

Analisis Kemampuan Hisap *Gas Removal System* (GRS) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi

Ariel Andrew dan Marten Darmawan[†]

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Tangerang, Banten 15345, Indonesia

Abstrak— Energi panas bumi merupakan sumber energi yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik dalam unit pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTPB). Fluida kerja yang mengalir dari sumur produksi tidak hanya mengandung air, tetapi juga mengandung gas-gas lain yang tidak dapat terkondensasi pada suhu ruangan atau disebut juga *non-condensable gas* (NCG). NCG ikut dialirkan dari sumur hingga memasuki turbin kondensor. Karena sifatnya yang tidak dapat terkondensasi, maka diperlukan sebuah sistem yang mampu menghisap keluar seluruh NCG agar tidak menumpuk di dalam kondensor. Oleh karena itu, diperlukan suatu *Gas Removal System* (GRS) yang berfungsi untuk menghisap keluar seluruh gas-gas yang tidak dapat terkondensasi pada kondensor. Pada suatu unit pembangkit PLTPB, beban hisap yang harus bisa ditanggung oleh GRS ketika pengoperasian normal adalah sebesar 2,2 kgNCG/s. Hasil perhitungan yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa GRS *Steam Jet Ejector* (SJE) yang digunakan sebagai pompa preventif memiliki potensi untuk digunakan sebagai pompa GRS dalam pengoperasian normal. Hal ini ditunjukkan melalui perhitungan GRS tersebut dalam kondisi *Dry Air Equivalent* (DAE) maksimum. GRS SJE memiliki kemampuan hisap maksimal pada tahap pertama sebesar 2,97 kgNCG/s dan pada tahap kedua sebesar 2,71 kgNCG/s.

Kata kunci— Panas Bumi, *Gas Removal System*, *Non-Condensable Gas*, dan Kemampuan Hisap.

I. PENDAHULUAN

Sumber panas jenis *Flash Steam* umumnya didominasi oleh fluida kerja dalam bentuk cair, sehingga perlu adanya sistem pemisah (*separator*) antara fluida kerja cair dan fluida kerja gas supaya fluida kerja yang memasuki turbin hanya berupa uap kering. Hal ini dikarenakan apabila fluida kerja cair masuk ke dalam turbin dapat menyebabkan korosi. Selain itu, uap kering pada PLTPB yang meninggalkan separator tidak sepenuhnya berupa uap air murni, melainkan masih terkandung gas-gas yang tidak dapat terkondensasi pada temperatur ruangan. Gas ini disebut sebagai *Non Condensable Gas* (NCG). NCG pada PLTPB umumnya terdiri dari CO₂, H₂S, NH₃, N₂, CH₄ dan lain-lain. Kandungan NCG yang ada didalam uap kering sangat mempengaruhi performa dari sebuah PLTPB. NCG yang mengalir baru bisa dipisahkan setelah melewati turbin, selain karena sulit untuk memisahkannya, NCG juga dapat menurunkan tekanan dan temperatur uap kering dengan signifikan apabila dipisahkan pada separator. Umumnya NCG yang terkandung di dalam uap kering berkisar antara 0,2% hingga 25%. Karena jumlahnya yang bisa saja signifikan dan

sifatnya yang tidak mudah terkondensasi pada suhu ruangan, NCG ini sengaja dialirkan hingga melewati turbin dan masuk ke dalam kondensor. Spesifikasi tekanan operasi kondensor pada PLTPB SEG WW adalah sebesar 0,12 bar (vakum). Dengan tekanan kondensor yang sangat rendah ini, apabila NCG dibiarkan masuk dan diam di dalam kondensor, maka kehadiran NCG ini dapat meningkatkan temperatur dan tekanan di dalam kondensor itu sendiri. Oleh karena itu, pada kondensor perlu diberikan sistem untuk menghisap NCG tersebut. Sistem yang digunakan untuk menghisap NCG disebut sebagai *Non-Condensable Gas Removal System* (GRS) [1]. GRS berfungsi sebagai sistem yang akan menghisap keluar seluruh NCG dari kondensor. Apabila GRS tidak dapat berfungsi dengan baik, maka performa dari sebuah PLTPB tentunya akan menurun sangat drastis. Selain itu NCG juga bersifat korosif sehingga cukup merugikan bila menumpuk pada kondensor [2]. Agar NCG dapat terhisap sempurna oleh GRS, maka pada GRS digunakan sebuah ejektor yang berfungsi untuk menciptakan tekanan yang lebih rendah (vakum) daripada kondensor. Ejektor ini memiliki 6 buah lubang hisap yang terletak pada bagian atas kondensor dan ejektor memanfaatkan sebagian uap kering masukan turbin sebagai fluida kerjanya. Ejektor beroperasi seperti pompa dengan prinsip induksi aliran secara supersonic yang secara terus menerus mengkompresi uap kering dan menciptakan kevakuman sehingga mampu menghisap NCG [3-5]. Oleh karena itu, uap kering menjadi salah satu fluida kerja yang sangat penting bagi ejektor untuk menghasilkan kevakuman di GRS.

Berdasarkan *Plant Performance Test* pada suatu unit pembangkit pada suatu perusahaan pembangkit listrik tenaga panas bumi pada bulan Februari, Maret dan April tahun 2017, jumlah kandungan NCG pada uap kering yang mengalir menuju kondensor adalah sebesar 1% dari total laju aliran uap kering. Pada unit tersebut, terdapat tiga buah sistem GRS yang digunakan untuk menghisap NCG. Sistem tersebut disebut sebagai Train A, Train B dan Train C. Susunan yang terdapat pada Train A dan B berbeda dengan Train C, namun masing-masing terdiri dari dua tahap. Pada Train A dan B terdapat ejektor tahap 1, inter condenser ejektor tahap 2 after condenser dan pompa vakum. Pada Train C hanya terdapat ejektor tahap 1, inter condenser, ejektor tahap 2 dan langsung after condenser tanpa menggunakan pompa vakum.

Pada pengoperasian normal, Train A dan B digunakan sebagai sistem GRS utama, sedangkan Train C digunakan

[†] Corresponding author: Marten Darmawan
(e-mail: marten.darmawan@atmajaya.ac.id).

sebagai sistem GRS cadangan/preventif. Sebagai sistem GRS utama, Train A dan Train B diharuskan mampu untuk menghisap 1% NCG yang terkandung dalam seluruh aliran uap kering yang menuju kondensor. Dengan kemampuan hisap masing-masing 50% dari jumlah rata-rata NCG yang terbawa dalam uap kering yang mengalir ke kondensor. Jumlah uap kering total yang dibutuhkan oleh ejektor pada Train A dan B dari sebagian uap kering masukan turbin adalah 6,3 kg/s. Berbeda dengan Train C yang selama ini digunakan sebagai sistem GRS cadangan/preventif yang beroperasi ketika Train A dan B mengalami trip, kemampuan Train C dalam menghisap NCG yang terkandung pada uap kering bisa mencapai 100% dari 1% NCG yang terkandung dalam seluruh aliran uap kering menuju kondensor. Selain itu, uap kering yang dibutuhkan oleh ejektor Train C dari sebagian uap kering pada inlet turbin lebih sedikit, yaitu sebesar 5,2 kg/s. Berdasarkan kelebihan yang dimiliki oleh Train C tersebut, maka dalam penelitian ini akan dilakukan kaji eksperimen untuk mengetahui apakah Train C dapat digunakan sebagai sistem GRS utama pada pengoperasian normal (Train A dan Train B sebagai sistem GRS cadangan/preventif), dan seberapa besar penghematan konsumsi uap kering apabila Train C dioperasikan sebagai sistem GRS utama pada pengoperasian normal.

II. METODE DAN PROSEDUR PENELITIAN

Perhitungan akan diawali dengan menggunakan nilai desain dari *Dry Air Equivalent* (DAE) pada ejektor. Nilai DAE tersebut digunakan untuk menentukan jumlah beban hisap yang mampu diambil oleh ejektor dari kondensor. DAE merupakan sebuah nilai hasil penyetaraan gas-gas lain terhadap udara pada 70°F. Nilai-nilai ini telah ditentukan oleh Heat Exchanger institute (HEI), sebuah institusi yang pada tahun 1951 memfasilitasi pengujian untuk *Steam Jet Ejector* (SJE) yang umum digunakan pada PLTPB. Nilai DAE ini merupakan penjumlahan dari nilai penyetaraan terhadap setiap gas-gas yang ada pada proses SJE beroperasi (H₂O dan CO₂) [2].

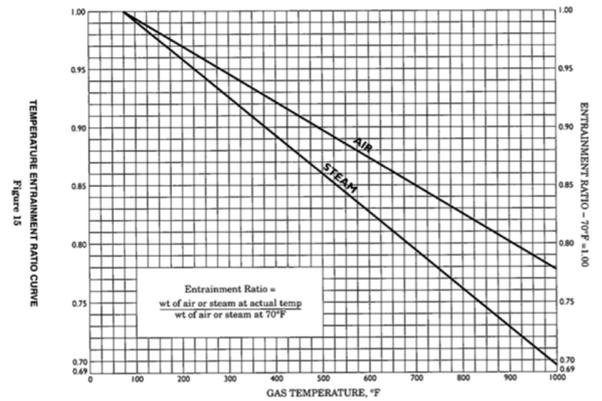
$$DAE_{(design)} = DAE_{wv} + DAE_{NCG} \quad (1)$$

Untuk mengkalkulasikan jumlah total beban hisap dari campuran NCG dan uap air yang akan dihisap masuk kedalam GRS, maka nilai DAE desain akan diuraikan seperti pada persamaan berikut [2]

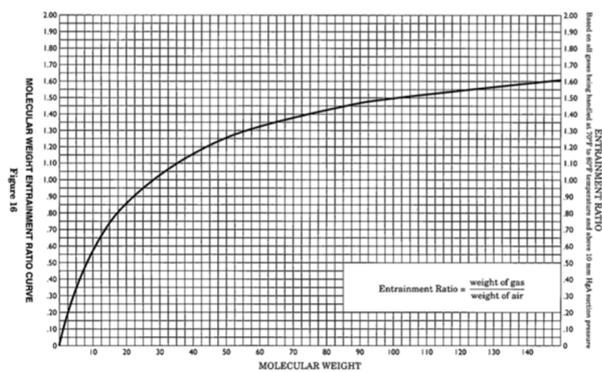
$$DAE_{wv} = \left(\frac{\dot{m}_{wv}}{TCF_{wv} \times WER_{wv}} \right) \quad (2)$$

$$DAE_{NCG} = \left(\frac{\dot{m}_{NCG}}{TCF_{NCG} \times WER_{NCG}} \right) \quad (3)$$

Dalam menghitung nilai DAE dari setiap komponen gas-gas, diperlukan tabel TCF dan tabel WER. Tabel ini bisa dilihat dalam gambar 1 dan gambar 2.



Gambar 1. *Temperature Correction Factor* [4]



Gambar 2. *Molecular Weight Entrainment Ratio* [4]

Setelah mendapatkan nilai dari TCF dan WER untuk NCG dan uap air, maka berikutnya diperlukan nilai dari massa \dot{m}_{NCG} dan \dot{m}_{wv} perlu dilakukan substitusi nilai dari massa uap air dalam satuan massa NCG, maka digunakan persamaan berikut[2].

$$\dot{m}_{wv} = \dot{m}_{NCG} \times \left(\frac{MW_{wv}}{MW_{NCG}} \right) \times \left(\frac{P_{wv}}{P_{suc} - P_{wv}} \right), \quad (4)$$

dimana

MW_{wv} = Berat molekular uap air

MW_{NCG} = Berat molekular NCG

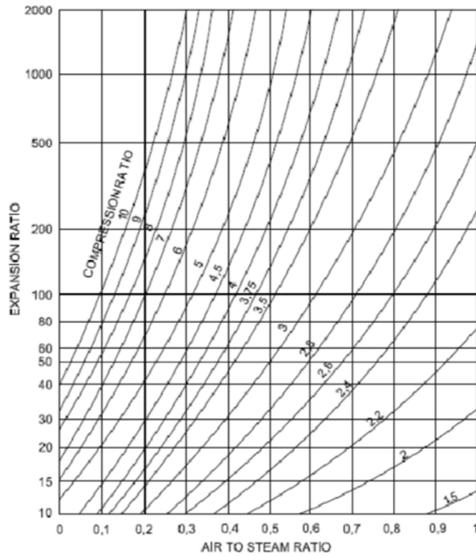
P_{wv} = Tekanan parsial uap air yang nilainya sama dengan tekanan uap pada *cooling water* temperatur (T_{cw}),

P_{suc} = Tekanan hisap ejektor.

Setelah dapat ditentukan nilai dari \dot{m}_{NCG} dan \dot{m}_{wv} maka dapat diketahui nilai beban hisap yang mampu diambil oleh ejektor dengan menjumlahkan kedua massanya seperti pada persamaan berikut [1].

$$\dot{m}_{GRS (desain)} = \dot{m}_{NCG} + \dot{m}_{wv} \quad (5)$$

Apabila nilai dari beban hisap yang mampu diambil oleh ejektor telah menyamai nilai pada desain, maka metode yang digunakan dapat dikatakan telah *valid* (bisa digunakan). Untuk menentukan nilai rasio perbandingan antara jumlah NCG dengan uap kering yang dibutuhkan, digunakan data-data perbandingan rasio kompresi dan ekspansi dari sebuah ejektor. Nilai rasio kompresi dan ekspansi tersebut digunakan kedalam grafik *Air to Steam Ratio*, seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik *Air to Steam Ratio* [2]

Bila nilai dari *Air to Steam Ratio* melebihi 1, maka digunakan nilai desainnya yaitu [2];

$$AS_{design} = \frac{DAE_{design}}{\dot{m}_{GRS}(design)} \quad (6)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perhitungan kapasitas GRS Train C tahap pertama (desain)

TABEL I
DATA TEKANAN PADA TRAIN C TAHAP PERTAMA

1 st Stage	Bara
Psuc	0,145
Pdis	0,33
Pejector	9

Pada kondisi GRS 44,5 °C (112,1 °F)

$$TCF_{wv} = 0,992$$

$$TCF_{NCG} = 0,992$$

$$WER_{wv} = 18$$

$$WER_{NCG} = 44$$

$$DAE_{(design)} = 3,0556 \frac{kg}{s} = DAE_{wv} + DAE_{NCG}$$

$$DAE_{(design)} = 3,0556 \frac{kg}{s} = \left(\frac{\dot{m}_{wv}}{TCF_{wv} \times WER_{wv}} \right) + \left(\frac{\dot{m}_{NCG}}{TCF_{NCG} \times WER_{NCG}} \right)$$

$$DAE_{(design)} = 3,0556 \frac{kg}{s} = \left(\frac{\dot{m}_{wv}}{0,992 \times 0,82} \right) + \left(\frac{\dot{m}_{NCG}}{0,992 \times 1,16} \right)$$

$$\dot{m}_{wv} = \dot{m}_{NCG} \times \left(\frac{MW_{wv}}{MW_{NCG}} \right) \times \left(\frac{P_{wv}}{P_{suc} - P_{wv}} \right)$$

Dimana;

MW_{wv} = Berat molekular uap air. ($MW_{wv} = 18$)

MW_{NCG} = Berat molekular NCG. ($MW_{NCG} = 44$)

P_{wv} = Tekanan parsial uap air yang nilainya sama dengan tekanan uap pada *cooling water* temperatur ($T_{cw} = 22,5^\circ C$) ($P_{wv} = 0,0346$ bar)

P_{suc} = Tekanan hisap ejektor ($P_{suc} = 0,145$ bar)

$$\dot{m}_{wv} = \dot{m}_{NCG} \times \left(\frac{18}{44} \right) \times \left(\frac{0,0346 \text{ bar}}{0,145 \text{ bar} - 0,0346 \text{ bar}} \right)$$

$$\dot{m}_{wv} = 0,1282 \dot{m}_{NCG}$$

$$DAE_{(design)} = 3,0556 \frac{kg}{s} = \left(\frac{0,1282 \dot{m}_{NCG}}{0,992 \times 0,82} \right) + \left(\frac{\dot{m}_{NCG}}{0,992 \times 1,16} \right)$$

$$\dot{m}_{NCG} = 2,9762 \frac{kg}{s}, \quad \dot{m}_{wv} = 0,3815 \frac{kg}{s}$$

3.2 Perhitungan kapasitas GRS Train C tahap kedua (desain)

TABEL II
DATA TEKANAN PADA TRAIN C TAHAP KEDUA

2 nd Stage	Bara
Psuc	0,51
Pdis	0,977
Pejector	9

Pada kondisi GRS 44,5 °C (112,1 °F)

$$TCF_{wv} = 0,992$$

$$TCF_{NCG} = 0,992$$

$$WER_{wv} = 18$$

$$WER_{NCG} = 44$$

$$DAE_{(design)} = 2,4583 \frac{kg}{s} = DAE_{wv} + DAE_{NCG}$$

$$DAE_{(design)} = 2,4583 \frac{kg}{s} = \left(\frac{\dot{m}_{wv}}{TCF_{wv} \times WER_{wv}} \right) + \left(\frac{\dot{m}_{NCG}}{TCF_{NCG} \times WER_{NCG}} \right)$$

$$DAE_{(design)} = 2,4583 \frac{kg}{s} = \left(\frac{\dot{m}_{wv}}{0,992 \times 0,82} \right) + \left(\frac{\dot{m}_{NCG}}{0,992 \times 1,16} \right)$$

$$\dot{m}_{wv} = \dot{m}_{NCG} \times \left(\frac{MW_{wv}}{MW_{NCG}} \right) \times \left(\frac{P_{wv}}{P_{suc} - P_{wv}} \right)$$

Dimana;

MW_{wv} = Berat molekular uap air ($MW_{wv} = 18$)

MW_{NCG} = Berat molekular NCG ($MW_{NCG} = 44$)

P_{wv} = Tekanan parsial uap air yang nilainya sama dengan tekanan uap pada *cooling water* temperatur ($T_{cw} = 22,5^\circ C$)

($P_{wv} = 0,0346$ bar)

P_{suc} = Tekanan hisap ejektor. ($P_{suc} = 0,51$ bar)

$$\dot{m}_{wv} = \dot{m}_{NCG} \times \left(\frac{18}{44} \right) \times \left(\frac{0,0346 \text{ bar}}{0,51 \text{ bar} - 0,0346 \text{ bar}} \right)$$

$$\dot{m}_{wv} = 0,0297 \dot{m}_{NCG}$$

$$DAE_{(design)} = 1,934 \frac{kg}{s} = \left(\frac{0,0297 \dot{m}_{NCG}}{0,992 \times 0,82} \right) + \left(\frac{\dot{m}_{NCG}}{0,992 \times 1,16} \right)$$

$$\dot{m}_{NCG} = 2,7145 \frac{kg}{s}, \quad \dot{m}_{wv} = 0,0808 \frac{kg}{s}$$

Nilai kapasitas dari GRS Train C yang beroperasi pada DAE maksimum ditunjukkan pada tabel 3.

TABEL III
HASIL PERHITUNGAN AKTUAL KAPASITAS GRS TRAIN C DENGAN DAE
MAKSIMUM

	\dot{m}_{GRS} (kg/s)	\dot{m}_{NCG} (kg/s)	\dot{m}_{wv} (kg/s)
1 st Stage Ejector	3,357	2,976	0,381
2 nd Stage Ejector	2,795	2,714	0,080
Total	6,1532	5,690	0,462

Dengan menggunakan hasil perhitungan kapasitas dari GRS Train C, maka dapat digunakan perbandingan dari rasio kompresi dan ekspansi ejektor setiap tahapnya, untuk kemudian mengetahui nilai AS untuk setiap tahap ejektornya sehingga dapat diketahui nilai konsumsi uap kering dari GRS tersebut.

GRS Train C Tahap Pertama

$$(CR = \frac{P_{dis}}{P_{suc}})$$

$$(CR = \frac{0,33 \text{ bar}}{0,145 \text{ bar}})$$

$$(CR = 2,275)$$

$$(ER = \frac{P_{ejector}}{P_{suc}})$$

$$(ER = \frac{9 \text{ bar}}{0,145 \text{ bar}})$$

$$(ER = 62,0689)$$

GRS Train C Tahap Kedua

$$(CR = \frac{P_{dis}}{P_{suc}})$$

$$(CR = \frac{0,33 \text{ bar}}{0,145 \text{ bar}})$$

$$(CR = 2,275)$$

$$(ER = \frac{P_{ejector}}{P_{suc}})$$

$$(ER = \frac{9 \text{ bar}}{0,98 \text{ bar}})$$

$$(ER = 17,647)$$

Nilai AS untuk GRS Train C Tahap Pertama = 0,88

Nilai AS untuk GRS Train C Tahap Kedua = 0,58

Sehingga dapat diketahui jumlah uap kering yang dibutuhkan untuk masing-masing tahap dengan persamaan berikut [2];

$$\dot{m}_{motive \text{ steam}(aktual)} = \frac{DAE}{AS_{(aktual)}} \quad (7)$$

GRS Train C Tahap Pertama:

$$\dot{m}_{motive \text{ steam}(aktual)} = \frac{DAE}{AS_{(aktual)}}$$

$$m_{motive\ steam(aktual)} = \frac{3,0556 \frac{kg}{s}}{0,88}$$

$$m_{motive\ steam(aktual)} = 3,4722 \frac{kg}{s}$$

GRS Train C Tahap Kedua:

$$m_{motive\ steam(aktual)} = \frac{DAE}{AS(aktual)}$$

$$m_{motive\ steam(aktual)} = \frac{2,4583 \frac{kg}{s}}{0,58}$$

$$m_{motive\ steam(aktual)} = 4,2385 \frac{kg}{s}$$

Hasil perhitungan konsumsi uap kering GRS Train C dengan DAE maksimum ditunjukkan pada tabel 4.

TABEL IV.
HASIL PERHITUNGAN KONSUMSI UAP KERING GRS TRAIN C

	$m_{motive\ steam} \text{ (kg/s)}$
1 st Stage Ejector	3,472
2 nd Stage Ejector	4,238
Total	7,710

IV. SIMPULAN

Dari penelitian mengenai analisis kapasitas dan kemampuan hisap GRS yang telah dilakukan, dapat disimpulkan:

1. Melalui analisis perhitungan pada penelitian ini, diketahui bahwa GRS Train C dapat beroperasi pada kondisi desain dengan DAE maksimum. Hal ini didasarkan pada pertimbangan bahwa GRS Train C dapat menghisap beban NCG sejumlah 1% dari total seluruh uap kering.
2. Bila jumlah beban NCG turun hingga 50% dari nilai desain yang telah ditentukan, maka penggunaan GRS *Single Train* dapat dilakukan melalui penggunaan GRS Train C.
3. Dengan pengoperasian GRS Train C saja, konsumsi uap kering dengan beban sama dengan jumlah GRS Train A dan B berdasarkan perhitungan lebih hemat hingga 4,78 kg/s – 6,064 kg/s uap kering.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Teke, M.A., "Guidelines for Optimum Gas Extraction System Selection", Master Thesis, Dept. Mech. Eng. and Comp. Sci., University of Iceland, Reykjavik, 2011.
- [2] Richardson, J.C. and Devinney J., Optimization of Hybrid Noncondensable Gas Removal System for a Flash Steam Geothermal Power Plant, GRC Transaction, vol. 38, 2014.

- [3] H. Geremew, "A study of thermodynamic modelling and gas extraction system design for Aluto Langano geothermal power plant II in Ethiopia," 2012.
- [4] *HEI Standard for Steam Jet Vacuum System*, HEI Standard 5th ed, 2000.
- [5] J. Lines and R. Smith, "Ejector system troubleshooting: part I," INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROCARBONENGINEERING, vol. 2, pp. 69-78, 1997.