*. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa pengaruh kuat temperatur kondensasi terhadap kinerja sistem. Dengan meningkatnya temperatur kondensasi maka koefisien kinerja dan efisiensi hukum kedua akan menurun, sebaliknya dengan meningkatnya temperatur evaporasi maka koefisien kinerja dan efisiensi hukum kedua juga meningkat [8]. Dwinanto, dkk., (2018; 2019) juga telah melakukan optimasi multiobjektif dengan menggunakan metode EGM di kondensator dan evaporator dalam sistem refrigerasi untuk mendapatkan dimensi geometri yang optimal dari penukar-penukar kalor tersebut. Hasil optimasi multiobjektif dengan teknik optimasi algoritma genetika multiobjektif telah memberikan kumpulan nilai solusi akhir optimal, dan berdasarkan analisis sensitivitas maka pengambil keputusan (atau desainer) dapat secara bebas memilih luas perpindahan kalor dan volume penukar kalor yang diinginkan dengan sepenuhnya mempertimbangkan persyaratan dan kendala desain [9, 10, 11].

Makalah ini bertujuan untuk melakukan pemodelan dan optimasi multiobjektif sistem refrigerasi kompresi uap menggunakan metode meminimalkan pembangkitan entropi dengan kendala kapasitas pendinginan dan daya kompresor, sehingga diperoleh solusi kinerja sistem yang optimal.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan pemodelan matematis, dan optimasi refrigerator yang bertujuan untuk meminimalkan pembangkitan entropi, memaksimalkan efisiensi hukum kedua termodinamika, meminimalkan total daya, dan memaksimalkan koefisien kinerja sistem. Teknik optimasi multiobjektif sistem refrigerasi menggunakan *soft computing* algoritma genetika multiobjektif dengan bantuan *Toolbox* berbasis GUI (*Graphic User Interface*) di dalam program MATLAB R2014a.

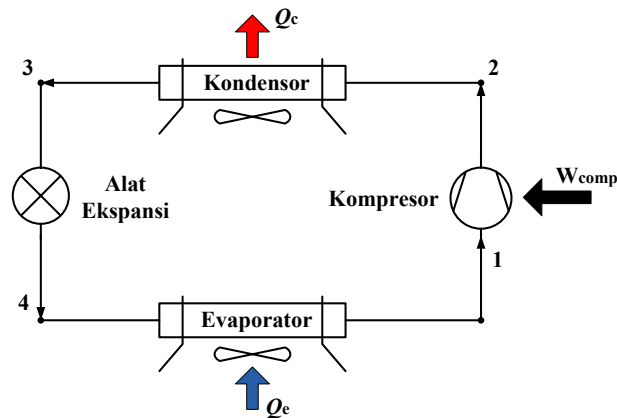
Refrigerator kompresi uap aktual sebagai volume atur yang mengalami proses aliran stedi ditunjukkan pada Gambar 1. Keseimbangan energi dan entropi dapat disederhanakan dengan membuat asumsi lebih lanjut untuk setiap komponen. Katup ekspansi dan jaringan pipa penghubung diasumsikan tidak ada kerja yang diberikan, dan proses *throttling* di katup ekspansi diasumsikan bersifat adiabatik. Kompresor melakukan proses kompresi aktual. Perubahan energi kinetik dan potensial dari semua komponen diabaikan.

Volume atur evaporator yang dipilih untuk pemodelan meliputi keseluruhan evaporator kecuali kompartemen udara dingin. Dalam proses ini, kalor dipindahkan dari udara dingin ke refrigeran. Laju perpindahan kalor ( $Q_e$ ), aliran massa refrigeran ( $\dot{m}_r$ ), dan laju pembangkitan entropi ( $S_{gen,e}$ ) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$Q_e = W_{fe} + \dot{m}_a c_{p,a} (T_{ae,i} - T_{ae,o}) \quad (1)$$

$$S_{gen,e} = \dot{m}_r (s_{10} - s_9) - \frac{Q_e}{T_L} \quad (2)$$

dengan  $T_L$  adalah temperatur rata-rata selama perpindahan kalor di dalam evaporator.



Gambar 1. Refrigerator kompresi uap

Proses kompresi diasumsikan non-adiabatik dan ireversibel. Dalam proses ini, energi melintasi permukaan volume atur termasuk rugi kalor dari kompresor ke udara sekitar dan daya kompresor. Laju rugi kalor dan pembangkitan entropi dalam proses kompresi dapat ditentukan sebagai berikut:

$$Q_{comp} = W_{comp} + \dot{m}_r (h_2 - h_1) \quad (3)$$

$$S_{gen,comp} = \dot{m}_r (s_2 - s_1) - \frac{Q_{comp}}{T_0} \quad (4)$$

dengan  $T_0$  adalah temperatur udara sekitar, dan  $W_{comp}$  adalah daya kompresor.

Volume atur kondensator yang digunakan dalam analisis meliputi keseluruhan kondensator kecuali ruangan udara pendingin. Kalor dipindahkan dari refrigeran ke udara pendingin. Laju perpindahan kalor,  $Q_c$  dari refrigeran ke udara pendingin, dan laju pembangkitan entropi  $S_{gen,c}$ , dapat ditentukan dengan menggunakan hubungan berikut:

$$Q_c = W_{fc} + \dot{m}_a c_{p,a} (T_{ac,i} - T_{ac,o}) \quad (5)$$

$$S_{gen,c} = \dot{m}_r (s_3 - s_2) - \frac{Q_c}{T_H} \quad (6)$$

dengan  $T_H$  adalah temperatur udara pendingin kondensator, yang juga dapat diperlakukan sebagai temperatur rata-rata di dalam proses perpindahan kalor, yaitu:

Meminimalkan pembangkitan entropi dalam refrigerator berarti meminimalkan penjumlahan pembangkitan entropi di semua komponen, yang dinyatakan dalam bentuk angka pembangkitan entropi sebagai:

$$N_{s,sistem} = \frac{T_0 S_{gen}^{tot}}{W_{sistem}} \quad (7)$$

dengan  $W_{sistem}$  adalah selisih antara rugi kalor di kompresor dan kalor yang dibuang di kondensator dengan kalor yang diserap di evaporator, yaitu:

$$W_{sistem} = Q_{comp} + (Q_c - Q_e) \quad (8)$$

Efisiensi hukum kedua termodinamika sistem refrigerasi ini adalah perbandingan antara  $COP_{sistem}$  dan  $COP_{Carnot}$ , yang dapat dinyatakan dalam persamaan berikut [10]:

$$\eta_{II,sistem} = \frac{COP_{sistem}}{COP_{Carnot}} \quad (9)$$

dan

$$COP_{sistem} = \frac{Q_e}{W_{sistem}} \quad (10)$$

Temperatur keadaan-mati pada pemodelan sistem adalah temperatur udara sekitar yaitu  $T_0 = T_H$ , dan kapasitas pendinginan ( $Q_e$ ) ditentukan untuk pemodelan.

Persamaan (7), (8), (9), dan (10) adalah empat fungsi objektif yang akan dioptimalkan secara simultan, dan karena rugi kalor pada kompresor ( $Q_{comp}$ ) merupakan fungsi dari daya kompresor dan laju aliran massa refrigeran, serta laju pelepasan kalor di kondensator ( $Q_c$ ) merupakan fungsi daya kompresor dan kapasitas pendinginan di evaporator maka empat fungsi objektif untuk optimasi sistem refrigerasi adalah:

$$\min N_{s,sistem} = f(W_{comp}, Q_e) \tag{11}$$

$$\max \eta_{II,sistem} = f(W_{comp}, Q_e) \tag{12}$$

$$\min W_{sistem} = f(W_{comp}, Q_e) \tag{13}$$

$$\max COP_{sistem} = f(W_{comp}, Q_e) \tag{14}$$

dengan kendala:

$$W_{comp} + Q_e \leq 1,9 \text{ kW} \tag{15}$$

$$0,2 \leq W_{comp} \leq 0,6 \text{ kW} \tag{16}$$

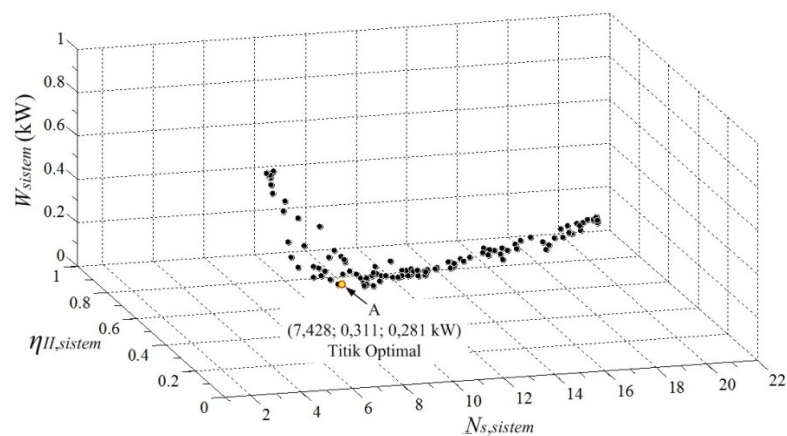
$$0,2 \leq Q_e \leq 1,3 \text{ kW} \tag{17}$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

Keberadaan empat fungsi objektif yang saling bertentangan dalam sistem refrigerasi ini tidak dapat dihindari, dan optimasi multiobjektif harus dilakukan sebagai upaya untuk mendapatkan solusi optimal dari desain hukum kedua termodinamika. Parameter *tuning* algoritma genetika multiobjektif untuk optimasi sistem disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Parameter *tuning* algoritma genetika

Parameter <i>tuning</i>	Nilai
Ukuran Populasi	70
Jumlah maksimum generasi	150
Probabilitas <i>crossover</i>	0,8
Probabilitas mutasi	0,1
Proses seleksi	<i>Tournament</i>
Ukuran <i>tournament</i>	2
Ukuran <i>elite</i>	1

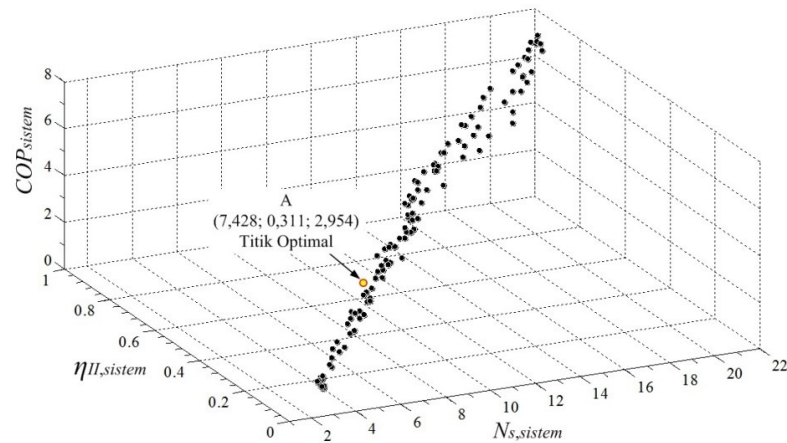


**Gambar 2.** Paretofrontier  $N_s$ ,  $\eta_{II}$ , dan  $W_{sistem}$

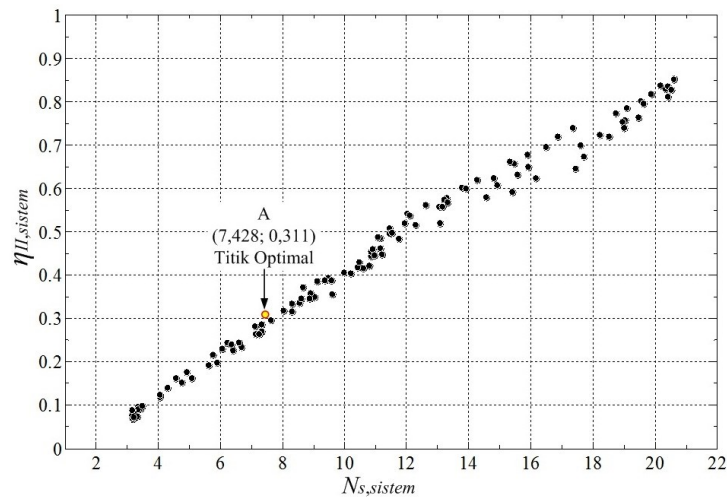
Gambar 2 sampai dengan 7 menunjukkan Pareto *frontier* di dalam ruang objektif tiga dimensi dan dua dimensi, dan letak titik optimal dari kumpulan solusi optimal di dalam ruang objektif tersebut. Gambar 2 menunjukkan angka pembangkitan entropi, efisiensi hukum kedua sistem, dan total masukan daya sistem di dalam ruang objektif. Perubahan interval masing-masingnya adalah (3,144-20,618), (0,088-0,853), dan (0,161-0,961 kW), Gambar 3 menunjukkan angka pembangkitan entropi, efisiensi hukum kedua sistem, dan koefisien kinerja sistem di dalam ruang objektif dengan perubahan interval masing-masingnya adalah (3,144-20,618), (0,088-0,853), dan (0,833-8,090) sebagai kumpulan titik optimal.

Titik A dipilih sebagai titik optimal berdasarkan perubahan interval besaran-besaran kinerja tersebut sebagai hasil optimasi dengan pertimbangan bahwa pada titik tersebut total masukan daya sistem dan masukan daya kompresor

adalah minimum ( $W_{sistem} = 0,281$  kW dan  $W_{komp} = 0,260$  kW), dan angka pembangkitan entropi ( $N_{s,sistem} = 7,428$ ) adalah minimum dibandingkan dengan kandidat solusi optimal lainnya. Walaupun pada titik A, efisiensi hukum kedua dan koefisien kinerja sistem memiliki nilai yang sedikit lebih rendah daripada nilai solusi optimal lain (misalnya pada  $N_{s,sistem} = 8,298$ ) tetapi nilai-nilai tersebut ( $\eta_{II,sistem} = 0,311$  dan  $COP_{sistem} = 2,954$ ) dapat diterima sebagai nilai optimal dari kedua parameter kinerja sistem refrigerasi. Desainer dapat saja memilih nilai optimal  $N_{s,sistem} = 8,298$  yang memiliki nilai  $W_{sistem} = 0,288$  kW;  $W_{komp} = 0,264$  kW;  $\eta_{II,sistem} = 0,334$  dan  $COP_{sistem} = 3,172$  di mana pada titik ini efisiensinya lebih tinggi 6,88% dibandingkan dengan titik A, sedangkan masukan daya sistem dan daya kompresor tidak jauh berbeda (dapat dikatakan sama). Namun karena metode EGM mensyaratkan nilai angka pembangkitan entropi adalah minimum maka pemilihan titik A dipilih sebagai solusi optimal dapat dibenarkan.

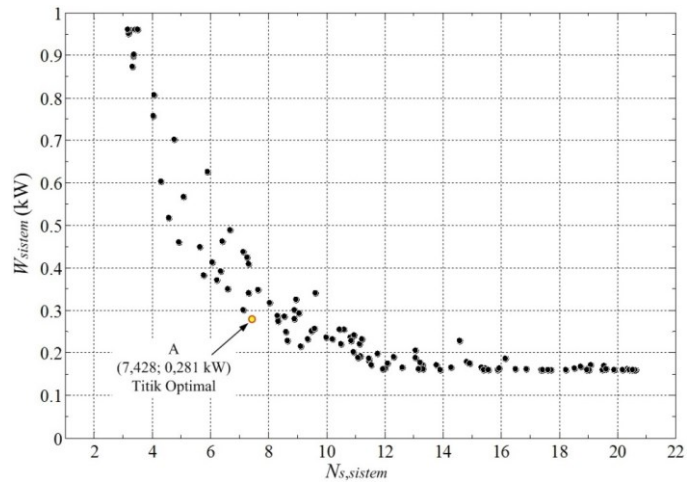


Gambar 3. Pareto frontier  $N_s$ ,  $\eta_{II}$ , dan  $COP$



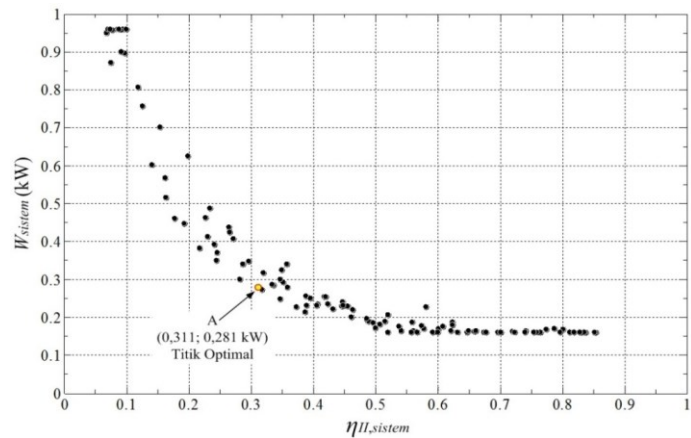
Gambar 4. Pareto frontier  $N_s$  dan  $\eta_{II}$

Gambar 4 sampai dengan 7 akan menjelaskan alasan pemilihan titik A sebagai titik optimal. Pada Gambar 4 terlihat bahwa untuk nilai  $N_{s,sistem} > 7,428$  terjadi peningkatan efisiensi hukum kedua sistem, tetapi untuk nilai  $N_{s,sistem} < 7,428$  terjadi penurunan efisiensi hukum kedua sistem, sehingga tidak dapat dikatakan bahwa dengan meminimalkan angka pembangkitan entropi akan selalu mengarah pada efisiensi hukum kedua yang maksimal. Hal ini juga diperkuat dengan kenyataan bahwa peningkatan angka pembangkitan entropi (nilai  $N_{s,sistem} > 7,428$ ) mengakibatkan penurunan total masukan daya sistem refrigerasi (kecuali pada beberapa nilai kandidat solusi optimal), tetapi total masukan daya sistem setelah titik optimal tersebut memiliki nilai yang lebih kecil daripada nilai daya kompresor (misalnya pada  $N_{s,sistem} = 9,104$  nilai  $W_{sistem} = 0,216$  kW sedangkan  $W_{komp} = 0,227$  kW). Tentu saja hal tidak mungkin terjadi pada sistem refrigerasi, karena total masukan daya sistem merupakan hasil penjumlahan dari daya kompresor, daya kipas kondensor, dan daya kipas evaporator. Dengan demikian, nilai-nilai pembangkitan entropi setelah titik optimal dapat diabaikan.

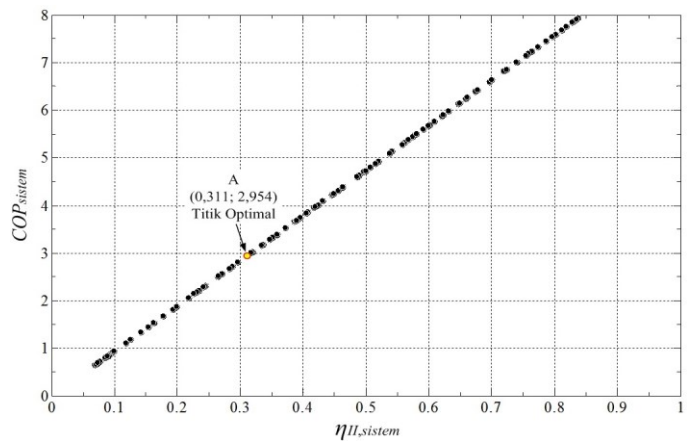


**Gambar 5.** Pareto frontier  $N_s$  dan  $W_{sistem}$

Gambar 5 dan 6 menunjukkan peningkatan total masukan daya sistem akan mengakibatkan penurunan nilai angka pembangkitan entropi dan efisiensi hukum kedua sistem (nilai  $N_{s,sistem} < 7,428$  dan  $\eta_{II,sistem} < 0,311$  terjadi peningkatan total masukan daya sistem). Dengan demikian, maka pada angka pembangkitan entropi minimum belum tentu menghasilkan efisiensi hukum kedua yang maksimum dan total masukan daya yang minimum, tetapi ada sebuah nilai total masukan daya sistem minimum dan efisiensi hukum kedua maksimum yang menandakan angka pembangkitan entropi sistem adalah minimum.



**Gambar 6.** Pareto frontier  $\eta_{II}$  dan  $W_{sistem}$



**Gambar 7.** Pareto frontier  $\eta_{II}$  dan  $COP$

Gambar 7 menunjukkan hubungan efisiensi hukum kedua dan koefisien kinerja sistem. Pada gambar ini terlihat bahwa efisiensi hukum kedua dan koefisien kinerja menunjukkan hubungan yang linier yaitu peningkatan terhadap nilai efisiensi hukum kedua akan selalu meningkatkan koefisien kinerja sistem. Hal ini tentu tidak terbantahkan dan

didukung oleh Bejan [12] yang melakukan analisis teoritis efisiensi hukum kedua pada sistem refrigerasi berdasarkan dua model pendekatan efisiensi hukum kedua. Model pertama didasarkan pada ireversibilitas sistem refrigerasi yang semata-mata diakibatkan oleh perpindahan kalor internal, dan model kedua yang didasarkan pada gabungan model pertama dengan ireversibilitas perpindahan kalor eksternal antara kapasitas pendinginan sistem refrigerasi dan udara lingkungan. Kedua model ini menunjukkan bahwa efisiensi hukum kedua akan menurun selama temperatur evaporator menurun (koefisien kinerja sistem menurun) atau bila koefisien kinerja bertambah besar (temperatur evaporator meningkat) maka efisiensi hukum kedua juga akan bertambah besar.

Analisis ini menunjukkan bahwa konsep pembangkitan entropi secara langsung mengukur kerugian *exergy* untuk mengatasi masalah optimasi konversi kerja–kalor, sehingga meminimalkan pembangkitan entropi adalah meminimalkan kerugian *exergy* pada sistem refrigerasi. Namun, karena tujuan desain adalah meminimalkan total masukan daya dan memaksimalkan efisiensi hukum kedua sistem maka tujuan desain ini tidak mengarah pada pembangkitan entropi minimum sehingga angka pembangkitan entropi mengalami paradoks. Optimasi multiobjektif dengan menggunakan metode EGM di sistem refrigerasi ini kembali menegaskan bahwa metode EGM dapat mengalami paradoks di mana meminimalkan pembangkitan entropi di dalam komponen atau sistem termal tidak selalu mengarah pada kinerja komponen atau sistem yang optimal, tetapi ada suatu titik optimal sistem yang ditandai dengan pembangkitan entropi minimum [5, 10, 11].

#### 4. Kesimpulan

Optimasi multiobjektif dengan menggunakan metode EGM pada sistem refrigerasi ini kembali menegaskan bahwa metode EGM dapat mengalami paradoks, dimana meminimalkan pembangkitan entropi sistem tidak akan dengan serta merta menghasilkan efisiensi hukum kedua yang maksimal tetapi ada sebuah titik optimal sistem yang menandakan pembangkitan entropi adalah minimum. Dari hasil pemodelan dan optimasi multiobjektif sistem refrigerasi ini maka diperoleh total daya sistem adalah 0,281 kW, efisiensi hukum kedua adalah 0,311 dan koefisien kinerja adalah 2,95.

#### Daftar Pustaka

- [1] Arteconi, A., and Polonara, F., 2017, “Demand Side Management in Refrigeration Applications,” *International Journal of Heat and Technology*, 3(1): S58–S63.
- [2] She, X., et al., 2018, “Energy-Efficient and Economic Technologies for Air Conditioning with Vapor Compression Refrigeration: A Comprehensive Review,” *Applied Energy*, 232: 157–186.
- [3] Bejan, A., 1996, “Entropy Generation Minimization: The New Thermodynamics of Finite-size Devices and Finite-time Processes,” *Journal Applied Physics*, 79: 1191 – 1218.
- [4] Bejan, A., 2002, “Fundamentals of Exergy Analysis, Entropy Generation Minimization, and the Generation of Flow Architecture,” *International Journal of Energy Research*, 26: 545 – 565.
- [5] Bejan, A., 2016, “Advanced Engineering Thermodynamics Fourth Edition,” John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.
- [6] Kham, I., et al., 2019, “Thermodynamic Analysis of Entropy Generation Minimization in Thermally Dissipating Flow Over a Thin Needle Moving in a Parellel Free Stream of Two Newtonian Fluids,” *Entropy*, 21(74):2–10.
- [7] Cheng, XT and Liang, XG, 2013, “Discussion on the Applicability of Entropy Generation Minimization to the Analyses and Optimization of Thermodynamic Processes,” *Energy Conversion and Management*, 73: 121 – 127.
- [8] Dwinanto, M. M., Suhanan, dan Prajitno, 2017, “Exergy Analysis of Dual-Evaporator Refrigeration Systems,” *AIP Conference Proceedings*, 1788: 030011-1 – 030011-8.
- [9] Dwinanto, M.M., Suhanan, dan Prajitno, 2018, “Multi-Objective Optimization of a Herringbone Wavy Fin-and-Tube Condenser Design using Entropy Generation Minimization Method,” *AIP Conference Proceedings*, 2001: 070002-1 – 070002-6.
- [10] Dwinanto, M.M., Riwu, D.B.N., Pah, J.C.A., and Tobe, A.Y., 2019, “Multi-Objective Optimization of a Discrete Plate Finned-Tube Evaporator Design using Entropy Generation Minimization Method,” *International Journal of Innovation, Creativity and Change*, 5(3): 370 – 383.
- [11] Dwinanto, M.M., 2019, “Optimal Design of Herringbone Wavy Fin-and-Tube Condenser Based on the Entropy Generation Number,” *International Journal of Innovation, Creativity and Change*, 5(3): 654 – 668.
- [12] Bejan, A., 1989, “Theory of Heat Transfer-Irreversible Refrigeration Plants,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32(9): 1631 – 1639.