

JRL	Vol.7	No.2	Hal. 115 - 125	Jakarta, Juli 2011	ISSN : 2085.3866 No.376/AU1/P2MBI/07/2011
-----	-------	------	----------------	-----------------------	--

## ANALISA EKSERGI PLTP KAMOJANG 68 KAPASITAS 3 MW

**Amiral Aziz**

Peneliti Konversi dan Konservasi Energi dan Team Panas Bumi BPPT  
Gedung II BPPT lantai 20 Jl. M. H. Thamrin 8 Jakarta 10340  
amiralazis@yahoo.com

### Abstrak

Pentingnya analisa eksergi dalam evaluasi kinerja pembangkit listrik tenaga panas bumi telah terbukti. Dari analisa eksergi yang telah dilakukan untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi dapat diketahui lokasi dan jumlah kerugian eksergi, limbah dan penghancuran eksergi dalam proses yang berbeda telah diindikasikan. Hasil analisa memperlihatkan bahwa eksergi total yang tersedia dari sumur produksi KMJ 68 adalah 6967.55 kW. Total eksergi yang diterima separator adalah 6337,91 dimana 5808,8 kW dalam bentuk uap dihasilkan dari separator dan 67,92 kW merupakan limbah cair dalam bentuk garam (brine). Efisiensi eksergi keseluruhan dari PLTP KMJ 68 adalah 43,06 % dan efisiensi energi keseluruhan dari PLTP KMJ 68 adalah 13,05 %. Keduanya dihitung dengan acuan eksergi fluida pada kepala sumur KMJ 68

**kata kunci:** eksergi,irreversibilitas, pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP), KMJ 68

## EXERGY ANALYSIS OF GEOTHERMAL POWER PLANT KAMOJANG 68, 3 MW IN CAPACITY

### Abstract

*The importance of exergy analysis in preliminary design of geothermal power has been proven. An exergy analysis was carried out and the locations and quantities of exergy losses, wastes and destructions in the different processes of the plan were pinpointed. The obtained results show that the total exergy available from production wells KMJ 68 was calculated to be 6967.55 kW. The total exergy received from wells which is connected during the analysis and enter into the separator was found to be 6337.91 kW in which 5808.8 kW is contained in the steam phase. The overall exergy efficiency for the power plant is 43.06% and the overall energy efficiency is 13.05 %, in both cases with respect to the exergy from the connected wells. The parts of the system with largest exergy destruction are the condenser, the turbine, and the disposed waste brine*

**keywords:** exergy, irreversibility, geothermal power plant, KMJ 68

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah salah satu negara yang memiliki sumber energi terbarukan yang sangat berlimpah, mulai dari keberadaan Indonesia di daerah garis katulistiwa sehingga mampu mendapatkan intensitas cahaya yang sangat besar. Indonesia juga memiliki potensi yang sangat besar untuk memanfaatkan energi panas bumi atau geothermal. Energi panas bumi merupakan energi yang diambil dari panas yang tersimpan di bumi akibat dari aktivitas tektonik. Panas bumi merupakan pilihan energi yang tepat bagi Indonesia karena;

- Terbarukan
- Densitas energinya yang tinggi.
- Ketersediaannya yang terus kontinu
- Mengurangi gas rumah kaca.
- Tidak dapat diekspor
- Cadangannya yang sangat berlimpah di Indonesia

Karena pertumbuhan permintaan tenaga listrik di Indonesia yang meningkat dengan cepat, maka pemerintah mengeluarkan dua program percepatan pembangunan pembangkit tenaga listrik (*Crash Programs*). Program percepatan tahap pertama yaitu membangun pembangkit listrik berbasis batubara dengan total kapasitas 10.000 MW. Program percepatan tahap kedua yang akan direalisasikan pada periode 2009-2014, terdiri dari lebih dari 60% kapasitas baru dari sumber daya yang terbarukan, khususnya sekitar 5.000 MW atau 48% dari sumber daya Panas Bumi dan 12% dari sumber daya Hydro. Program percepatan kedua juga bertujuan untuk meningkatkan akses masyarakat terhadap tenaga listrik di luar pulau Jawa dan Bali.

Salah satu program pengembangan tenaga panas bumi adalah proyek pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi berkapasitas 3 MW yang menggunakan sumur Kamojang 68 (KMJ 68) sebagai sumber energinya. Proyek ini merupakan kerjasama antara BPPT dan Pertamina.

Tulisan ini menampilkan beberapa hasil analisa eksergi yang telah dilakukan pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas bumi KMJ 68 berkapasitas 3 MW yang bertujuan untuk mengidentifikasi lokasi dan proses bila terjadi kerugian, kehilangan dan kerusakan eksergi serta menyarankan langkah-langkah yang dapat diambil untuk mengurangi kerugian eksergi.

### 1.2 Diskripsi PLTP KMJ 68

Lokasi pembangkit listrik berada di wilayah sekitar pengembangan sumur KMJ-68 dengan jarak dari sumur KMJ-68 ke pembangkit sekitar 50 meter menuju arah barat daya, koordinat pembangkit secara geografis terletak pada 158° 43' 60" BT. Gambar 1 memperlihatkan situasi sumur Kamojang dan sumur reinjeksi.



Gambar 1. Gambar situasi sumur Kamojang

Air kondensat yang akan diinjeksikan adalah kurang lebih 20% dari jumlah uap yang masuk ke turbin dimana air ini disalurkan ke sumur KMJ-21 yang berlokasi kurang lebih 1.3 km sebelah barat laut pembangkit.

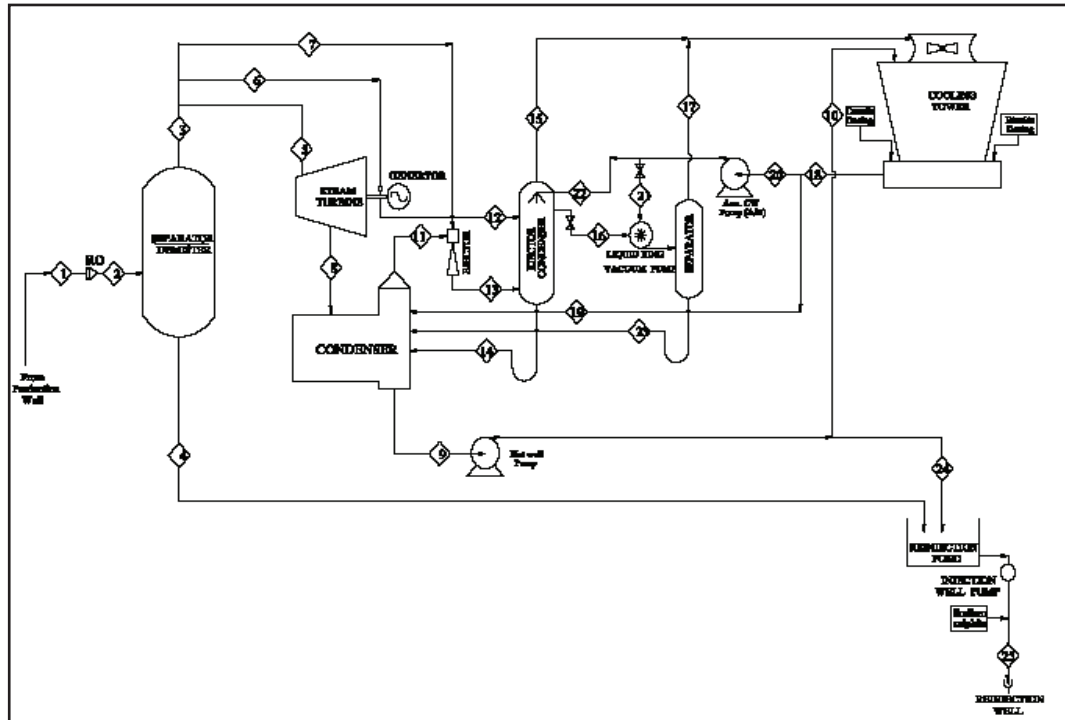
Gambar 2 memperlihatkan diagram alir PLTP KMJ 68. Fluida dari sumur KMJ 68 dialirkan kedalam separator dimana sebelumnya tekanan diturunkan dari tekanan pada kepala sumur 12 bar menjadi 6,5 bar di separator dengan menggunakan "pressure regulator valve". Pada separator, uap dan air dipisahkan, uap panas bumi kemudian

sebagian besar diekspansikan melalui turbin dan sebagian dialirkan ke *steam ejector* dan *gland condenser*.

Setelah diekspansi di dalam turbin, uap dikondensasi oleh air pendingin di

removal yang digunakan adalah kombinasi dari *steam jet ejector* dan *liquid ring vacuum pump* (LRVP).

Karakteristik fluida dari sumur Kamojang 68 diberikan pada tabel 1.



Gambar 2. Diagram alir PLTP KMJ 68

Tabel 1. Karakteristik utama fluida KMJ 68

dalam kondensator, sementara NCG (*Non Condensing Gas*) tetap dalam kondisi gas.

Akumulasi dari NCG di dalam kondensator menyebabkan tekanan kondensator naik, yang pada gilirannya mengurangi daya *output* dari turbin. Untuk menjaga tekanan kondensator tetap rendah, NCG harus dikeluarkan secara terus menerus dari kondensator dengan menggunakan *gas removal system*.

Dengan demikian *gas removal system* merupakan peralatan penting pada sistem PLTP, karena berfungsi untuk mempertahankan kondisi vakum di dalam kondensator dengan cara mengeluarkan NCG dari kondensator dan membuangnya langsung ke atmosfer. Pada sistem PLTP KMJ 68, gas

Parameter	Unit	Value
Mean well head pressure (WHP)	Bar -a	14.7
Mean well head temperature (WHP)	°C	197
pH		4.71–4.90
H <sub>2</sub> S	ppm	47.58–62.2
HCO <sub>3</sub>	ppm	15.08–22.99
Cl	ppm	< 0.001
SO <sub>4</sub>	ppm	0.17 – 0.33
HBO <sub>2</sub>	ppm	0.36 – 0.94
SiO <sub>2</sub>	ppm	0.52 – 1.04
NCG	(% mass )	0.34 – 0.47

## 1.2 Tujuan Studi

Studi ini bertujuan untuk menentukan efisiensi eksergi PLTP KMJ 68 dan mengidentifikasi lokasi dan proses bila terjadi kerugian, kehilangan dan kerusakan eksergi serta menyarankan langkah-langkah yang dapat diambil untuk mengurangi kerugian eksergi.

## II. METODOLOGI

Sistem PLTP KMJ 68 ini disederhanakan menjadi volume kontrol yang menggambarkan aliran eksergi masuk dan aliran eksergi keluar untuk setiap aliran proses yang berbeda. Proses diasumsikan dalam keadaan tunak (*steady state*). *Output* eksergi yang diinginkan (*Output Kerja bersih*) dibandingkan dengan eksergi input yang diperlukan (Efisiensi rasional). Tata letak proyek telah dirancang dan dilengkapi dengan skematik diagram alir untuk sistem total dan setiap subsistem (proses). Data yang relevan diperoleh dan diproses dengan menggunakan *spread sheet Excel*.

Persamaan untuk analisis setiap subsistem berasal dari model yang dibuat dengan bantuan *Engineering Equation Solver (EES) Software*. Dengan memasukkan data-data lapangan, spesifikasi peralatan dan parameter perancangan, kesetimbangan eksergi dan evaluasi kinerja setiap sub sistem dan sistem keseluruhan dilakukan. Sebagai referensi digunakan parameter lingkungan lokal di Kamojang Kabupaten Garut Jawa Barat.

Asumsi yang dibuat dalam analisa eksergi PLTP KMJ 68 ini adalah :

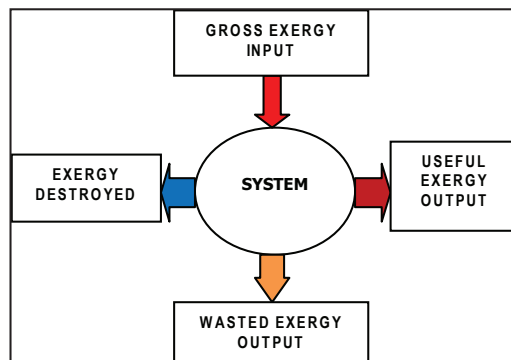
- NCG (*Non Condensable Gases*) dianggap sebagai CO<sub>2</sub> murni dan diasumsikan 0,017 % dari laju aliran massa uap.
- Fluida panas bumi diasumsikan mempunyai sifat yang sama dengan air murni.
- Sistem dan proses diaproksimasi sebagai volume kontrol dalam keadaan tunak.

- Penurunan tekanan pada setiap proses diabaikan.
- Eksergi kinetik, potensial dan kimia diabaikan.

## III. ANALISA TEORITIS

### 3.1 Konsep Dasar Analisa Eksergi

Gambar 3 menggambarkan aliran eksergi melalui sistem atau proses. Salah satu kegunaan utama dari konsep eksergi adalah keseimbangan eksergi dalam analisis sistem termal. Keseimbangan eksergi (analisis eksergi) dapat dipandang sebagai pernyataan hukum energi degradasi. Evaluasi yang teliti terhadap proses termal dengan menggunakan analisis eksergi memungkinkan identifikasi sumber inefisiensi dan limbah yang menyebabkan perbaikan desain dan penghematan yang dihasilkan. Analisis eksergi adalah alat untuk identifikasi jenis, lokasi dan besarnya kerugian termal. Identifikasi dan kualifikasi kerugian ini memungkinkan untuk evaluasi dan perbaikan desain sistem termal.



Gambar 3. Aliran eksergi melalui sistem

Dengan metode analisis eksergi, dapat menunjukkan kualitas dan kuantitas kerugian panas dan lokasi degradasi energi (mengukur dan mengidentifikasi penyebab degradasi energi). Sebagian besar kasus ketidak sempurnaan termodinamika tidak dapat dideteksi dengan analisis energi. Proses tertentu seperti *throttling*, transfer panas, ekspansi dan gesekan tidak termasuk

kerugian energi tetapi mereka menurunkan kualitas energi dan kemampuannya untuk melakukan kerja dan oleh karena itu termasuk kerugian eksergi

### 3.2 Persamaan Keseimbangan Eksergi

Untuk aliran materi, total aliran eksergi, dapat dinyatakan sebagai:

$$E_{total} = E_{KE} + E_{PE} + E_{PH} + E_{CH} \dots\dots\dots(1)$$

dimana :

- $E_{KE}$  = eksergi kinetik
- $E_{PE}$  = eksergi potensial
- $E_{PH}$  = eksergi fisika
- $E_{CH}$  = eksergi kimia

Eksergi kinetik dan potensial merupakan energi dengan kualitas tinggi dan sepenuhnya dikonversi menjadi kerja, sementara eksergi fisika dan kimia merupakan energi yang berkualitas rendah di mana aliran fluida, harus menjalani proses fisika dan kimia selama berinteraksi dengan lingkungan. Untuk studi ini, hanya eksergi fisika yang harus dipertimbangkan karena komposisi kimia dari fluida dalam aliran tetap (Rosen, 1999).

Oleh karena itu, eksergi dinyatakan sama dengan kerja maksimal yang dihasilkan apabila aliran suatu zat diubah dari keadaan awal ke keadaan lingkungan yang didefinisikan oleh  $p_0$  dan  $T_0$  melalui suatu proses fisika dimana hanya terjadi interaksi termal antara sistem dengan lingkungan (Kotas, 1995), sehingga persamaan (1) dapat ditulis menjadi :

$$E_{total} = E_{PH} = m_i [(h_i - h_0) - T_0 (S_i - S_0)] \dots\dots\dots(2)$$

dimana :

- $i$  = menunjukkan titik keadaan
- $0$  = keadaan lingkungan
- $m$  = laju aliran (kg/s);
- $h$  = entalpi (kJ/kg);
- $s$  = entropi (kJ/kgK);
- $T$  = temperatur (K).

Untuk volume control, persamaan kesetimbangan eksergi dapat dinyatakan dengan:

$$E_{input} = E_{desired} + E_{waste} + E_{destroyed} \dots\dots\dots(3)$$

dimana :

- $E_{input}$  = eksergi total masuk volume control.
- $E_{desired}$  = eksergi total yang diinginkan (*net work output*);
- $E_{waste}$  = jumlah eksergi selain yang diinginkan.
- $E_{destroyed}$  = jumlah kerugian eksergi system (*irreversibiliti*)

$E_{destroyed}$  secara langsung berhubungan dengan generasi entropi yang dinyatakan dengan persamaan:

$$E_{destroyed} = T_0 \cdot S \dots\dots\dots(4)$$

Kriteria kinerja sistem eksergi tergantung pada laju transfer eksergi masuk dan keluar volume kontrol. Ukuran yang paling tepat dalam menentukan kriteria kinerja adalah "*rational exergy efficiency*" yaitu rasio antara jumlah eksergi output yang diinginkan (*desired exergy output*) dengan jumlah eksergi input.

$$\eta_e = \frac{E_{desired}}{E_{input}} \dots\dots\dots(5)$$

$$E_{input} = E_{output} + E_{destroyed} \dots\dots\dots(6)$$

$$E_{output} = E_{desired} + E_{waste} \dots\dots\dots(7)$$

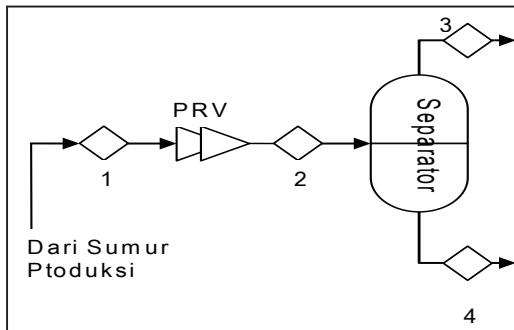
Dimana :

- $E_{desired}$  = kerja bersih yang dihasilkan sistem
- $E_{destroyed}$  = laju kerugian eksergi didalam sistem.
- $E_{waste}$  = Eksergi yang masih memiliki kapasitas untuk melakukan pekerjaan dalam sistem.

**IV. ANALISA EKSERGI PLTP KMJ 68**

**4.1 Proses Produksi dan Separasi**

Gambar 4 menunjukkan susunan sederhana dari sub sistem sumur produksi dan separator. Sumur KMJ 68 menghasilkan campuran uap dan air dengan entalpi rata-rata 2762,961 kJ / kg. Fluida panas bumi mencapai kepala sumur dengan tekanan rata-rata ( $WHP_{mean} = 12 \text{ bar-a}$ ) dan kemudian masuk kedalam separator setelah tekanannya diturunkan melau PRV (*Pressure Regulator Valve*). Cairan berekspansi dalam separator ( $p_{mean} = 6 \text{ bar-a}$ ) dimana uap dan air dipisahkan karena perbedaan densitas. Air panas keluar separator dan dibuang ke dalam *Muffler Rock* dan kemudian mengalir ke kolam kondensat dan akhirnya dipompa ke sumur reinjeksi. Uap dari separator dialirkan ke dalam sistem turbin uap.



Gambar 4. Sistem separator

Tekanan uap pada titik 2,3 dan 4 adalah sama dengan tekanan separator.

$$P_2 = P_3 = P_4 \dots\dots\dots(8)$$

Laju aliran massa fluida pada titik 3 dapat diperoleh dari persamaan :

$$m_2 = m_3 + m_4 \dots\dots\dots(9)$$

Neraca energi pada separator diberikan oleh persamaan :

$$m_2 \times h_3 = m_3 \times h_3 + m_4 \times h_4 \dots\dots\dots(10)$$

Persamaan neraca eksergi dari sistem produksi dan separasi dinyatakan sebagai

berikut :

$$E_2 = E_4 + E_3 + I_{SEPARATION} \dots\dots\dots(10)$$

Laju aliran eksergi E ( kJ/s) adalah :

$$E = m \cdot \varepsilon = m[(h-h_0) - T_0 (S-S_0)] \dots\dots\dots(11)$$

**4.2 Sistem Turbin - Generator**

Laju aliran massa uap masuk turbin uap adalah :

$$m_5 = m_3 - m_6 \dots\dots\dots(12)$$

Daya yang dihasilkan turbin diberikan oleh persamaan :

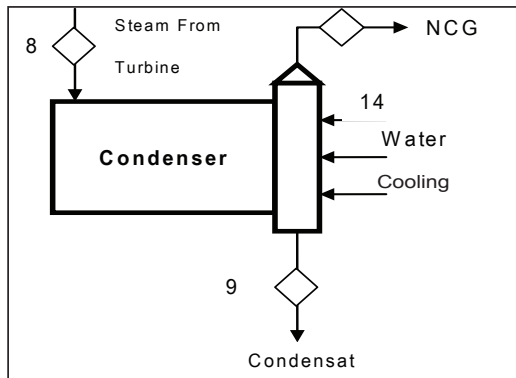
$$W_t = m_5 \times (h_6 - h_8) \dots\dots\dots(10)$$

Daya kotor (*gross power*) yang dihasilkan generator adalah :

$$W_{gross} = W_t \times \eta_m \times \eta_g \dots\dots\dots(11)$$

Keluaran daya bersih dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$W_{net} = W_{gross} - W_{auxiliary} \dots\dots\dots(12)$$



Gambar 5. Turbin-Generator

Dari gambar 5 persamaan neraca eksergi adalah :

$$E_5 = W_{GROSS} + E_8 + I_{STEAMTURBINE} \dots\dots\dots(13)$$

Dimana

- $E_5$  = eksergi uap masuk turbin,
- $W_{GROSS}$  = eksergi dari tenaga listrik yang dihasilkan generator
- $E_8$  = eksergi uap keluar turbin
- $I_{STEAM TURBINE}$  = destruksi eksergi dari sistem turbin uap.

$$E_5 = m_5 \times [(h_5 - h_0) - T_0 (S_5 - S_0)] \dots\dots\dots(14)$$

$$E_8 = m_8 \times [(h_8 - h_0) - T_0 \times (S_8 - S_0)] \dots\dots\dots(15)$$

$$m_5 = m_8 \dots\dots\dots(16)$$

Untuk proses ekspansi isentropis pada turbin uap maka  $s_5 = s_8$ , sehingga kualitas uap (x) pada sisi keluar turbin adalah

$$X_{8,ideal} = \frac{S_{8,ideal} - S_{f0.16\ bar}}{S_{g\ 0.16,\ bar} - S_{f0.16\ bar}} \dots\dots\dots(17)$$

Entalpi uap keluar turbin untuk proses isentropic ( $h_{bideal}$ ) dapat dihitung dengan persamaan :

$$h_{bideal} = h_{f,0.16} + X_{8,ideal} \times (h_{g\ 0.16\ bar} - h_{f0.16\ bar}) \dots\dots\dots(18)$$

Entalpi uap aktual keluar turbin ( $h_8$ ) adalah :

$$h_8 = h_5 - \eta_t \times (\eta_5 - h_{bideal}) \dots\dots\dots(19)$$

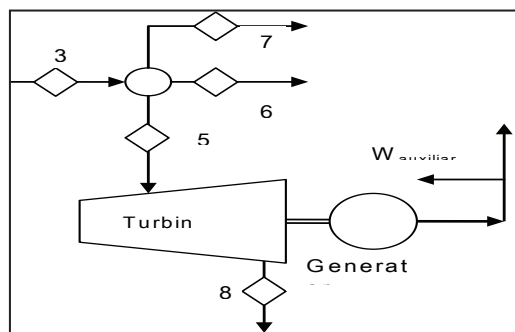
Kualias uap (x) pada titik (8) menjadi :

$$X_8 = \frac{h_8 - h_{f0.16\ bar}}{h_{g\ 0.16,\ bar} - h_{f0.16\ bar}} \dots\dots\dots(20)$$

$$m_8 + m_{14} + m_{19} = m_9 + m_{11} \dots\dots\dots(21)$$

### 4.3 Sistem Kondensor

Proses kondensasi uap dalam sistem kondensor dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Sistem kondensor

Persamaan neraca masa, neraca energi dan neraca eksergi diberikan oleh persamaan-persamaan berikut :

$$m_8 \times h_8 + m_{14} \times h_{14} + m_{19} \times h_{19} = m_9 \times h_9 + m_{11} \times h_{11} \dots\dots\dots(22)$$

$$E_8 + E_{14} + E_{19} + E_9 + E_{11} + I_{CONDENSER} \dots\dots\dots(23)$$

Dimana

- $E_8$  = eksergi uap keluar turbin (8),
- $E_{14}$  = eksergi kondensate dari ejector condenser (14),
- $E_{19}$  = eksergi air pendingin (19),
- $E_9$  = eksergi kondensate keluar kondenser (9),
- $E_{11}$  = eksergi dari NCG (11)
- $I_{condenser}$  = ireversibilitas dari sistem kondenser.

### 4.4 Sistem Non Condensable Gas (NCG)

Untuk mengurangi konsumsi uap oleh ejektor, sistem ejektor diintegrasikan dengan pompa vakum dimana sistem ini disebut sistem hibrida. Untuk menghitung konsumsi uap, digunakan persamaan-persamaan berikut :

Dimana  $C_r$  adalah *compression ratio* dan  $E_r$  adalah *expansion ratio*. Dengan menggunakan grafik diperoleh area ratio dan *entrainment ratio* ( $W_b/W_a$ ).

$$C_r = \frac{P_{13}}{P_1} \dots\dots\dots(24)$$

$$C_r = \frac{P_7}{P_1} \dots\dots\dots(25)$$

*Entrainment ratio correction* diberikan oleh persamaan :

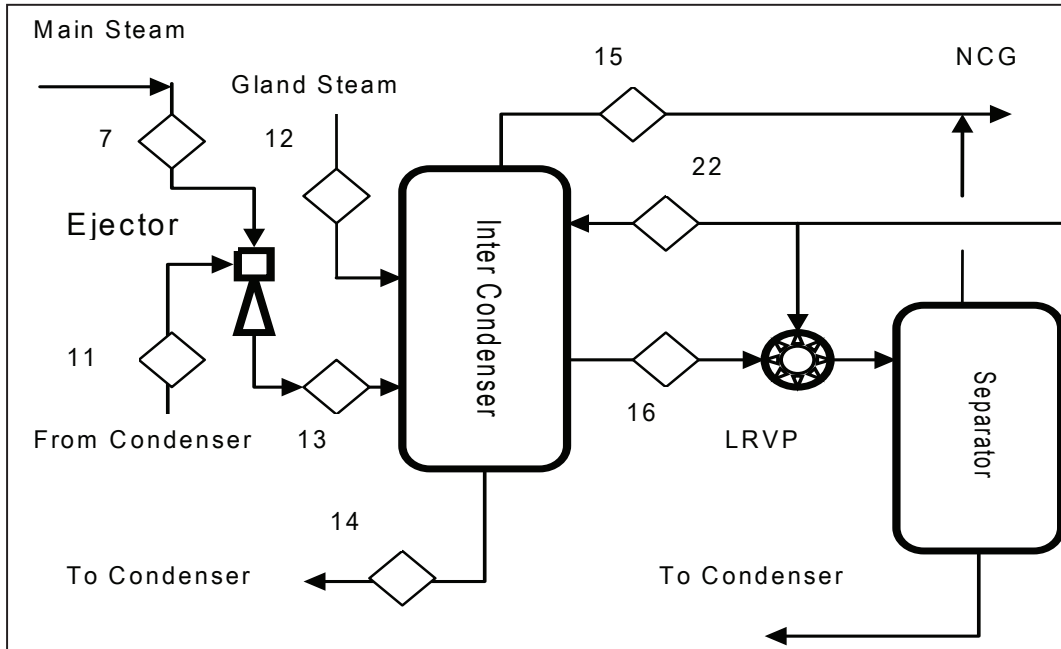
$$\frac{W}{W_a} = \frac{W_b}{W_a} \sqrt{\left( T_a \cdot \frac{M_b}{T_b} \cdot M_a \right)} \dots\dots\dots(26)$$

Dimana  $W_a$  dan  $W_b$  masing-masing laju aliran massa uap dan laju aliran massa fluida isap.

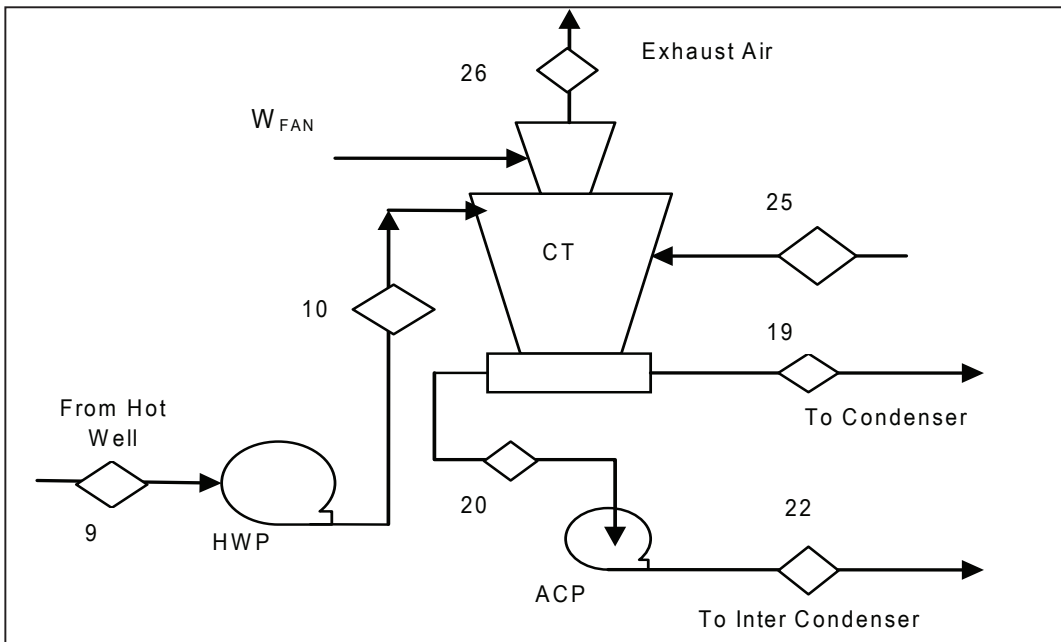
Neraca eksergi pada system NCG diberikan oleh : persamaan :

$$E_7 + E_1 + E_{12} + E_2 = E_{14} + E_{15} + I_{NCG} \dots \dots (27)$$

Dimana  $I_{NCG}$  adalah irreversibilitas dari NCG system.



Gambar 7. Proses diagram alir sistem extraction NCG



Gambar 8. Diagram aliran proses dari sistem pendinginan



#### 4.5 Cooling Tower

Sistem pendinginan *condenser* diperlihatkan pada gambar 7. Neraca eksergi dari *system Cooling Tower* diberikan oleh persamaan :

$$E_9 + W_{HWP} + E_{25} + W_{FAN} = E_{26} + E_{19} + I_{CT} \dots (27)$$

Dimana  $I$  adalah ireversibilitas pada sistem *Cooling Tower*.

### V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari tabel 2 dapat dilihat bahwa total eksergi yang tersedia dari kepala sumur adalah 6967.54 kW. Sebanyak 629.63 kW dari eksergi uap hilang dalam katup pengatur tekanan (PVC) dan 67,92 kW terbuang dalam bentuk air garam (*brine*).

Eksergi total yang diterima pada sisi masuk turbin adalah 5561,27 kW. Penurunan eksergi melalui turbin uap adalah sebesar 4111,01 kW dan tenaga kotor yang dihasilkan oleh turbin sebesar 3544,21 kW. Dari tabel 3 dapat dilihat bahwa total eksergi uap keluar turbin dan masuk ke kondensor adalah sebesar 1450,26 kW.

Efisiensi eksergi keseluruhan pembangkit listrik tenaga panas bumi didapat 43,05% dengan mengacu pada eksergi total yang tersedia pada kepala sumur KMJ 68. Sebagai perbandingan, efisiensi energi total dari pembangkit hanya 13,05%. Perbedaan besar dalam efisiensi menunjukkan bahwa sebagian besar energi yang diterima pembangkit dari sumur KMJ 68 masih mengandung eksergi yang substansial.

Tabel 3 menunjukkan efisiensi eksergi turbin uap sebesar 86,21 % dengan 566,79 eksergi dimusnahkan pada sistem turbin uap. Total eksergi uap yang keluar dari turbin dan masuk kedalam *system condenser* adalah 1450.26 KW.

Kerugian eksergi terbesar terjadi pada kondensor di mana sebagian besar eksergi ditolak dan dimusnahkan.

Tabel.2. Ringkasan analisa eksergi dari sistem separasi.

Description	Value
Available exergy (kW)	6967.55
Exergy at separator inlet (kW)	6337.91
Exergy of water at separator outlet (kW)	67.92
Exergy of steam at separator outlet (kW)	5808.80
Exergy losses in RPV (kW)	629.63
Irreversibility in Separator	461.20
Overall efficiency of separation process (%)	83.37

Tabel.3. Ringkasan analisa eksergi dari sistem turbin dan kondensor.

Description	Value
Turbine inlet (kW)	5561.27
Turbine exhaust (kW)	1450.26
Exergy drop (kW)	4111.01
Gross turbine power (kW)	3544.21
Gross electrical power (kW)	3333.33
Exergy destroyed (kW)	566.79
Exergy efficiency (%)	86.21
Condenser Outlet (kW)	673.62
NCG exit (kW)	26.67
Cooling water inlet (kW)	61.70
Condenser performance (%)	78.48

Kerugian eksergi yang substansial terjadi dalam sistem separasi dan hal ini dapat diatasi. Eksergi yang dikandung dalam air limbah relatif kecil namun sangat signifikan dan dapat digunakan sebagai sumber eksergi pada sistem pemanfaatan langsung eksergi panas bumi atau sebagai sumber eksergi pada sistem PLTP siklus biner.

Kerugian eksergi pada turbin uap pada hakekatnya cukup besar akan tetapi pengaruh kebocoran eksergi antara tingkat yang satu dengan tingkat yang lainnya (*inter stage*) cenderung memberikan kontribusi menurunkan efisiensi eksergi pada turbin.

Tabel.4. Ringkasan analisa eksergi dari sistem GES.

Description	Value
Steam inflow (kW)	216.45
NCG from condenser (kW)	26.67
Cold Water to inter condenser (MW)	0.26
Condensate drain of inter condenser (kW)	29.05
NCG exhaust (kW)	0.3683
Overall performance (%)	

Tabel.5. Ringkasan analisa eksergi dari system pendingin.

Description	Value
Condensate drain (kW)	673.62
Air flow into cooling tower (kW)	
Air flow out of cooling tower (kW)	
Cold water from cooling tower (kW)	35.03
Electrical power of fan (kW)	
Electrical power of pump (kW)	75
System performance (COP)	

Tabel.6. Analisa eksergi keseluruhan pembangkit.

Description	Value
Total available exergy (kW)	6967.55
Total Exergy used (kW)	
Gross electrical power (kW)	3333.3
Auxiliary electric consumption (kW)	333.33
Net Electrical power production (kW)	3000
Overall Energy efficiency (%)	13.05
Overaal exergy efficiency (%)	43.06

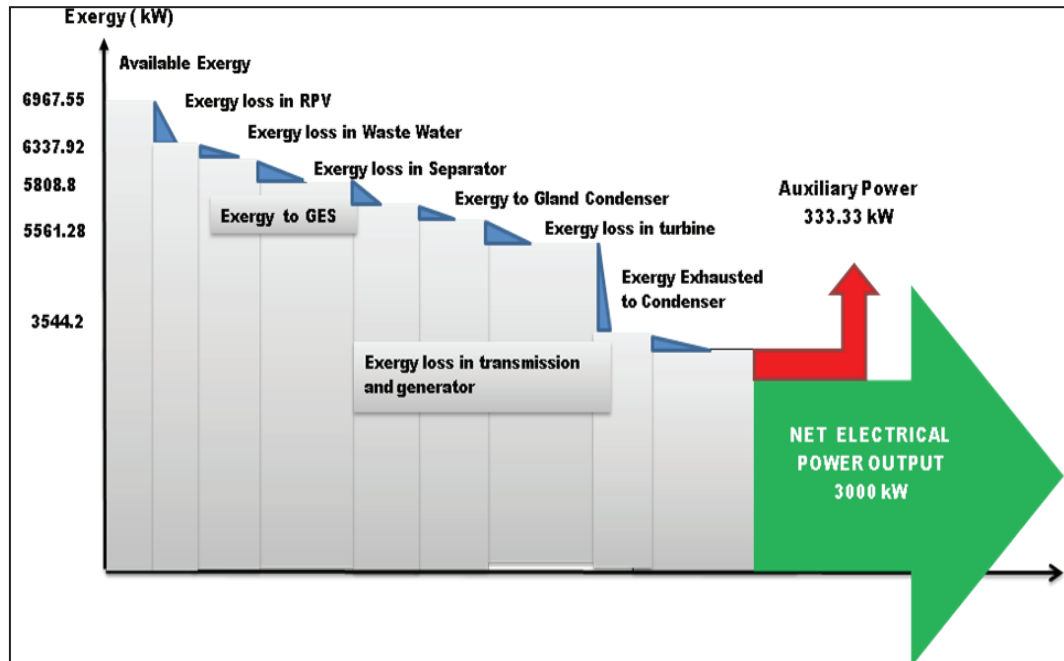
## VI. KESIMPULAN

Pentingnya analisa eksergi dalam evaluasi kinerja pembangkit listrik tenaga panas bumi telah terbukti. Dari analisa eksergi yang telah dilakukan untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi dapat diketahui lokasi dan jumlah kerugian eksergi, limbah dan penghancuran eksergi dalam proses yang berbeda telah diindikasikan. Selain itu, analisis eksergi memungkinkan tingkat ketidak sempurnaan termodinamika untuk setiap proses dari PLTP dapat ditentukan.

Kerugian eksergi utama ditemukan terjadi di separator, turbin, kondensor dan ejektor gas. *Irreversibilities* dalam turbin adalah karena keterbatasan sifat-sifat metalurgi. Limbah eksergi dalam air garam yang kecil tetapi dapat digunakan untuk menghasilkan tenaga yang bermanfaat.

Dari hasil analisa eksergi diatas dapat disimpulkan sebagai berikut :

- 1) Eksergi total yang tersedia dari sumur produksi KMJ 68 adalah 6967.55 kW. Total eksergi yang diterima separator adalah 6337,91 dimana 5808,8 kW dalam bentuk uap dihasilkan dari separator dan 67,92 kW merupakan limbah cair dalam bentuk garam (*brine*).
- 2) Efisiensi eksergi keseluruhan dari PLTP KMJ 68 adalah 43,06 % dan efisiensi energi keseluruhan dari PLTP KMJ 68 adalah 13,05 %. Keduanya dihitung dengan acuan eksergi fluida pada kepala sumur KMJ 68.
- 3) Efisiensi eksergi dari turbin uap adalah 86,21% sedangkan efisiensi eksergi dari sistem kondenser adalah 78,48 %.
- 4) Eksergi yang terkandung dalam limbah air garam (*brine*) 67,92 kW relatif kecil jika dibandingkan dengan eksergi yang terkandung dalam uap sebesar 5808,8 kW.
- 5) Kehilangan eksergi terbesar terjadi pada sistem kondenser yaitu sebesar 673,62 kW.



Gambar 9 Memperlihatkan aliran total eksergi pada PLTP KMJ 68 dalam bentuk diagram Grassman.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M., 1996. *Thermal Design and Optimization*. John Wiley & Sons, Inc, New York USA..
- Gong, M., and Wall, G., 1997. *On Exergetics, Economics and Optimization of Technical Processes to Meet Environmental Conditions. Proceedings of the Conference: Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems*. Beijing, China, 453-460.
- Kotas, T.J., 1995. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Krieger Publishing Co. Ltd. Florida, USA.
- Rosen, M., and Dincer, I., 2001. *Exergy as the Confluence of Energy, Environment and Sustainable Development*. Internat. J. on Exergy, 1, 3-13.
- Szargut, J., Morris, D.R and Steward, F.R., 1988. *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*, Hemisphere, New York USA.

