

## Optimasi Sistem Pembangkit Daya Kogenerasi Dengan Metode Algoritma Genetika

Ronald Sukianto<sup>1a\*</sup>, I Made Astina<sup>2b</sup>

<sup>1,2</sup> Program Studi Teknik Mesin Institut Teknologi Bandung  
Jalan Ganesha 10 Bandung 40132, Jawa Barat, Indonesia  
email: ronaldsukianto@gmail.com, imadeastina@yahoo.com

### Abstrak

Sistem pembangkit daya kogenerasi adalah sistem pembangkit daya gabungan yang terdiri dari siklus Rankine, Brayton, Rankine organik, dan pendingin kompresi uap. Proses optimasi diperlukan untuk meningkatkan kinerja pembangkit daya. Sistem berefisiensi lebih tinggi dapat memperoleh keuntungan finansial yang lebih tinggi dan meminimalkan emisi gas buang ke lingkungan. Untuk mencapai tujuan tersebut, algoritma genetika digunakan sebagai metode optimasi yang berdasarkan prinsip genetika dan seleksi alam. Keunggulan algoritma genetika adalah kemampuan mencapai global optimum yang cepat dan handal untuk sistem dengan banyak variabel. Optimasi menggunakan metode algoritma genetika memodelkan parameter operasi sistem sebagai kumpulan gen yang membentuk individu. Individu memiliki nilai *fitness* yang unik untuk mewakili nilai efisiensi sistem. Nilai efisiensi tertinggi kemudian akan dicari melalui proses seleksi alam yang meliputi pembangkitan generasi, seleksi, kawin silang, dan mutasi. Hasil akhir diinginkan individu dengan gen-gen unggul yang menghasilkan nilai *fitness* tertinggi. Pemodelan dan perubahan parameter operasi seperti temperatur masuk kompresor gas, temperatur masuk turbin gas, temperatur masuk turbin uap, temperatur masuk turbin Rankine organik, rasio tekanan kompresor gas, dan rasio tekanan kompresor pendingin dilakukan untuk mencari nilai efisiensi optimum sistem. Efisiensi tertinggi dicapai saat temperatur masuk kompresor gas sebesar 271 K, temperatur masuk turbin gas sebesar 1800 K, temperatur masuk turbin uap sebesar 841 K, temperatur masuk turbin Rankine organik sebesar 413 K, rasio tekanan kompresor gas 18, dan rasio tekanan kompresor pendingin 4. Hasil dari proses optimasi yaitu efisiensi sistem sebesar 56,42%, sedangkan dengan perhitungan simulasi konvensional satu variabel menghasilkan 54,86%.

**Kata kunci:** optimasi, kogenerasi, algoritma genetika, efisiensi termal.

### Latar belakang

Pembangkit yang efisien sangat diinginkan baik dari sudut pandang ekonomi dan lingkungan karena berhubungan dengan biaya operasi keseluruhan dan lingkungan. Pemilik modal menginginkan biaya produksi per kWh listrik yang sekecil mungkin sehingga diperoleh keuntungan yang sebesar-besarnya, namun tetap ramah lingkungan. Pembangkit listrik kogenerasi atau yang dikenal sebagai *Combined Cooling Heating and Power Plant* dapat mengakomodasi peningkatan kebutuhan energi dan meminimalisir emisi gas buang ke lingkungan sekaligus memperoleh keuntungan finansial [1].

Untuk memperoleh efisiensi yang maksimum, kondisi operasi optimal dari fluida kerja diperlukan dalam siklus pembangkit. Penentuan kondisi optimal ini disebut dengan proses optimasi yaitu proses mencari nilai efisiensi tertinggi yang dapat dicapai dengan mengubah kondisi operasi fluida kerja. Kondisi operasi dari fluida harus dalam rentang kondisi yang umum dan beralasan yang mungkin dicapai

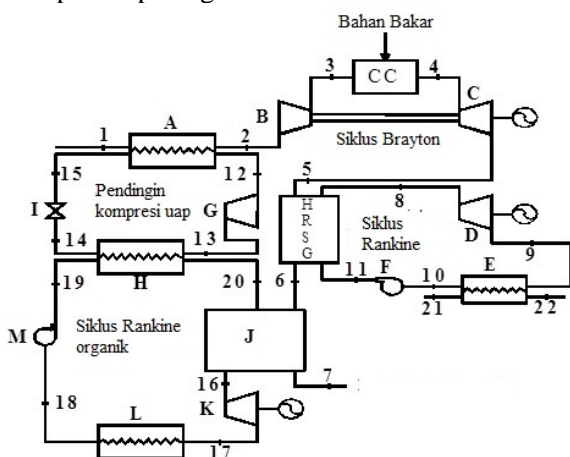
sesuai hukum termodinamika. Proses optimasi tersebut menggunakan metode optimasi yang sudah banyak dijumpai di dunia teknik yakni metode optimasi evolusioner.

Algoritma genetika merupakan metode algoritma stokastik yang dapat digunakan mencari global maksimum atau minimum untuk proses optimasi diskrit [2]. Algoritma menggunakan prinsip seleksi alam dan genetika. Individu yang lebih kuat akan bertahan hidup kemudian berkembang biak dengan individu unggulan lain untuk menghasilkan generasi baru yang semakin kuat. Prinsip ini diterapkan untuk melakukan proses optimasi. Sejumlah individu akan mengalami proses seleksi untuk mencari nilai maksimum/optimum. Dalam konteks optimasi pembangkit listrik, kondisi operasi fluida kerja akan dimodelkan sebagai individu yang akan berkembang biak dan mengalami proses seleksi untuk menghasilkan nilai efisiensi sistem maksimum.

Makalah ini mencoba untuk mengaplikasikan metode algoritma genetika untuk mengoptimasi pembangkit daya kogenerasi dengan beberapa variabel optimasi. Kinerja sistem CCHP sangat bergantung pada kondisi operasi dan desain sehingga untuk memaksimalkan manfaat sistem CCHP, optimasi kondisi operasi dan desain diperlukan [3]. Dalam simulasi konvensional hanya dilakukan perubahan variabel secara manual untuk mengetahui efeknya terhadap efisiensi sistem. Perhitungan dilakukan berulang-ulang untuk perubahan nilai variabel yang berbeda. Algoritma genetika dapat melakukan proses optimasi secara simultan dengan banyak perubahan variabel untuk mencari nilai optimum. Penelitian sebelumnya oleh Samudra [4] telah berhasil mengaplikasikan teknik algoritma genetika untuk optimasi sistem pembangkit listrik tenaga gas dan uap. Variabel-variabel dalam pembangkit kogenerasi saling bergantung satu sama lain sehingga optimasi perlu mempertimbangkan perubahan suatu variabel ketika variabel lain berubah karena proses optimasi. Penelitian ini mengaplikasikan metode optimasi algoritma genetika untuk mencapai efisiensi optimum dari pembangkit dengan variabel yang lebih kompleks.

### Pembangkit Daya Kogenerasi

Pembangkit daya kogenerasi merupakan pembangkit daya listrik yang juga memanfaatkan panas untuk pemanasan atau pendinginan. Dalam penelitian ini, studi kasus yang dioptimasi mengacu pada referensi [5] sebagaimana ditampilkan pada gambar 1.



**Gambar 1.** Skema pembangkit listrik kogenerasi [5]

Sistem terdiri dari empat siklus yang berbeda yaitu: siklus turbin gas (*Brayton*), siklus turbin uap (*Rankine*), siklus *Rankine* organik, dan siklus pendingin kompresi uap. Sumber panas adalah pembakaran gas di ruang bakar siklus

*Brayton* sehingga siklus turbin gas disebut sebagai siklus utama. Panas buang dari turbin gas dimanfaatkan untuk menguapkan air dalam *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). Sisa panas buang dari HRSG dimanfaatkan lagi untuk menguapkan refrigeran R245fa dalam siklus ORC di dalam *recuperator*. Siklus pendingin dengan refrigeran R134a berperan sebagai *air inlet cooler* siklus turbin gas. Beberapa kondisi operasi yang dapat diubah sebagai variabel dalam proses optimasi dapat dilihat pada Tabel 1. Kondisi operasi fluida kerja seperti temperatur dan tekanan dijadikan sebagai variabel yang akan divariasikan untuk menemukan kombinasi parameter operasi yang memberikan nilai efisiensi maksimum. Penyesuaian variabel laju aliran massa fluida tiap siklus juga perlu dilakukan agar perpindahan panas yang terjadi dalam sistem tidak melanggar hukum termodinamika kedua.

**Tabel 1.** Kondisi operasi sebelum optimasi

No	Kondisi	T <sup>a</sup> (K)	P <sup>b</sup> (MPa)
1	Masuk kompresor gas	278	0,1
2	Masuk turbin gas	1800	2,4
3	Masuk turbin uap	760,77	8
4	Masuk turbin ORC	393	1,4
5	Masuk kompresor pendingin	271	0,39
6	Keluar kompresor pendingin	333	1,9
7	Keluar kompresor gas	678,21	2,4

<sup>a</sup>Temperatur, <sup>b</sup>Tekanan

Dengan menggunakan persamaan tingkat keadaan termodinamika dengan kondisi operasi fluida kerja sesuai Tabel 1, analisis termodinamika dilakukan dan dihasilkan efisiensi sebesar 54,86 %. Studi tentang parameter kondisi operasi fluida keseluruhan sistem dilakukan untuk mengetahui batas yang mungkin diberikan saat pembangkit bekerja. Studi didasarkan dengan fasa fluida kerja terkait dan pengalaman di dunia melalui studi karya ilmiah sebelumnya.

Martinez et al. [6] menyatakan bahwa teknologi turbin gas saat ini mampu menahan

temperatur sampai dengan 1973 K dan rasio kompresi 34:1. Dasar tersebut digunakan untuk menentukan batas kondisi operasi fluida dalam turbin gas.

R245fa sebagai fluida kerja sistem ORC harus bekerja di bawah temperatur kritisnya. Guo et al. [7] menyatakan temperatur dan tekanan kritis masing-masing sebesar 427,05 K dan 3,64 MPa .

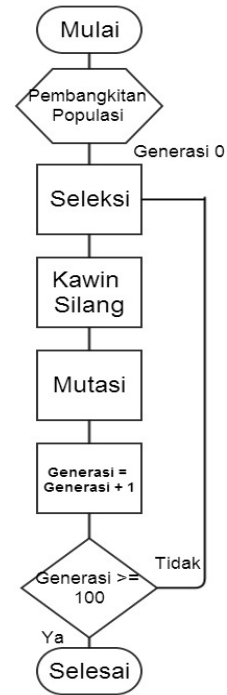
Konsep *pinch point* pada penukar kalor juga harus dipenuhi. Parameter yang akan diubah saat proses optimasi ada enam yaitu temperatur masuk turbin gas, temperatur masuk kompresor gas, temperatur masuk turbin uap, temperatur masuk turbin Rankine organik, rasio tekanan kompresor gas, dan rasio tekanan kompresor pendingin. Batasan kondisi operasi fluida ditampilkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Batas kondisi operasi fluida sistem

No	Kondisi Operasi	Rentang Nilai
1	Temperatur masuk turbin gas	1700 – 1800 K
2	Temperatur masuk kompresor gas	271 – 288 K
3	Temperatur masuk turbin uap	723 – 841 K
4	Temperatur masuk turbin Rankine organik	373 – 413 K
5	Rasio tekanan kompresor gas	18 - 30
6	Rasio tekanan kompresor pendingin	4 - 8

### Metode Algoritma Genetika

Proses optimasi menggunakan metode algoritma genetika dengan tahap yang ditunjukkan pada gambar 2.



**Gambar 2.** Diagram alir proses algoritma genetika

Tahap optimasi sama seperti metode algoritma genetika secara umum. Langkah-langkah dijabarkan sebagai berikut:

1) Penentuan nilai *fitness*

Nilai *fitness* adalah nilai yang menggambarkan kemampuan bertahan hidup sebuah individu untuk bertahan mengalami proses seleksi dan dapat berkembang biak menghasilkan individu baru yang diharapkan memiliki nilai *fitness* lebih besar lagi. Dalam optimasi ini, nilai *fitness* adalah nilai efisiensi termal dari sistem pembangkit. Karena tujuan optimasi adalah menghasilkan efisiensi sebesar-besarnya dengan variabel parameter operasi fluida maka nilai *fitness* juga diharapkan sebesar mungkin. Definisi nilai *fitness* diberikan pada persamaan (1). Kalor masuk melalui sistem hanya melalui pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar siklus turbin gas.

$$\eta_{total} = \frac{\text{daya turbin} - \text{daya parasitik}}{\dot{Q}_{in}} \quad (1)$$

$$Q_{masuk} = \dot{m}_{BB} LHV \eta_{RB} \quad (2)$$

$$\text{daya turbin} = W_{gas} + W_{uap} + W_{ORC} \quad (3)$$

$$d. \text{parasitik} = W_{pompa} + W_{kompresor} \quad (4)$$

$\dot{m}_{BB}$  : laju aliran bahan bakar

LHV : lower heating value BB

$\eta_{RB}$  : efisiensi ruang bakar

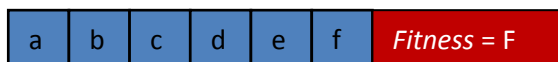
2) Penentuan batas kondisi operasi fluida

Kondisi operasi fluida akan dimodelkan sebagai gen-gen yang membentuk individu.

Enam buah parameter operasi diwakilkan dengan enam buah gen dalam satu individu yang menghasilkan nilai *fitness* tertentu. Selama proses optimasi, nilai parameter ini akan mengalami perubahan karena proses kawin silang dan mutasi. Namun batas kondisi operasi fluida perlu ditentukan agar tidak menyimpang dari kesetimbangan fasa dan juga sesuai dengan keadaan nyata di industri. Dengan demikian hasil optimasi dari parameter operasi akan realistis untuk diaplikasikan.

### 3) Pembangkitan Populasi

Populasi sejumlah 75 individu dibangkitkan dengan menghasilkan nilai acak dengan fungsi *random* untuk enam nilai parameter yang batasnya terlampir di tabel di atas. Susunan enam nilai masing-masing berperan sebagai gen yang membentuk individu dengan nilai *fitness* tertentu.



Keterangan:

- a = Temperatur masuk kompresor gas
- b = Temperatur masuk turbin gas
- c = Rasio tekanan kompresor gas
- d = rasio tekanan kompresor pendingin
- e = Temperatur masuk turbin uap
- f = Temperatur masuk turbin ORC

**Gambar 3.** Ilustrasi gen dalam individu

### 4) Proses Seleksi

Proses seleksi bertujuan untuk memilih individu dalam generasi yang sedang berlangsung untuk mengikuti proses kawin silang. Tentunya individu yang memiliki nilai *fitness* tinggi akan memiliki kesempatan yang lebih besar untuk mengikuti proses selanjutnya. Metode roda rolet memiliki prinsip utama bahwa individu dengan nilai *fitness* yang lebih tinggi akan mendapat porsi dalam roda rolet yang lebih besar sehingga saat roda diputar kemungkinan terpilihnya semakin besar. Metode kedua yang digunakan yaitu metode peringkat atau *ranking*. Prinsipnya dalam metode peringkat, individu dengan *fitness* makin besar akan memperoleh peringkat semakin tinggi. Individu peringkat paling atas akan memiliki probabilitas terpilih semakin besar. Kedua metode ini merupakan metode proporsional yang memiliki kelebihan yaitu terjaganya keanekaragaman populasi dalam populasi untuk mencegah global lokal [8].

### 5) Kawin Silang

Proses kawin silang bertujuan untuk menggabungkan kombinasi gen-gen dari individu terpilih untuk membentuk satu

individu baru atau individu anakan. Tujuan dari proses kawin silang adalah untuk memperoleh keturunan individu yang lebih baik melalui pertukaran gen. Ilustrasi proses kawin silang satu titik. Berikut gambar untuk menggambarkan proses tersebut:



**Gambar 4.** Skematik proses kawin silang satu titik

### 6) Mutasi

Proses mutasi berperan penting untuk menjaga keanekaragaman dalam populasi individu. Tujuan dari proses mutasi adalah mencegah kehilangan dini material genetik penting dan menjaga keragaman dalam populasi. Mutasi yang digunakan adalah mutasi satu titik dimana satu nilai gen dari gen yang terpilih secara acak mengikuti mutasi (jumlahnya tergantung laju mutasi dan jumlah populasi) berubah secara acak. Laju mutasi adalah 3% dan jumlah individu sebanyak 75 per populasi. Setiap individu memiliki 6 buah gen sehingga total gen yang akan termutasi dalam satu kali generasi adalah sebanyak 14 individu yang dipilih secara acak. Gen yang akan mengalami mutasi juga dipilih secara acak.

### Metodologi Optimasi

Keseluruhan algoritma optimasi dibuat dengan bahasa pemrograman C++ dengan compiler GNU GCC 64 bit. Karena perhitungan nilai *fitness* memerlukan data sifat-sifat termodinamika fluida maka penulis menggunakan program database sifat termodinamika dalam bahasa C++ buatan Astina [9]. Persamaan tingkat keadaan yang digunakan untuk masing-masing fluida disajikan dalam Tabel 3.

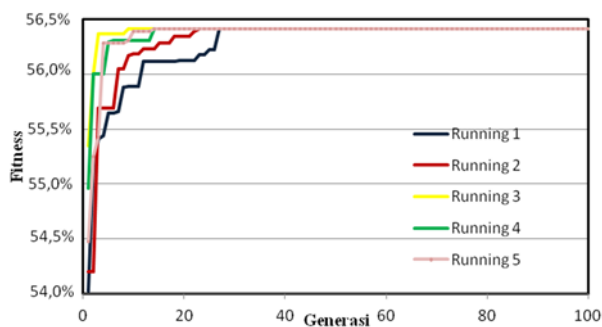
**Tabel 3.** Persamaan tingkat keadaan sifat termodinamika

Fluida	Persamaan Tingkat Keadaan
Udara	Lemmon et al (2000) [10]
Air	Saul and Wagner (2000) [11]
R-134-a	Astina and Sato (2004) [12]
R-245-fa	Lemmon and Span (2006) [13]

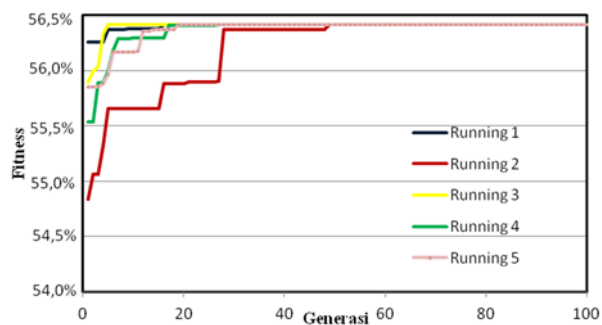
### Analisis Hasil Optimasi

Proses optimasi dilakukan menggunakan empat kombinasi metode yang berbeda antara metode seleksi satu dan dua titik dikombinasikan dengan metode seleksi roda rolet dan *ranking*. Keempat metode memberikan hasil konvergen yang sama yaitu efisiensi sebesar 56,42%.

Masing-masing metode dijalankan sebanyak lima kali kemudian nilai generasi saat konvergensi dimulai dicatat dan dirata-ratakan sehingga dapat dibandingkan mana metode yang menghasilkan nilai optimum tercepat. Gambar 5 memberikan gambaran hasil *running* proses sebanyak lima kali per metode kawin siang dan seleksi yang berbeda. Gambar 6 menggambarkan perbandingan dua metode kawin silang yang berbeda namun dengan metode seleksi yang sama. Total untuk empat macam kombinasi metode yang berbeda dilakukan *running* program sebanyak 20 kali.



**Gambar 5.** Hasil *running* program optimasi dengan metode kawin silang satu titik dan seleksi *ranking*

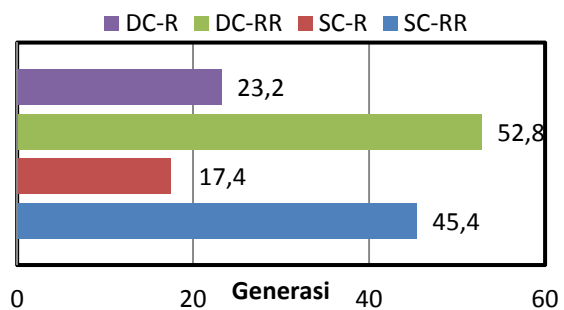


**Gambar 6.** Hasil *running* program optimasi dengan metode kawin silang dua titik dan seleksi *ranking*

Gambar 7 menjelaskan perbandingan kecepatan tiap metode untuk mencapai konvergensi nilai optimum. Metode kawin silang satu titik–metode seleksi *ranking* memberikan nilai optimum dalam waktu rata-rata 17,4 generasi. Sementara metode kawin silang satu titik dengan metode seleksi yang berbeda membutuhkan 45,4 generasi untuk mencapai konvergensi. Metode terlama adalah metode kawin silang dua titik- metode seleksi roda rolet yang membutuhkan 52,8 generasi untuk mendapatkan nilai optimum.

Metode kawin silang satu titik unggul dari kawin silang dua titik dikarenakan jumlah gen yang bertukar dalam proses lebih banyak.

Semakin banyak gen yang bertukar maka *fitness* individu berubah lebih ekstrim karena nilai *fitness* dipengaruhi langsung dari alel tiap gen. Perubahan ekstrim ini dapat menjadi keuntungan ketika individu cenderung penuh dengan individu unggul. Pertukaran gen antara individu-individu unggul ini akan lebih cepat menciptakan individu keturunan terunggul. Metode seleksi *ranking* memberikan hasil yang lebih cepat karena lebih andal dalam menyeleksi individu unggul. Dalam seleksi *ranking* berlaku prinsip semakin tinggi nilai *fitness* maka peluang terpilih semakin tinggi. Berbeda dengan metode roda rolet, walaupun individu dengan nilai *fitness* tinggi mendapat porsi yang lebih besar namun kemungkinan terpilihnya individu masih mengandung unsur keberuntungan. Keterpilihan sangat bergantung pada nilai yang ditunjuk saat roda rolet berputar.



Ket :  
 DC – R : kawin silang dua titik – seleksi *ranking*  
 DC – RR : kawin silang dua titik – seleksi roda rolet  
 SC – R : kawin silang satu titik – seleksi *ranking*  
 SC – RR : kawin silang satu titik – seleksi roda rolet

**Gambar 6.** Kecepatan empat metode untuk mencapai kekonvergengan

Hasil optimasi program dapat dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Kondisi operasi hasil optimasi

No	Kondisi	T (K)	P (MPa)
1	Masuk kompresor gas	271	0,1
2	Masuk turbin gas	1800	1,8
3	Masuk turbin uap	841	8
4	Masuk turbin ORC	413	1,4

5	Masuk kompresor pendingin	271	0,39
6	Keluar kompresor pendingin	333	1,56

Tabel 4.6 menampilkan perbandingan nilai kerja sistem sebelum dan sesudah proses optimasi. Dengan jumlah bahan bakar yang tetap, terjadi kenaikan daya listrik setelah proses dioptimasi. Sebelumnya sistem menghasilkan daya sebesar 398 MW, setelah proses optimasi dihasilkan daya sebesar 406 MW. Tinjauan per siklus memperlihatkan bahwa terjadi kenaikan daya listrik dari siklus turbin uap dan siklus turbin gas. Sedangkan pada siklus Rankine organik dijumpai penurunan nilai daya yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan adanya pengurangan laju aliran massa R245fa dalam siklus Rankine organik. Siklus pendingin kompresi uap setelah proses optimasi membutuhkan daya listrik yang lebih besar karena beban pendinginan yang lebih besar. Beban pendinginan diperlukan untuk mendinginkan udara masuk kompresor gas pada siklus Brayton, dimana terjadi peningkatan beban pendinginan setelah proses optimasi. Namun pengurangan daya siklus Rankine organik dan peningkatan daya yang dibutuhkan siklus pendingin dapat dikompensasi dengan kenaikan daya siklus Rankine dan Brayton.

**Tabel 5.** Daya listrik sistem setelah optimasi

	Sebelum	Sesudah	Peningkatan (%)
$\dot{Q}_{in}$ (kW)	722058,71	722058,71	0
$W_{net}$ Rankine (kW)	97511,82	106707,00	9,43
$W_{net}$ Brayton (kW)	305021,87	312524,66	2,46
$\dot{W}_{in}$ Refri (kW)	14961,63	17337,11	15,88
$W_{net}$ ORC (kW)	11208,49	4714,95	-57,93
Output power (kW)	398780,55	406609,50	1,96
Output power (MW)	398	406	1,96

### Kesimpulan

Metode algoritma genetika cocok digunakan untuk optimasi sistem pembangkit termodinamika. Dengan variabel optimasi yang beranekaragam, metode algoritma genetika memberikan kekonvergenan menuju nilai global

optimum yang sangat cepat. Untuk optimasi sistem pembangkit daya metode optimasi yang cocok digunakan adalah metode seleksi *ranking* dan metode kawin silang satu titik. Metode *ranking* tampak sebagai metode yang paling andal dan cepat dalam memilih individu unggulan.

Efisiensi maksimum yang dapat dicapai pembangkit sebesar 56,42 %, naik 1,56% dari hasil simulasi konvensional yang sebesar 54,86%. Kondisi operasi yang harus dipenuhi: temperatur masuk kompresor gas 271 K, temperatur masuk turbin gas 1800 K, rasio tekanan kompresor gas 18, temperatur masuk turbin uap 841 K, temperatur masuk turbin ORC 413 K, dan rasio tekanan kompresor pendingin 4.

### Referensi Literatur

- [1] D. W. Wu, R.Z. Wang, Combined Cooling, Heating, and Power: A Review, *Progress in Energy and Combustion Science* 32, pp. 459-495, (2006).
- [2] Singiresu S. Rao, in *Engineering Optimization: Theory and Practice*, John Wiley and Sons, Inc., p. 693, (2009).
- [3] Jiang-Jiang Wang, You-Yin Jing, Chu-Fa Zang, Optimization of Capacity and Operation for CCHP System by Genetic Algorithm, *Journal of Applied Energy* 87, p. 1325-1335, (2010).
- [4] Kemal Arganta Samudra dan I Made Astina, Aplikasi Algoritma Genetika dalam Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap, *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII*, Lampung, p. 339-345, (2013).
- [5] Xayalak Vilaida, I Made Astina, Prihadi Setyo Darmanto, Thermodynamic Analysis of Combined Cooling, Heating, and Power System with Double Function of Heat Pump, *The 8th International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion*, Semarang, Indonesia, (2013).
- [6] Fernandorueta Rueda Martinez, et. al., Evaluation of the Gas Turbine Inlet Temperature with Relation to the Excess Air, *Energy and Power Engineering* 3, p. 517-524, (2011).
- [7] T. Guo, H.X. Wang, S.J. Zhang, Selection of Working Fluid for a Novel Low-temperature Geothermally-powered ORC based Cogeneration System, *Energy and Conversion Management* 52 (6), p. 2384-2391, (2011).
- [8] Khalid Jebari, Mohammed Madiafi, Selection Methods for Genetic Algorithms, *International Journal of Emerging Science* 3 (4), p. 333-344, (2013).

- [9] I Made Astina, Development of Fundamental Equations of State for Thermodynamic Properties of HFC Refrigerants, Disertasi Doktor, Keio University, (2003).
- [10] Eric W. Lemmon, et al, Thermodynamic Properties of Air and Mixture of Nitrogen, Argon, and Oxygen from 60 to 2000 K of Pressure to 2000 MPa, *Journal of Physical Chemistry Reference Data* 29, p. 331-385, (2000).
- [11] A. Saul, W. Wagner, A Fundamental Equation for Water Covering the Range From the Melting Line to 1273 K of Pressure up to 25000 MPa, *Journal of Physical Chemical Reference Data* 18, p. 1537-1564, (1989).
- [12] I Made Astina, Haruki Sato, A Fundamental Equation of State for 1,1,1,2-tetrafluoroethane with an Intermolecular Potential Energy Background and Reliable Ideal-gas Properties, *Fluid Phase Equilibria* 221, p. 103-111, (2004).
- [13] Eric W. Lemmon, R. Span, Short Fundamental Equations of State for 20 Industrial Fluids, *Journal of Chemical Engineer Data* 51, p. 785-850, (2006).