

ANALISIS EKSERGI DAN OPTIMASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI LAHENDONG UNIT-2

Armando Ariakta Aloanis, Heindrich Taunaumang, Alfrie Rampengan, Jeferson Polii

Program Studi Fisika FMIPA Universitas Negeri Manado

email: aaloanis@gmail.com

ABSTRAK. Pengembangan panas bumi dilakukan dengan meningkatkan efisiensi dari pembangkit yang sudah ada. Pada penelitian ini, pengembangan panas bumi di pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong Unit-2 dilakukan dengan melakukan analisis eksergi dan optimasi efisiensi pembangkit menggunakan algoritma genetik, dengan mengatur tekanan pada separator. Perhitungan eksergi dan optimasi algoritma genetik menggunakan bahasa pemrograman Python dengan bantuan library seperti PyXSteam, Pandas, Numpy, matplotlib, random dan time. Aliran eksergi dan efisiensi dihitung pada komponen separator, turbin, kondenser, menara pendingin, dan keseluruhan pembangkit. Jumlah eksergi yang masuk pada pembangkit dari fluida panas bumi adalah 28882,73 kW. Jumlah eksergi yang masuk, menghasilkan daya keluaran 13,000 kW dengan efisiensi secara keseluruhan pembangkit adalah 45,010% dan jumlah eksergi dari brine adalah 1794,11 kW. Optimasi menggunakan metode algoritma genetik menghasilkan nilai daya paling optimal yaitu 13035,480445 kW pada tekanan separator 10,4025 bar. Peningkatan daya ini dihasilkan oleh kualitas uap yang meningkat, sehingga laju alir massa uap yang memutar turbin menjadi lebih banyak dibandingkan sebelumnya.

Kata Kunci: Lapangan panas bumi Lahendong, Analisis eksergi, Optimasi, Algoritma genetik, Siklus uap hasil pemisahan

ABSTRACT. Geothermal development is carried out by increasing the efficiency of existing generators. In this study, geothermal development at the Lahendong Unit-2 geothermal power plant is carried out by conducting exergy analysis and optimizing geothermal plant efficiency using a genetic algorithm by adjusting the pressure on the separator. Exergy calculations and optimization of genetic algorithms, using the Python programming language with the help of libraries such as PyXSteam, Pandas, Numpy, matplotlib, random, and time. Exergy flow and efficiency are calculated on the components of the separator, turbine, condenser, cooling tower, and the entire plant. The amount of exergy that enters the generator from geothermal fluids is 28882.73 kW. The amount of exergy that comes in produces an output power of 13,000 kW with an overall efficiency of the generator is 45.010%, and the amount of exergy from brine is 1794.11 kW. Optimization using the genetic algorithm method produces the most optimal output power value of 13035,480445 kW at a separator pressure of 10.4025 bar. The increased quality of the steam generates this increase in power so that the mass flow rate of the steam that rotates the turbine becomes more than before.

Keywords: Lahendong geothermal field, Exergy analysis, Optimization, Genetic algorithm, Separated steam cycle

PENDAHULUAN

Potensi panas bumi di negara kepulauan Indonesia adalah kurang lebih 40% dari potensi panas bumi dunia. Menurut Badan Geologi ESDM, total sumber panas bumi adalah 27.000 MW (setara dengan 13 miliar barrel minyak), yang mana sepertiganya berada di Jawa dan Bali, yang terkenal dengan kebutuhan listrik yang tinggi (Darma, et al., 2020). Namun hingga tahun 2019, potensi yang baru

dimanfaatkan masih 2.130,6 MW, padahal pemanfaatan panas bumi ditargetkan oleh pemerintah untuk menjadi 7.241,5 MW di tahun 2025 (Humas EBTKE, 2020).

Beberapa upaya perlu dilakukan agar peningkatan pemanfaatan panas bumi bisa dipercepat. Pemerintah melakukan beberapa terobosan seperti lelang 5 wilayah kerja panas bumi pada tahun 2017, kegiatan eksplorasi dan produksi yang ditugaskan kepada Badan

Layanan Umum (BLU) dan Badan Usaha Milik Negara (BUMN) di daerah yang harga keekonomiannya masih belum masuk dan pelayanan investasi satu pintu di BKPM dalam memangkas birokrasi perizinan untuk kegiatan investasi di bidang panas bumi dengan mudah. Pemerintah juga memberi Penugasan Survei Pendahuluan dan Eksplorasi (PSPE) kepada Badan Usaha yang tertarik mengembangkan panas bumi di wilayah Indonesia Timur serta implementasi *Geothermal Fund* untuk menarik investor (Ferial, 2017).

Menurut Pambudi, et al., (2014) pengembangan panas bumi dapat dilakukan dengan dua cara: yaitu konstruksi dari pembangkit listrik yang baru dengan daerah yang baru dan peningkatan efisiensi termal dari pembangkit yang sudah ada. Peningkatan efisiensi termal ini bisa dilakukan dengan menggunakan analisis eksergi dan energi.

Dincer (2007) mengungkapkan bahwa analisis eksergi adalah metode yang menggunakan prinsip konservasi massa dan energi bersamaan dengan hukum ke-dua termodinamika untuk analisis, desain dan peningkatan energi dan sistem lain. Metode ini merupakan alat yang sangat berguna untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber energi dan identifikasi proses degradasi energi, yang mana memungkinkan lokasi, tipe serta besarnya kehilangan energi bisa di evaluasi.

Analisis eksergi pada setiap komponen pembangkit dan upaya optimasi untuk meningkatkan kinerja dari pembangkit perlu dilakukan juga di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Lahendong terlebih khusus unit-2.

Optimasi pada PLTP dapat dilakukan dengan berbagai macam cara, dan pada penelitian ini dilakukan dengan mendapatkan tekanan di separator, menggunakan *genetic algorithm* bahasa pemrograman *python*. Proses optimasi menghasilkan tekanan separator dengan daya keluaran yang paling optimal.

KAJIAN TEORI

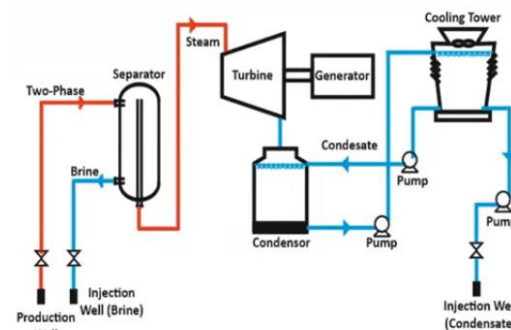
Lapangan dan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Lahendong

PLTP Lahendong merupakan pembangkit yang menggunakan fluida panas bumi untuk menghasilkan energi listrik di Sulawesi Utara dan sudah beroperasi sejak tahun 2001. Pada saat ini sudah terdapat 6 unit dengan 20 MW disumbangkan oleh masing-masing unit. PLTP

Lahendong sendiri tidak terlepas dari masalah degradasi energi, sehingga perlu dilakukan analisis eksergi.

PLTP Lahendong sendiri menggunakan siklus uap hasil pemisahan atau *separated steam cycle* dikarenakan fluida yang keluar dari sumur adalah dua fasa dominan cair. Fasilitas utama produksi uap secara garis besar yaitu sumur, kepala sumur, separator dan pipa alir permukaan. Komponen produksi listrik seperti turbin dan generator serta kondenser, *cooling tower* dan sumur injeksi yang mengembalikan fluida ke dalam bumi, juga merupakan bagian dari keseluruhan pembangkit.

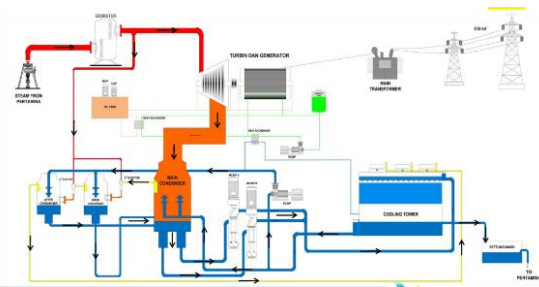
Pemanfaatan fluida panas bumi menjadi listrik menggunakan fluida fasa uap, sehingga fluida campuran dua fasa yang keluar dari sumur terlebih dahulu dipisahkan melalui separator (Saptadji, 2020). Fluida yang sampai ke turbin perlu diminimalisir kuantitas fluida fasa cairnya, dengan komponen seperti demister untuk meningkatkan kualitas uap hingga 100%. Aliran fasa uap yang telah dihasilkan dari separator akan memutar turbin dan lalu diinjeksikan kembali ke bawah permukaan seperti pada gambar 1



Gambar 1. Skema diagram siklus uap hasil pemisahan (Saptadji, 2020)

Skema ekonomi pada PLTP Lahendong Unit-2 adalah *steam sales contract*, di mana PT. Pertamina Geothermal Energy Area Lahendong sebagai pemilik WKP menjual uap kepada pihak PT. PLN Persero, mulai beroperasi secara komersial pada Juni 2007 dan memiliki jam kerja 113.808,99 *hour* sampai Agustus 2020. Aliran uap rata-rata unit-2 adalah 150 *ton/hour* dengan kadar NCG $\leq 1\%$ dan kadar silika ≤ 5 *ppm*. Pembangkit Unit-2 ini beroperasi dengan sumber uap dari sumur LHD-8, LHD-11, LHD-17 dan LHD-18 yang dimiliki oleh PT. PGE Area Lahendong (PT. PLN Persero,

2020). *Synoptic diagram* PLTP Lahendong dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. *Synoptic diagram* PLTP Lahendong (PT. PLN Persero, 2020)

Fluida dua fasa dominasi cair dari *reservoir* terlebih dahulu melewati kepala sumur sebelum dipisahkan di separator. Separator bertugas untuk memisahkan fluida fasa uap yang digunakan untuk memutar turbin uap dan fluida fasa cair yang diinjeksikan kembali di dekat *reservoir* agar tidak terjadi kerusakan *reservoir*. Di kepala sumur diketahui laju alir massa fraksi uap fluida, sehingga (Saptadji, 2020):

$$h_{wh} = h_{fwh} + x_{wh}(h_{gwh} - h_{fwh}) \quad (1)$$

$$h_1 = h_{wh} = h_{fwh} + x_1(h_{g1} - h_{f1}) \quad (2)$$

Dimana *wh* dan angka 1 merepresentasikan keadaan di kepala sumur dan separator, *h* adalah entalpi fluida, *h_f* merupakan entalpi fasa cair, *h_g* merupakan entalpi fasa uap dan *x* adalah fraksi uap, yang mana *x_{wh}* adalah fraksi uap yang diketahui pada kepala sumur. Proses isentalpik terjadi di sepanjang kepala sumur dan separator sehingga *h_{wh}* = *h₁*. Dari persamaan 2.12 dan 2.13 dapat diketahui fraksi uap yang menuju turbin dari separator (Saptadji, 2020).

Fluida sumur yang berupa campuran dua fasa, dipisahkan melalui proses pemisahan di separator (Pambudi et al., 2014). Fluida berfasa cair diinjeksikan kembali ke *reservoir* menggunakan sumur injeksi, sedangkan fluida berfasa uap diteruskan ke fasilitas produksi listrik, untuk menghasilkan daya keluaran dari generator. Perhitungan *dryness* dari uap pada sebuah separator dapat ditentukan dengan mengasumsikan fase tunggal air pada *reservoir* pada temperatur spesifik. Fraksi kekeringan pada separator dihitung dengan persamaan

$$X_2 = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_3} \quad (3)$$

Di mana *X₁* adalah fraksi kekeringan, *h₁* adalah entalpi fluida pada *inlet* separator, *h₂* adalah entalpi uap dari *outlet* separator, *h₃* adalah entalpi dari *brine*. Entalpi uap ditentukan

dengan sifat dari tekanan separator dibawah kondisi uap jenuh (Pambudi et al., 2014).

Fluida fasa uap dari separator diarahkan ke demister untuk menangkap butiran-butiran cair pada uap, sehingga uap yang memiliki nilai fraksi 100% masuk di turbin. Turbin dengan skema *condensed unit turbine*, berputar pada porosnya menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Uap dari turbin mengalami proses termodinamika, dimana uap yang volumenya mengisi ruangan kondenser, menyusut dikarenakan kontak dengan air pendingin dari *cooling tower*. Hal ini mengakibatkan kondisi ruangan kondenser menjadi vakum (Saptadji, 2020).

Entalpi inlet turbin (*h₄* = *h_{g4}*) dan entropi inlet turbin (*s₄* = *s_{g4}*) didapatkan pada tekanan dan temperatur kondisi turbin dari tabel uap. Entropi pada titik *inlet* (4) dan *outlet* turbin (5) mengalami proses isentropik, sehingga (Saptadji, 2020):

$$s_5 = s_4 = s_{f5} + x_5(s_{g5} - s_{f5}) \quad (4)$$

Fraksi uap yang keluar dari turbin (*x₅*) didapatkan dari persamaan 2.14, lalu digunakan untuk menghitung entalpi outlet turbin (*h₅*) pada persamaan 5

$$h_5 = h_{f5} + x_5(h_{g5} - h_{f5}) \quad (5)$$

Daya turbin uap dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Saptadji, 2020):

$$W = \dot{m}x_5\eta(h_4 - h_5) \quad (6)$$

Dimana *W* adalah daya yang dihasilkan turbin dalam satuan kW dan *η* adalah efisiensi turbin dengan nilai 0,85 menurut DiPippo (2012).

Eksergi

Sebuah sistem menyediakan kerja maksimum yang mungkin sebagaimana proses reversibel dari keadaan mula khusus ke keadaan dari lingkungannya. Hal ini menggambarkan potensial kerja yang berguna dari sebuah keadaan sistem dan disebut dengan Eksergi. Eksergi menggambarkan batas atas sejumlah usaha dari sebuah alat yang bisa dihasilkan tanpa melanggar hukum termodinamika. Maka dari itu selalu ada perbedaan, kecil maupun besar, diantara eksergi maupun usaha aktual yang dihasilkan. Eksergi sebuah sistem pada sebuah keadaan bergantung pada kondisi lingkungan sebagaimana ciri-ciri dari sistem. Sehingga ciri-ciri dari eksergi adalah kombinasi dari sistem dan lingkungan, bukan hanya terbatas pada sistem saja (Cengel et al., 2019).

Cengel di dalam Pambudi et al., (2014) menyebutkan bahwa persamaan eksergi dapat dinyatakan melalui

$$\dot{X}_i = \dot{m}_i[(h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o)] \quad (7)$$

dimana $\dot{X}_i$ adalah eksergi pada aliran i , $\dot{m}_i$ adalah aliran massa rata-rata pada aliran i , h_i adalah entalpi spesifik pada aliran i , h_o adalah entalpi keadaan lingkungan, s_i adalah entropi spesifik pada aliran i , s_o adalah entropi spesifik pada keadaan lingkungan. Persamaan ini dapat dilakukan pada sejumlah eksergi di bagian pembangkit. Dari perhitungan sejumlah eksergi, dapat dihitung pula eksergi *destruction* sehingga hasilnya bisa meningkatkan sistem termal untuk mencapai kondisi optimal.

Mengevaluasi performa pembangkit relatif dari eksergi, dapat menggunakan prinsip efisiensi hukum kedua. DiPippo (2012) menuliskan bahwa hukum kedua efisiensi bisa didefinisikan dengan pendekatan “paksaan” dan “kegunaan”. Pendekatan paksaan ini dilakukan sebagai rasio dari penjumlahan semua *output* eksergi yang diinginkan terhadap jumlah *input* eksergi yang diperlukan.

$$\eta = \frac{\sum \dot{X}_{out}}{\sum \dot{X}_{in}} \quad (8)$$

dimana $\sum \dot{X}_{out}$ adalah total eksergi *output* yang diinginkan dan $\sum \dot{X}_{in}$ adalah eksergi *input* yang diperlukan. Komponen pada setiap pembangkit mempunyai sejumlah *input* dan *output* eksergi, dan sejumlah komponen tersebut dijumlahkan pada persamaan 8. Sebagai contoh pada demister, eksergi *input* yang dibutuhkan datang dari sumur produksi dalam bentuk fluida campuran dua fasa uap dan air, sedangkan *output* eksergi yang diinginkan dihitung pada uap dan *brine* yang keluar dari demister.

Pendekatan efisiensi eksergi berdasarkan pendekatan fungsional membagi eksergi *output* yang diharapkan terhadap eksergi *input* yang dibutuhkan dalam proses. Seluruh proses pembangkit menggunakan definisi ini yang mana menggunakan poros kerja dari *output* eksergi yang diinginkan. Hal ini dapat diekspresikan melalui persamaan (Pambudi et al., 2014):

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{X}_{in}} \quad (9)$$

dimana $\dot{X}_{in}$ adalah total eksergi yang masuk pada pembangkit dan $\dot{W}_{net}$ adalah daya produksi oleh pembangkit. Eksergi yang masuk pada sistem bisa dihitung melalui informasi dari sifat fluida pada *wellhead* sumur produksi.

Optimasi Algoritma Genetik

Menurut Mallawaarachchi (2017), *Genetic Algorithm* atau bisa disebut dengan algoritma genetik adalah metode pencarian heuristik yang memanfaatkan proses sebelum untuk mencari fungsi objektif, terinspirasi dari teori evolusi alam milik Charles Darwin. *Genetic Algorithm* mengadopsi konsep utama dimana individu yang bertahan hidup adalah individu yang paling unggul, sedangkan untuk individu yang punah adalah individu yang lemah.

Lima fase yang diperhatikan dalam *genetic algorithm* adalah: *Initial population*, *Fitness function*, *selection*, *crossover* dan *mutation*. Clarke et al. (2014) dalam penelitiannya mengungkapkan bahwa *genetic algorithm* memanfaatkan proses seleksi turnamen untuk penanganan batasan yang efisien sebagaimana disimulasi dari *binary crossover* dan parameter yang berbasis *mutation* operator. Berikut adalah penjelasan dari lima fase *genetic algorithm* (Mallawaarachchi, 2017):

a. Initial Population

Proses *genetic algorithm* dimulai dengan beberapa individu yang disebut *population*. Setiap individu adalah solusi dari permasalahan yang ingin diselesaikan, dengan membawa serangkaian parameter yang disebut *genes*. *Genes* atau gen bergabung dalam bentuk string membentuk *chromosome*.

b. Fitness function

Proses ini menentukan seberapa cocok sebuah individu atau dengan kata lain kemampuan sebuah individu untuk berkompetisi dengan individu yang lain

c. Selection

Ide dari fase *selection* adalah dengan memilih individu yang paling cocok dan membiarkan mereka mewariskan *genes* mereka kepada generasi selanjutnya. Pasangan individu (*parents*) yang memiliki kecocokan paling tinggi, memiliki peluang dipilih untuk reproduksi.

d. Crossover

Fase ini yang paling signifikan. Setiap pasangan *parents* yang dicocokkan, akan saling membagi *gene* mereka, dan menghasilkan individu yang baru.

e. Mutation

Mutation atau mutasi dapat terjadi pada beberapa gene dengan peluang acak yang

rendah, untuk menjaga keberagaman populasi.

METODE PENELITIAN

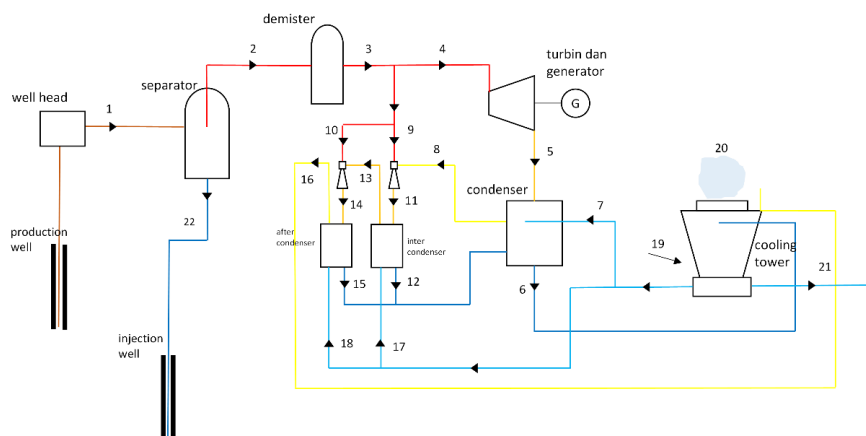
Penelitian dilaksanakan di lokasi Fasilitas Produksi Listrik milik PT. PLN Persero, ULPLTP Lahendong Unit-2 dengan koordinat 1.2537049, 124.8250753, 725. Penelitian menggunakan hasil rangkuman data PLTP pada tanggal 3 September 2020.

Pengolahan data dilakukan menggunakan bahasa pemrograman *Python* 3.9.2. Bahasa pemrograman *Python* diperlukan untuk mengolah beberapa parameter seperti laju alir massa, temperatur dan tekanan dengan persamaan yang ada untuk mendapatkan nilai eksgergi pada setiap *state*, efisiensi eksgergi setiap komponen dan keseluruhan pembangkit serta menjalankan optimasi algoritma genetik untuk daya keluaran yang maksimal. Bantuan beberapa *libraries* seperti *PyXSteam* untuk *steam properties* atau lebih dikenal dengan *steam table* yang dikembangkan oleh IAPWS-IF97 (Wagner & Kretzschmar, 2008) agar mendapatkan nilai entalpi dan entropi fluida, *Pandas* untuk menempatkan data dan hasil pengolahan menjadi file *excel* agar lebih mudah dilihat serta dianalisis, *Numpy* digunakan untuk mengolah data yang berbentuk *array* pada *running* algoritma genetik, *random* untuk menginisiasi individu awal pada algoritma genetik dan *Matplotlib* untuk membuat grafik dari nilai optimasi yang didapatkan dari hasil beberapa iterasi.

Visual Studio Code merupakan aplikasi *editor* yang digunakan untuk menulis *script* atau kumpulan kode bahasa pemrograman dalam hal ini yaitu *Python*. *Script* yang memuat semua data penelitian dan persamaan yang digunakan, ditulis serta dijalankan di aplikasi ini, sehingga lebih mudah dan meminimalisir *error* dalam penulisan *syntax* (tata bahasa pemrograman). Proses *debugging* (pencarian kesalahan) pada *script Python* juga dimudahkan.

Data parameter dan hasil perhitungan dari bahasa pemrograman *Python* menggunakan aplikasi *editor Visual Studio Code*, dimuat ke file dengan ekstensi *.xlsx*. File dari ekstensi ini, dibuka melalui aplikasi *Microsoft excel* sehingga hasil yang didapatkan lebih mudah dipahami karena langsung berbentuk tabel.

Variabel pada penelitian ini adalah eksgergi yang merupakan energi yang tersedia untuk digunakan memiliki satuan kW dan daya keluaran untuk capaian optimal dari pembangkit dengan satuan kW. Parameter untuk mendapatkan nilai eksgergi dengan menggunakan data tekanan (bar), temperatur (°C) dan laju alir (kg/s). Setiap *state* atau keadaan ditentukan dari pembangkit untuk setiap aliran fluida yang memungkinkan, entalpi fluida dua fasa yang masuk di pembangkit serta temperatur dan tekanan lingkungan sekitar pembangkit. Analisis *state* pada pembangkit dapat dilihat diagram skematik pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram skematik PLTP Lahendong

Nilai eksgergi untuk setiap *state* menggunakan persamaan 7. Selanjutnya dianalisis kehilangan eksgergi (selisih eksgergi masuk dan keluar) dan efisiensi eksgergi pada

setiap komponen utama pembangkit menggunakan persamaan 8 serta keseluruhan pembangkit menggunakan persamaan 9. Selanjutnya dari hasil eksgergi yang didapatkan,

dibuat diagram *Grassman* untuk memudahkan gambaran mengenai eksergi yang masuk pada sistem pembangkit dan kehilangannya. Dari hasil eksergi yang didapatkan, kemudian dioptimasi dengan metode *Genetic Algorithm*, di mana nilai batas atau *constraint*-nya tekanan separator didapatkan dari data desain untuk menghasilkan daya keluaran pada PLTP yang lebih optimal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis pada pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong dilakukan pada setiap *state* berdasarkan diagram skematik pada gambar 3. Data tekanan, temperatur dan laju alir dari setiap *state* diperoleh dari rangkuman data di *Logsheet* pembangkit. Data sumur didapatkan dari laporan Yani (2006) mengenai model numerik dari sistem geotermal Lahendong. Lingkungan pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong unit-2

disederhanakan dengan temperatur (T_0) dan tekanan (P_0) yang seragam. Data hasil rangkuman parameter dan perhitungan eksergi alir dari setiap *state* ditampilkan pada tabel 1.

Parameter penting dari *state* atau keadaan seperti laju alir, tekanan, temperatur, entalpi, entropi dan eksergi dirangkum pada tabel 1. Kondisi keadaan lingkungan atau keadaan 0 yaitu temperatur 23 °C dan tekanan udara 0,85 bar untuk ketinggian 850 meter di atas permukaan laut. Kualitas uap pada keadaan pada kepala sumur adalah 0,695 didapatkan perbandingan dari jumlah *flow* dua fasa dari sumur produksi milik PT. PGE dengan *flow* yang masuk ke Demister milik PT. PLN ULPTP. Keadaan 1 yaitu pada bagian separator, diperoleh dari perhitungan jumlah uap yang masuk ke Demister dan anggapan bahwa proses isentalpik terdapat pada sumur produksi hingga separator.

Tabel 1 Hasil rangkuman parameter dan perhitungan eksergi alir

State	Mass flow m (kg/s)	Tekanan P (bara)	Temperatur T (degC)	Entalpi h (kJ/kg)	Entropi s (kJ/kg K)	Eksergi alir Xi (kW)
0		0,85	23	96,55	0,34	
1	45,36	10,60	182,43	2201,30	5,30	28882,73
2	32,20	10,60	182,43	2779,31	6,56	27015,86
3	32,20	8,50	172,94	2770,76	6,64	26016,02
4	23,67	8,50	172,94	2770,76	6,64	19121,77
5	23,67	0,13	50	2129,32	6,64	3940,79
6	973,12		47	196,80	0,66	3680,94
7	900,40		28	117,38	0,41	83,84
8	0,59		47	2122,07	6,68	87,63
9	4,27	8,60	173,43	2771,23	6,64	3454,18
10	4,27	8,50	172,94	2770,76	6,64	3447,12
11	4,86	0,60		2207,60	6,29	1693,02
12	22,37		37	155,00	0,53	28,23
13	2,72	1,40	50	2128,78	6,64	449,54
14	6,92	0,62		2209,40	6,28	2438,27
15	26,18		45	188,44	0,64	83,22
16	0,98	0,78	45	2582,45	8,16	164,67
17	20,23		28	117,38	0,41	1,88
18	20,23		28	117,38	0,41	1,88
19	2,40	0,85	23	96,55	0,34	0,00
20	0,15	0,85		2667,82	7,41	72,86
21	32,20		28	117,38	0,41	3,00
22	13,07	10,60	182,43	773,95	2,16	1794,11

Laju alir massa mempengaruhi besarnya nilai eksergi alir pada keadaan tersebut. Eksergi yang masuk pada pembangkit yaitu 28882,73 kW pada keadaan 1 dari sumur produksi menuju ke komponen separator. Eksergi yang masuk pada keadaan 1 ini merupakan campuran fluida dua fasa dari sumur. Nilai eksergi alir pada keadaan ini besar dikarenakan nilai laju alir massa total dua fasa yang besar sebelum dipisahkan oleh separator menjadi fasa uap untuk memutar turbin dan fasa cair untuk diinjeksikan kembali.

Hasil dari perhitungan eksergi alir pada tabel 1 digunakan untuk perhitungan efisiensi eksergi dan kehilangan eksergi dari setiap komponen. Perhitungan efisiensi eksergi didapatkan dari perbandingan antara eksergi alir yang keluar pada komponen terhadap eksergi alir yang masuk. Kehilangan eksergi didapatkan melalui perhitungan selisih antara eksergi alir yang masuk pada komponen dan eksergi alir yang keluar pada komponen. Hasil perhitungan efisiensi eksergi dan kehilangan eksergi dirangkum pada tabel 2

Tabel 2. Perhitungan efisiensi eksergi dan kehilangan eksergi

Komponen	Eksergi masuk $\dot{X}_{in} (kW)$	Eksergi Keluar $\dot{X}_{out} (kW)$	Kehilangan Eksergi $\dot{X}_{loss} (kW)$	Efisiensi Eksergi $\eta (\%)$
Separator	28882,73	28809,96	72,77	99,748
Demister	27015,86	26016,02	999,84	96,299
Turbin-Generator	19121,77	16940,79	2180,99	88,594
Kondenser	4136,08	3768,57	367,51	91,115
Inter-Kondenser	1694,91	477,77	1217,13	28,189
After-Kondenser	2440,15	247,89	2192,26	10,159
Cooling Tower	3680,94	163,47	3517,47	4,441
Keseluruhan pembangkit	28882,73	13000,00	10547,97	45,010

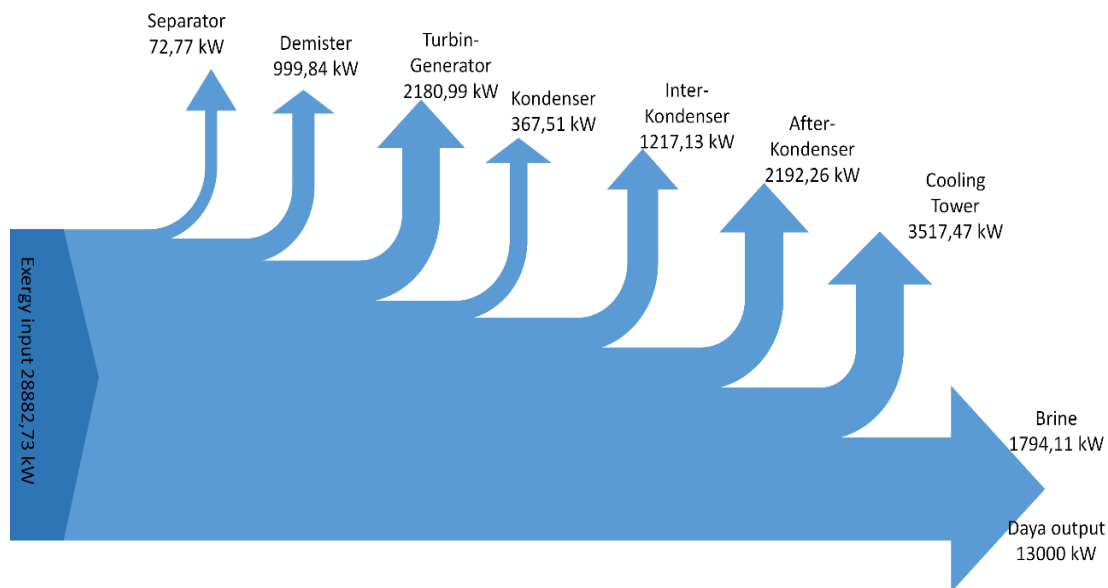
Nilai kehilangan eksergi dan efisiensi eksergi pembangkit berdasarkan tabel 4.2 pada setiap komponen cukup beragam. Nilai kehilangan eksergi memiliki nilai paling rendah pada separator yaitu 72,77 kW (99,748%), sedangkan nilai paling tinggi terdapat pada cooling tower yaitu 3517,47 kW (4,441%). Total kehilangan eksergi pada pembangkit dari setiap komponen adalah 10547,97 kW.

Efisiensi eksergi bernilai tinggi pada bagian separator, demister, turbin-generator dan kondenser sedangkan nilai efisiensi eksergi rendah terdapat pada komponen inter-kondenser, after-kondenser dan cooling tower. Menurut Adhitya (2017), proses ekspansi pada komponen turbin menghasilkan nilai efisiensi eksergi turbin yang tinggi. Menurut Nikulshin et al. (di dalam Yildirim et al., 2004), perbedaan temperatur yang besar dan kandungan NCG (*Non condensable gas*) pada komponen cooling tower, condenser, intercondenser dan aftercondenser, membuat efisiensi eksergi komponene tersebut menjadi rendah.

Perhitungan efisiensi eksergi keseluruhan pembangkit menggunakan persamaan 9, mendapatkan nilai 45,010%. Aliran eksergi masuk pada pembangkit adalah 28882,73 kW

dengan daya produksi pembangkit yaitu 13000 kW sesuai data yang didapatkan dari pembangkit. Diagram Grassman pada gambar 4 memudahkan gambaran mengenai aliran eksergi yang masuk dan hilang pada pembangkit.

Penelitian sebelumnya oleh Pambudi et al. (2014) di lokasi panas bumi Dieng, mendapatkan hasil yang sama untuk efisiensi eksergi yang relatif tinggi pada komponen separator (86,50%) dan scrubber (99,63%). Nilai efisiensi eksergi yang relatif rendah terdapat pada intercondenser (32,81%), aftercooler (26,58%) dan cooling tower (53,50%). Keseluruhan pembangkit mendapatkan nilai 36,48% efisiensi eksergi, dengan eksergi masuk sebesar 59,52 MW dan hasil keluaran daya sebesar 21,71 MW. Nilai efisiensi eksergi yang tinggi juga didapatkan pada komponen demister (97,71%) dan steam receiving header (95,52%) dari penelitian yang dilakukan oleh Adiprana et al. (2015). Nilai efisiensi eksergi rendah terdapat pada intercondenser (32,70%) dan untuk keseluruhan pembangkit mendapatkan nilai efisiensi 57,62%.

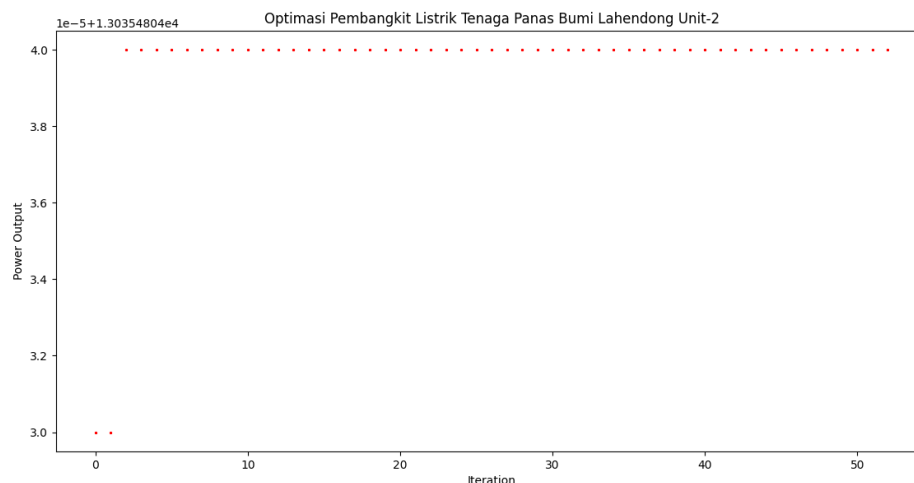


Gambar 5 Diagram Grassman

Optimasi *Separated Steam Cycle* Metode Algoritma Genetik

Daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong unit 2 adalah 13000 kW pada tekanan separator 10,6 bar. Untuk daya keluaran pembangkit yang optimal, pengaturan tekanan separator menjadi parameter penting untuk fluida yang masuk pada pembangkit. Nilai entalpi fluida dan kualitas uap merupakan fungsi dari tekanan separator, menjadi kalor masuk pada turbin untuk menghasilkan daya keluaran dari generator.

Optimasi dengan pengaturan tekanan separator pada rentang 10,05 hingga 11,05 bar, mengasumsi bahwa separator akan bekerja maksimal pada rentang tekanan tersebut. Nilai optimum dari hasil daya keluaran pembangkit listrik tenaga panas bumi Lahendong unit-2 pada pemrograman *Python* menggunakan algoritma genetik ditunjukkan pada gambar 6



Gambar 6 Nilai optimasi daya keluaran dalam 50 iterasi

Nilai optimum daya keluaran PLTP Lahendong Unit 2 didapatkan pada nilai 13035,480445 kW pada tekanan 10,4025 bar di separator yang didapatkan pada generasi atau iterasi ke-6

hingga iterasi ke-50 *running* algoritma genetik. Iterasi pertama hingga ke-5 masih menghasilkan daya keluaran yang beragam dan masih belum optimum, hingga pada iterasi ke-

6 didapatkan hasil daya keluaran yang optimum. Perubahan sebelum dan sesudah optimasi dirangkum pada tabel 3

Tabel 3 Perbandingan sebelum dan sesudah optimasi

	Sebelum Optimasi	Sesudah Optimasi
Tekanan (bara)	10,6	10,4025
Kualitas uap	0,71177	0,71254
Laju alir (kg/s)	32,2	32,3822
Daya keluaran (kW)	13000	13035,480445

Terdapat kenaikan sebesar 35,480445 kW pada pembangkit sesudah dilakukannya optimasi. Hal ini dikarenakan kualitas uap naik menjadi 0,71254 pada saat tekanan separator diturunkan pada 10,4025 bar. Hal ini berarti laju alir uap yang memutar turbin menjadi lebih banyak dibandingkan sebelumnya.

Hasil ini juga didukung oleh optimasi pada pembangkit listrik tenaga panas bumi Dieng siklus *single-flash* oleh Pambudi et al. (2014). Tekanan separator di lapangan Dieng yang sebelumnya 10 bar, menjadi 9 bar dan menghasilkan 21,73 MW yang sebelumnya adalah 21,71 MW. Peningkatan daya ini dihasilkan oleh kualitas uap yang naik sebesar 32,39%, yang mana adalah 2,24% dari kondisi awal.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, bisa disimpulkan bahwa:

1. Berdasarkan analisis eksergi yang dilakukan pada pembangkit, didapatkan bahwa eksergi yang masuk pada pembangkit adalah 28882,73 kW. Komponen yang memiliki efisiensi eksergi tinggi terdapat pada separator (99,748%), demister (96,299%), turbin-generator (88,594%) dan kondenser (91,115%). Komponen dengan efisiensi eksergi rendah terdapat pada *inter-kondenser* (28,119%), *after-kondenser* (10,159%), dan *cooling tower* (4,441%). Efisiensi eksergi keseluruhan pembangkit adalah 45,010%.
2. Optimasi menggunakan algoritma genetik pada pemrograman python, menghasilkan nilai daya keluaran pembangkit yang sebelumnya 13000 kW menjadi 13035,480445 kW pada tekanan separator

10,4025 bar. Peningkatan daya ini dikarenakan oleh peningkatan kualitas uap dan laju alir massa uap yang memutar turbin.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhitya, M. B. (2017). *Optimasi Proses Produksi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Jenis Single-Flash dengan Metode Genetic Algorithm*. Surabaya: Departemen Teknik Fisika - Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Adiprana, R., Purnomo, D. S., & Lubis, I. E. (2015). Kamojang Geothermal Power Plant Unit 1-2-3 Evaluation and Optimization Based on. *Proceedings World Geothermal Congress*, (pp. 19-25). Melbourne.
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoglu, M. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. New York: McGraw-Hill Education.
- Clarke, J., McLay, L., & McLeskey Jr., J. T. (2014). Comparison of genetic algorithm to particle swarm for constrained. *Advanced Engineering Informatics*, 81-90.
- Darma, S., Harsoprayitno, S., Setiawan, B., Hadyanto, Sukhyar, R., Soedibjo, A. W., . . . Stimac, J. (2020). Geothermal Energy Update: Geothermal Energy Development and Utilization in Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress*, (pp. 1-13). Bali.
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2007). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Oxford: Elsevier.
- DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants*. Oxford: Elsevier.
- Ferial. (2017, April 18). *Percepat Pengembangan Panas Bumi, Pemerintah Luncurkan 5 Upaya Terobosan*. Retrieved from Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE): <https://ebtke.esdm.go.id/post/2017/04/18/1629/percepat.pengembangan.panas.bumi.pemerintah.luncurkan.5.upaya.terobosan>
- Humas EBTKE. (2020, March 26). *Potensi Besar Belum Termanfaatkan, 46 Proyek Panas Bumi Siap Dijalankan*. Retrieved from Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi: <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/03/27/2518/potensi.besar.belum.termanfaatkan.46.proyek.panas.bumi.siap.dijalankan>
- Mallawaarachchi, V. (2017, July 8). *Introduction to Genetic Algorithms — Including Example Code*. Retrieved April 4, 2021, from towards data science: <https://towardsdatascience.com/introduction-to-genetic-algorithms-including-example-code-e396e98d8bf3#:~:text=A%20genetic%20algo>

- rithm%20is%20a,offspring%20of%20the%20next%20generation.
- Pambudi, N. A., Itoi, R., Jalilinasrabad, S., & Jaelani, K. (2014). Exergy analysis and optimization of Dieng single-flash geothermal. *Energy Conversion and Management*, 405-411.
- PT. PLN Persero. (2020). Overview ULPLTP Lahendong. Tomohon, Sulawesi Utara.
- Saptadji, N. M. (2020). *Teknik Geothermal*. Bandung: Institut Teknologi Bandung Press.
- Wagner, W., & Kretzschmar, H.-J. (2008). *International Steam Tables* (2nd ed.). Berlin: Springer.
- Yani, A. (2006). *Numerical Modelling of Lahendong Geothermal System, Indonesia*. Reykjavik: GEOTHERMAL TRAINING PROGRAMME - The United Nations University.