

## ANALISIS EKSERGI SIKLUS KOMBINASI TURBIN GAS-UAP UNIT PLTGU INDERALAYA

Dyos Santoso<sup>1\*</sup> dan Hasan Basri<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, Jl. Raya Inderalaya  
Km.32, Inderalaya

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, Jl. Raya Inderalaya  
Km.32, Inderalaya

\*Korespondensi Pembicara. Phone: +62 711 580272, Fax: +62 711 580272  
Email: dyos\_santoso@yahoo.co.id

### ABSTRAK

Pada umumnya, sumber energi untuk sistem-sistem pembangkit tenaga gas/uap berkapasitas besar didominasi oleh bahan bakar fosil yang saat ini persediaannya semakin menipis dan aplikasinya selalu menciptakan emisi gas-gas rumah kaca. Sebagai konsekuensinya, perancangan dan pengoperasian sistem pembangkit tenaga yang baik menjadi sangat penting sehingga konsumsi energi dan emisi gas-gas rumah kaca dapat dikurangi. Analisis eksergi merupakan piranti yang menarik untuk memenuhi kebutuhan ini karena dapat mengidentifikasi lokasi irreversibilitas atau kerugian eksergi dan tingkat ketidakefisienan dari sistem pembangkit tenaga. Dengan demikian analisis eksergi memberikan informasi yang diperlukan untuk meningkatkan sistem pembangkitan tenaga secara sistematis dan efisien. Sebagai studi kasus, metoda ini diimplementasikan pada siklus kombinasi pembangkit gas-uap yang ada di Unit PLTGU Inderalaya, Sumatera Selatan. Hasil studi memperlihatkan bahwa komponen yang memberikan kontribusi terbesar terhadap pemusnahan eksergi adalah ruang bakar. Persentase rasio pemusnahan eksergi pada masing-masing komponen terhadap pemusnahan eksergi total maksimum diperoleh pada ruang bakar (59,76%), diikuti oleh HRSG (13,19%), turbin gas (9,74%), kompresor (7,39%), turbin uap (7,06%), kondensor (2,71%) dan kemudian pompa (0,15%). Eksergi yang dibawa oleh gas buang ke atmosfer (4,0% dari eksergi total bahan bakar) dianggap sebagai suatu kerugian. Sedangkan besarnya efisiensi eksergetik keseluruhan dari siklus kombinasi turbin gas-uap masih relatif rendah (38,4%).

**Keywords:** Analisis eksergi, Efisiensi eksergetik, HRSG, pemusnahan eksergi, siklus kombinasi turbin gas-uap.

### 1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan energi yang paling penting dalam pembangunan suatu Negara. Hal ini terlihat dari besarnya jumlah konsumsi listrik yang diperlukan perkapita negara setiap tahunnya, dengan ketersediaan sumber energi dan adanya teknologi yang dapat mengubah sumber energi menjadi bentuk yang bermanfaat bagi masyarakat, merupakan salah satu faktor pendukung dalam penyediaan tenaga listrik tersebut. Di Indonesia dengan peningkatan penduduknya yang signifikan pertahunnya, peningkatan kebutuhan terhadap listrik yang tinggi juga tidak dapat dielakkan lagi.

PT.PLN (persero) sebagai perusahaan Negara yang mengelola pendistribusian listrik sering kewalahan dengan peningkatan konsumsi listrik itu sendiri. Sehingga sering kita dengar pemadaman listrik yang bergilir dan kendala-kendala lainnya.

Seiring dengan peningkatan konsumsi listrik tersebut, masalah baru yang dihadapi ialah menipisnya sumberdaya alam yang dijadikan sebagai sumber energi khususnya sumberdaya alam yang tak dapat diperbaharui (fosil). Hal ini dikarenakan pemakaian sumber energi tersebut secara terus menerus. Semua itu seringkali muncul dalam pemberitaan dari pemerintah Indonesia maupun dari LSM-LSM terkait yang menyatakan bahwa persediaan sumber energi tak terbarukan (fosil) setiap tahunnya menurun dan perlu pemaamfaatan yang lebih efisien. Oleh karena beberapa alasan itulah, pada tahun belakangan ini analisis eksergi banyak menarik perhatian para ilmuwan dan perancang sistem. Ada beberapa yang mencurahkan studi-studinya pada analisis eksergi komponen dan peningkatan efisiensi.

Dasar dari analisis eksergi pertama kali dikenalkan oleh Carnot pada tahun 1824 dan Clausius pada tahun 1865. Penelitian menggunakan analisis eksergi itu sendiri telah dilakukan pada akhir abad ke-19. Pada tahun 1889 Gouy meneliti tentang konsep eksergi dari *useable energi* (energi yang berguna) untuk sistem tertutup. Dalam konsep ini juga dinyatakan bahwa energi yang hilang selama proses sama dengan perubahan entropi proses itu. Pada tahun 1898, dengan menggunakan konsep yang sama dengan Gouy, Stodala mengembangkan proses untuk aliran yang mantap. Kemudian konsep ini terus dikembangkan melalui penelitian-penelitian selanjutnya. Baru pada tahun 1939. Bosjankovic mulai mengembangkannya dengan mempublikasikan dua paper yang mengembangkan konsep Hukum Kedua Termodinamika. Paper ini menjadi begitu penting bagi perkembangan konsep eksergi.

Penggunaan kata "*exergy*" itu sendiri dikenalkan pertama kali oleh Bosjankovic pada tahun 1960, Trepp pada tahun 1961, dan Baehr tahun 1962, dan sejak itu "*exergy*" mulai dikenalkan sebagai "*work capacity*" atau "*available work*".

Trep (1961) meneliti kehilangan eksergi pada mesin pendingin yang dipublikasikan oleh *Cyrogenic Engineering Confrence* di Ann Arbor, Michigan USA. Trep menggunakan *exergy losses* untuk mengembangkan optimasi desain *cycle refrigerator*.

Brodyanskii (1965) mengkaji aplikasi eksergi pada sistem pengembunan udara, hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi eksergi lebih kecil daripada efisiensi energi, lokasi dari kerugian-kerugian terbesar juga berbeda antara analisis energi dan analisis eksergi ini. Demikian hal juga dengan Kun dan Ranov (1965) yang mendiskusikan efisiensi mesin ekspansi temperatur rendah, juga hasilnya menunjukkan bahwa kerugian yang dianalisis dengan menggunakan analisis energi berbeda dengan menggunakan analisis eksergi.

Kotas (1985), melakukan penelitian menggunakan metoda analisis eksergi pada pabrik kimia yang dipublikasikan oleh *Chemical Engineering Res.* Hendrik (1984) menganalisa eksergi menggunakan simulasi diagram alir yang diaplikasikan pada pabrik produksi gas sintesa dari gas alam. Ahmed et al (1996) menganalisa eksergi pada sistem pendinginan udara. Goran Wall dan Mel Gong (1997) menganalisa eksergi sekaligus mengoptimasi secara termoekonomi proses secara umum. Love Grove et al (1998) menganalisa eksergi pada proses sintesa amoniak dengan menggunakan tenaga matahari sebagai sumber tenaga penggerak pada sistem penukar kalor, sehingga didapatkan performansi yang terbaik dengan minimum kerugian eksergi.

Di Jepang, pada tahun 1985, dari total aliran sumber daya energi dan material sebesar  $18 \times 10^{18}$  Joule, hanya 21% yang dapat dimanfaatkan, ini memicu kajian tentang sistem pengisolasian panas yang baik pada penggunaan pemanas ruangan dan pengkondisian udara. Hal yang sama juga terjadi di Swedia pada tahun 1994, dari total aliran energi sebesar  $2,72 \times 10^{18}$  Joule, hanya 14% yang mencapai penggunaan akhir. Apabila penggunaan energi nuklir hanya 0,65% dan bahan bakar fosil kurang dari 10% yang dapat dimanfaatkan.

Di Indonesia sendiri sebagian pembangkit tenaga listrik yang berkapasitas besar menggunakan sumber energi fosil tersebut seperti PLTU dan PLTG. Sehingga efisiensi sistem pembangkit tersebut haruslah diperhitungkan, guna menjamin penggunaan sumber bahan bakar yang lebih efisien untuk mengimbangi peningkatan konsumsi listrik pada masa yang akan datang.

Dalam penelitian ini, studi kasus analisis eksergi ini diterapkan pada siklus kombinasi sistem pembangkit gas-uap yang ada di PT. PLN (persero) Pembangkitan Sumbagsel Sektor Pembangkitan Keramasan Unit PLTGU Inderalaya. Studi ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dari Siklus Kombinasi Turbin Gas-Uap tersebut termasuk komponen-komponennya, serta mengidentifikasi bagian-bagian dari komponen sistem turbin gas ini yang mengalami kerugian paling besar dan berpotensi untuk ditingkatkan. Sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam mengambil langkah-langkah yang perlu dilakukan untuk meningkatkan peformansi dari sistem tersebut.

## 2. ANALISIS TEORITIKAL

### 2.1. Analisis Energi

Termodinamika dasar yang diterapkan dalam studi kasus ini adalah untuk mencari sifat-sifat termodinamika pada masing-masing keadaan dan energi termal pada setiap proses. Dalam analisis, proses-proses dipertimbangkan sebagai aliran stedi keadaan stedi (*steady state steady flow*). Sebagai tambahan efek energi kinetik dan energi potensial diabaikan. Untuk gas ideal, formulasi yang digunakan memperhitungkan variasi entalpi dan entropi absolut terhadap temperatur untuk berbagai substansi.

Untuk proses aliran stedi keadaan stedi, neraca laju energi volume atur dapat ditulis sebagai:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{C.V} + \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{V_i^2}{2} + g \cdot z_i \right) \\ = \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + g \cdot z_e \right) + \dot{W}_{C.V} \end{aligned} \quad (1)$$

Perubahan entropi antara dua keadaan untuk gas ideal ditulis sebagai (Bejan et al., 1996):

$$\begin{aligned} \bar{s}(T_2, p_2) - \bar{s}(T_1, p_1) \\ = \bar{s}^0(T_2) - \bar{s}^0(T_1) - \bar{R} \ln \frac{p_2}{p_1} \end{aligned} \quad (2)$$

Entalpi dan entropi untuk campuran gas ideal dapat ditentukan sebagai penjumlahan sifat masing-masing komponen gas, asalkan kontribusi dari setiap gas dievaluasi pada kondisi dimana gas berada dalam campuran (Bejan et al., 1996). Jadi:

$$H = \sum_{k=1}^N n_k \bar{h}_k \quad \text{atau} \quad \bar{h} = \sum_{k=1}^N x_k \bar{h}_k \quad (3)$$

$$S = \sum_{k=1}^N n_k \bar{s}_k \quad \text{atau} \quad \bar{s} = \sum_{k=1}^N x_k \bar{s}_k \quad (4)$$

Entalpi gas ideal hanya tergantung pada temperatur, suku  $\bar{h}$  yang nampak pada persamaan di atas dievaluasi pada temperatur campuran. Entropi adalah fungsi dari dua sifat bebas. Oleh karena, suku  $\bar{s}_k$  dievaluasi baik pada temperatur dan volume campuran atau temperatur campuran maupun pada tekanan parsial komponen  $p_k$  (Bejan et al., 1996). Jadi untuk entropi berlaku:

$$S = \sum_{k=1}^N n_k \cdot \bar{s}_k(T, x_k, p) \quad (5)$$

Berat molekul campuran  $M$  ditentukan berdasarkan berat molekul-molekul komponen  $M_k$  sebagai berikut:

$$M = \sum_{k=1}^N x_k \cdot M_k \quad (6)$$

Hukum Termodinamika Ketiga berkenaan dengan entropi zat pada temperatur nol absolut, dan pada dasarnya menyatakan bahwa entropi kristal sempurna adalah nol pada nol absolut. Fakta yang berhubungan dengan hukum termodinamika ketiga adalah bahwa hukum ini memberikan dasar absolut untuk ukuran entropi setiap zat. Entropi relatif terhadap dasar ini disebut entropi absolut.

Bilamana entropi absolut diketahui pada keadaan standar, entropi spesifik pada titik-titik lainnya dapat diperoleh dengan menambahkan perubahan entropi antara dua keadaan pada entropi absolut pada keadaan standar. Cara yang sama bila entropi absolut diketahui pada tekanan  $p_{ref}$  dan temperatur  $T$ , entropi absolut pada temperatur yang sama dan tekanan  $p$  berapapun dapat diperoleh dari:

$$\bar{s}(T, p) = \bar{s}^0(T) - \bar{R} \cdot \ln \frac{p}{p_{ref}} \quad (\text{gas ideal}) \quad (7)$$

Entropi komponen campuran gas ideal  $k^{th}$  dievaluasi pada temperatur campuran  $T$  dan tekanan parsial  $p_k$ . Untuk komponen campuran gas ideal  $k^{th}$ , persamaan (7) dapat ditulis menjadi:

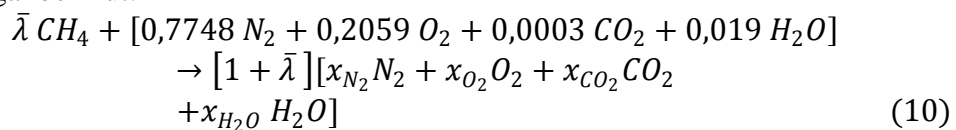
$$\bar{s}_k(T, p) = \bar{s}^0(T) - \bar{R} \cdot \ln \frac{x_k \cdot p}{p_{ref}} \quad (8)$$

Udara atmosfer dapat dianggap terdiri dari udara kering dan uap air. Analisis molar udara (%) adalah: 77.48  $N_2$ , 20.59  $O_2$ , 0.03  $CO_2$ , 1.90  $H_2O_{(g)}$ .

Dengan menyatakan rasio bahan bakar udara sebagai  $\bar{\lambda}$ , laju aliran molar bahan bakar, udara, dan produk pembakaran dihubungkan oleh:

$$\frac{\dot{n}_f}{\dot{n}_a} = \bar{\lambda}, \quad \frac{\dot{n}_p}{\dot{n}_a} = 1 + \bar{\lambda} \quad (9)$$

dimana subskrip  $f$ ,  $p$ , dan  $a$  masing-masing menyatakan bahan bakar, produk pembakaran, dan udara. Untuk pembakaran sempurna dari metana, persamaan kimia adalah sebagai berikut:



Neraca karbon, hydrogen, dan nitrogen, fraksi mol dari komponen-komponen produk pembakaran adalah:

$$\begin{aligned}x'_{N_2} &= \frac{0.7748}{1 + \bar{\lambda}}, & x'_{O_2} &= \frac{0.2059 - 2\bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}} \\x'_{CO_2} &= \frac{0.0003 + \bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}}, & x'_{H_2O} &= \frac{0.019 + 2\bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}}\end{aligned}\quad (11)$$

## 2.2 Analisis Eksergi

Dengan tidak adanya efek-efek nuklir, magnetik, elektikal, tegangan permukaan, eksergi total suatu sistem dapat dibagi menjadi empat komponen: eksergi fisik  $E^{PH}$ , eksergi kinetik  $E^{KN}$ , eksergi potensial  $E^{PT}$ , dan eksergi kimia  $E^{CH}$  (Bejan et al., 1996):

$$E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH} \quad (12)$$

Persamaan (12) dapat dinyatakan dengan basis unit massa :

$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH} \quad (13)$$

Eksergi kinetik dan eksergi potensial adalah sebagai berikut :

$$e^{KN} = \frac{1}{2}V^2 \quad \text{dan} \quad e^{PT} = g \cdot z \quad (14)$$

Komponen eksergi fisik yang menyertai arus/aliran suatu zat adalah:

$$e^{PH} = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (15)$$

dimana :  $i$  = Mengacu pada titik-titik keadaan (*state*)

Eksergi fisik untuk gas ideal (Kotas, 1985) :

$$\dot{E}^{PH} = C_p \left( T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + \bar{R}T_0 \ln \frac{p}{p_0} \quad (16)$$

Dalam mengevaluasi eksergi fisik untuk gas-gas ideal, beberapa pertimbangan khusus harus diperhitungkan. Bila suatu campuran gas ideal yang mengandung  $H_2O_{(g)}$  didinginkan pada tekanan konstan di bawah temperatur titik embun, pengkondensasian uap air akan terjadi. Misalkan bahwa suatu campuran gas ideal yang terdiri dari  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ , dan  $H_2O_{(g)}$  dan fraksi molnya masing-masing adalah  $x_{N_2}$ ,  $x_{O_2}$ ,  $x_{CO_2}$ ,  $x_{H_2O_{(g)}}$ . Pada kondisi atmosferik, campuran dapat terdiri dari  $N_2$ ,  $O_2$ , dan  $CO_2$ , beserta uap air jenuh yang berada dalam kesetimbangan dengan cairan jenuh. Tekanan parsial uap air akan sama dengan tekanan jenuh. Jumlah uap air setelah proses kondensasi,  $x_v$ , dapat diperoleh seperti berikut ini.

$$P_{sat}(T_0) = \frac{x_v}{x_{N_2} + x_{O_2} + x_{CO_2} + x_v} \cdot P_0 \quad (17)$$

Dengan menyusun kembali persamaan (17) selanjutnya diperoleh:

$$x_v = \frac{(1 - x_{H_2O_{(g)}}) \cdot P_{sat}(T_0)}{P_0 - P_{sat}(T_0)} \quad (18)$$

Jadi komposisi baru akan terdiri dari  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ , dan  $H_2O_{(g)}$  dan  $H_2O_{(l)}$ , dengan fraksi mol masing-masing adalah  $x_{N_2}$ ,  $x_{O_2}$ ,  $x_{CO_2}$ ,  $x_v$  dan  $(1 - x_{N_2} - x_{O_2} - x_{CO_2} - x_v)$ .

Kemudian,  $h_0$  dapat dihitung dengan menggunakan komposisi baru sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \bar{h}_o &= x_{N_2} \bar{h}_{N_2} + x_{O_2} \bar{h}_{O_2} + x_{CO_2} \bar{h}_{CO_2} + x_V \bar{h}_{H_2O(g)} \\ &+ (1 - x_{N_2} - x_{O_2} - x_{CO_2} - x_V) \bar{h}_{H_2O(l)} \end{aligned} \quad (19)$$

Pada persamaan (19) suku-suku entalpi dihitung pada temperatur atmosferik.

Fraksi mol komponen fase gas adalah:

$$x'_{N_2} = \frac{x_{N_2}}{x_{N_2} + x_{O_2} + x_{CO_2} + x_V} \quad (20)$$

$$x'_{O_2} = \frac{x_{O_2}}{x_{N_2} + x_{O_2} + x_{CO_2} + x_V} \quad (21)$$

Fraksi mol  $CO_2$  dan  $H_2O_{(g)}$  pada fase gas ditulis dengan cara yang sama. Kontribusi  $N_2$  terhadap  $s_o$  dievaluasi pada  $T_o$  dan tekanan parsial  $x'_{N_2} \cdot p_o$

$$\bar{s}_{N_2}(T_o, x'_{N_2} \cdot p_o) = \bar{s}_{N_2}^o(T_o) - \bar{R} \cdot \ln \frac{x'_{N_2} \cdot p_o}{p_{ref}} \quad (22)$$

Kontribusi komponen lainnya dapat ditulis dengan cara yang sama. Oleh karena itu,  $s_o$  dapat dihitung dengan menggunakan komposisi yang sama seperti yang digunakan dalam perhitungan  $h_o$ .

$$\begin{aligned} s_o &= x_{N_2} \bar{s}_{N_2} + x_{O_2} \bar{s}_{O_2} + x_{CO_2} \bar{s}_{CO_2} + x_V \bar{s}_{H_2O(g)} \\ &+ (1 - x_{N_2} - x_{O_2} - x_{CO_2} - x_V) \bar{s}_{H_2O(l)} \end{aligned} \quad (23)$$

Eksergi kimia adalah komponen eksergi yang terkait dengan perbedaan komposisi kimia dari suatu sistem dengan yang dimiliki lingkungan. Tabel eksergi kimia molar standar tersedia pada beberapa literatur. Sebagai contoh tabel pada (Kotas, 1985) memberikan nilai-nilai untuk kondisi atmosferik pada 298,15 K dan 1,01325 bar. Dan juga tabel pada (Moran, 1982) memberikan nilai-nilai untuk kondisi pada 298,15 dan 1 atm. Menurut (Bejan et al., 1996) jika kondisi-kondisi lingkungan dari sistem sedikit berbeda daripada kondisi yang digunakan pada tabel, tabel tersebut masih dapat digunakan.

Untuk air, tabel eksergi kimia standar dapat digunakan untuk kondisi-kondisi atmosferik. Untuk kondisi di luar atmosferik, formulasi berikut ini dapat dipergunakan:

$$\bar{e}^{CH} = \bar{R} \cdot T_o \cdot \ln \frac{p_{sat}(T_o)}{x_{oH_2O} \cdot p_o} \quad (24)$$

Untuk campuran gas ideal, formulasi berikut ini dapat digunakan:

$$\bar{e}^{CH} = -\bar{R} \cdot T_o \cdot \sum x_k \cdot \ln \frac{x_{ok}}{x_k} \quad (25)$$

Persamaan (25) dapat dinyatakan sebagai (Ahern, 1980) :

$$\bar{e}^{CH} = \sum x_k \cdot \bar{e}_k^{CH} + \bar{R} \cdot T_o \cdot \sum x_k \cdot \ln x_k \quad (26)$$

Dalam hal bila pertimbangan kondensasi di atas harus diperhitungkan, suku  $x_k$  pada persamaan (25) dan (26) harus diganti dengan  $x'_k$  untuk mendapatkan kontribusi fase gas terhadap eksergi kimia. Kontribusi fase air terhadap eksergi kimia dapat dihitung

dari persamaan persamaan (24) atau tabel. Oleh karena itu, eksergi kimia dapat dihitung dengan menambahkan kontribusi tersebut sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \bar{e}^{CH} = & (x_{N_2} + x_{O_2} + x_{CO_2} + x_V) \cdot \bar{e}_{gas}^{CH} \\ & + (1 - x_{N_2} - x_{O_2} - x_{CO_2} - x_V) \cdot \bar{e}_{liq}^{CH} \end{aligned} \quad (27)$$

Untuk bahan bakar hidrokarbon,  $C_aH_b$ , tabel eksergi kimia standar dapat digunakan. Hubungan yang paling akurat untuk eksergi kimia bahan bakar dapat ditetapkan sebagai berikut (Moran, 1982).

$$\begin{aligned} \bar{e}_F^{CH} = & \left[ \bar{h}_F + \left( a + \frac{b}{4} \right) \cdot \bar{h}_{O_2} - a \cdot \bar{h}_{CO_2} - \frac{b}{2} \cdot \bar{h}_{H_2O(g)} \right] (T_o, P_o) - T_o \\ & \cdot \left[ s_F + \left( a + \frac{b}{4} \right) \cdot s_{O_2} - a \cdot s_{CO_2} - \frac{b}{2} \cdot s_{H_2O(g)} \right] (T_o, P_o) \\ & + R \cdot T_o \cdot \ln \left[ \frac{(x_{o,O_2})^{a+b/4}}{(x_{o,CO_2})^a \cdot (x_{o,H_2O(g)})^{b/2}} \right] \end{aligned} \quad (28)$$

Suatu formulasi pendekatan untuk eksergi kimia bahan bakas gas hidrokarbon diberikan sebagai berikut (Moran, 1982):

$$\frac{\bar{e}_F^{CH}}{LHV} \cong 1,033 + 0,0169 \frac{b}{a} - \frac{0,0698}{a} \quad (29)$$

Eksesrgi kimia bahan bakar gas hidrokarbon dapat juga diperoleh dari hubungan berikut (Bejan et al., 1996):

$$\dot{E}^{CH} = \dot{m} \bar{e}^{CH} \quad (30)$$

dimana nilai eksergi kimia molar standar  $\bar{e}^{CH}$  dapat diperoleh dari Tabel C.2 (Bejan et al., 1996).

Bentuk keadaan stedi dari neraca eksergi volume atur (Bejan et al., 1996).

$$0 = \sum_j \left( 1 - \frac{T_o}{T_j} \right) \cdot \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{m}_i \cdot e_i - \sum_e \dot{m}_e \cdot e_e - \dot{E}_D \quad (31)$$

Suku terakhir pers. (31),  $\dot{E}_D$  sama dengan  $T_o \cdot \dot{S}_{gen}$  dari Dalil Guoy-Stodola.

Laju eksergi yang dimusnahkan pada komponen sistem dapat dibandingkan dengan laju eksergi bahan bakar yang diberikan ke dalam sistem keseluruhan,  $\dot{E}_{F,tot}$  memberikan rasio pemusnahan eksergi:

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{F,tot}} \quad (32)$$

Sebagai alternatif, laju pemusnahan eksergi komponen dapat dibandingkan dengan laju pemusnahan eksergi total di dalam sistem,  $\dot{E}_{D,tot}$  memberikan rasio:

$$y_D^* = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{D,tot}} \quad (33)$$

Rasio kerugian eksergi didefinisikan sebagai:

$$y_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_{F,tot}} \quad (34)$$

Efisiensi eksergetik dari suatu komponen atau sistem dapat diberikan sebagai:  $y_D$

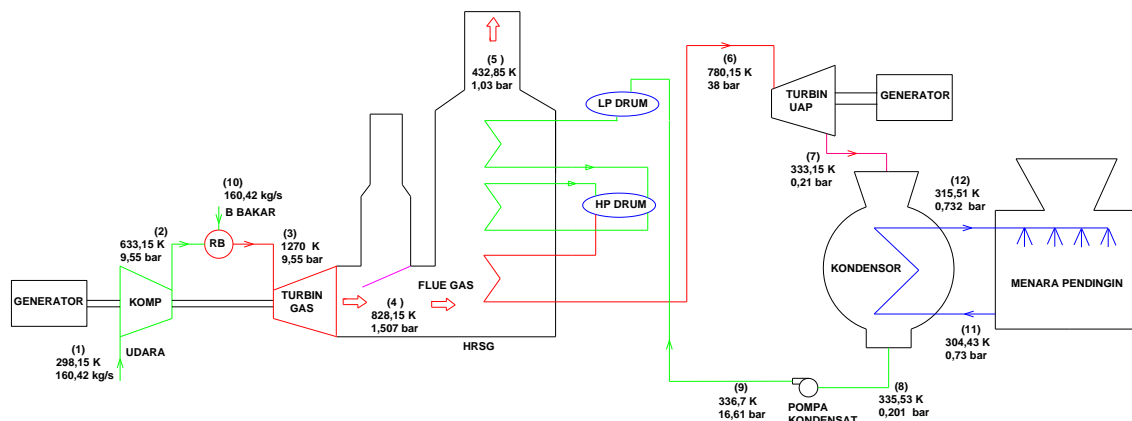
$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F} \quad (35)$$

Efisiensi eksergetik keseluruhan dari suatu sistem dapat sebagai:

$$\varepsilon = 1 - \sum y_D - \sum y_L \quad (36)$$

### 3. DESKRIPSI SISTEM

Skematik instalasi pembangkit Tenaga Gas-Uap Inderalaya dan kondisi operasinya ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1. Instalasi Siklus Kombinasi Turbin Gas-Uap PLTGU Inderalaya

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil

#### 4.1.1 Analisis Energi

Setelah dilakukan pengolahan terhadap data maka didapatkan rasio bahan bakar udara,  $\bar{\lambda}$  diperoleh ialah 0,029. Analisis molar produk pembakaran adalah: 75,29% N<sub>2</sub>, 14,37% O<sub>2</sub>, 2,85% CO<sub>2</sub>, 7,49% H<sub>2</sub>O.

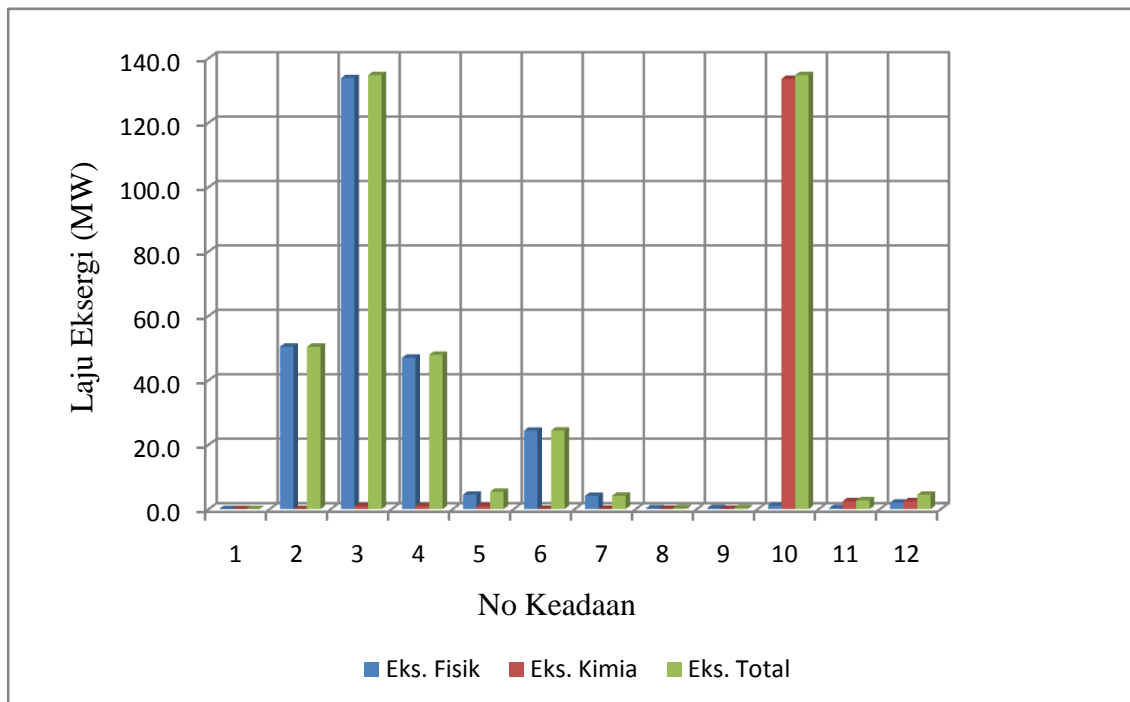
#### 4.1.2 Analisis Eksergi

Pengolahan data dari sistim pembangkit gas dan uap (PLTGU) dilakukan dengan menggunakan persamaan-persamaan yang diberikan pada bagian terdahulu. Pemusnahan eksergi didapatkan dari menggunakan neraca eksergi. Hasil dari laju eksergi pada sistim dan laju pemusnahan eksergi dapat terlihat pada tabel berikut.



**Tabel 4.1**  
Eksergi Dari Masing-Masing Keadaan

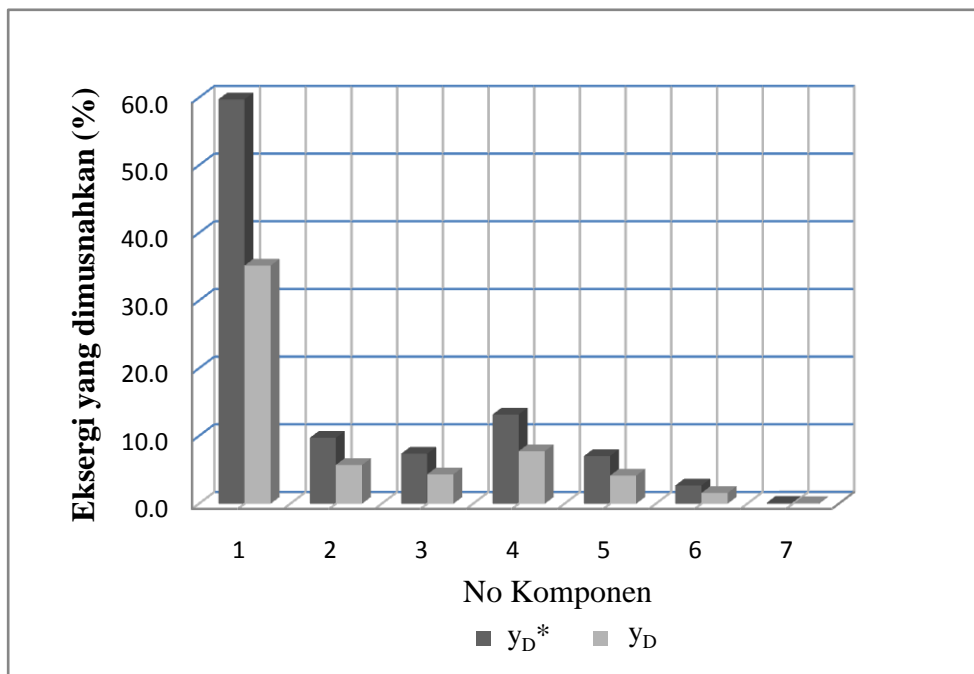
Kondisi	Substansi	Laju eksergi [MW]		
		$\dot{E}^{PH}$	$\dot{E}^{CH}$	$\dot{E}$
1	Udara masuk kompresor	0,0000	0,0000	0,0000
2	Udara keluar kompresor	50,4180	0,0000	50,4180
3	Produk pembakaran masuk turbin	133,8030	0,9340	134,7370
4	Produk pembakaran keluar turbin	46,9820	0,9340	47,9160
5	Produk pembakaran keluar HRSG	4,4540	0,9340	5,3880
6	Uap keluar HRSG	24,3440	0,0450	24,3890
7	Uap keluar turbin	4,1130	0,0450	4,1580
8	Air masuk pompa kondensat	0,2450	0,0450	0,2900
9	Air keluar pompa kondensat	0,2580	0,0450	0,3030
10	Metana masuk ruang bakar	1,1350	133,5980	134,7330
11	Air sirkulasi masuk kondensor	0,2927	2,4314	2,7241
12	Air meninggalkan kondensor	2,0120	2,4314	4,4434



**Gambar 4.1.** Laju Eksergi Pada Sistem Gas-Uap (PLTGU)

**Tabel 4.2**  
Eksergi yang dimusnahkan pada masing-masing komponen sistem

No. komponen	komponen	Eksergi yang dimusnahkan ( $\dot{E}_D$ )		
		[MW]	$y_D^*$ (%)	$y_D$ (%)
1	Ruang bakar	47,41	59,76	35,19
2	Turbin gas	7,73	9,74	5,74
3	Kompresor	5,87	7,39	4,35
4	HRSG	10,46	13,19	7,77
5	Turbin uap	5,60	7,06	4,15
6	Kondensor	2,15	2,71	1,59
7	Pompa	0,12	0,15	0,09
8	Keseluruhan	79,34	100,00	58,89



Gambar 4.2. Eksergi yang dimusnah pada tiap komponen sistem gas-uap (PLTGU)

#### 4.4 Pembahasan

Ringkasan hasil analisis eksergi untuk sistem pembangkit tenaga listrik pada PLTGU Inderalaya disajikan pada Tabel 4.1 dan 4.2 serta Gambar 4.1 dan 4.2. Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 i memperlihatkan laju eksergi pada setiap keadaan dimana total eksergi yang tersedia pada bahan bakar sebesar 134,7330 MW.

Pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.2. nampak jelas bahwa bagian terbesar pemusnahan eksergi terjadi pada ruang bakar, yaitu sebesar 59,76 %, yang merupakan penyebab utamanya adalah proses pembakaran. Kemudian berturut-turut diikuti oleh HRSG (13,19%), turbin gas (9,74%), kompresor (7,39%), turbin uap (7,06%), kondensor (2,71%), dan pompa (0,15%). Pemusnahan eksergi pada komponen-komponen tersebut berasal dari satu atau beberapa dari ketiga jenis irreversibilitas utama yang terkait, masing-masing adalah reaksi pembakaran, perpindahan kalor dan gesekan.

Ketiga jenis irreversibilitas tersebut terjadi pada ruang bakar, dimana reaksi kimia merupakan sumber pemusnahan eksergi yang paling signifikan, yang berhubungan dengan perpindahan kalor dari aliran ke aliran. Pemusnahan eksergi pada turbin gas dan kompresor adiabatik terutama disebabkan oleh gesekan.

Pada hakekatnya, pembakaran merupakan sumber irreversibilitas yang paling signifikan, dan pengurangan secara dramatis efeknya pada pemusnahan eksergi dengan cara-cara konvensional tidaklah dapat diharapkan. Sampai saat ini, cara yang paling dikenal untuk meningkatkan efisiensi pembakaran adalah dengan pra-pemanasan udara pembakaran, mengurangi rasio bahan bakar dan udara. Pemusnahan eksergi pada turbin dan kompresor dapat berkurang bila gesekan dikurangi. Pertimbangan-pertimbangan yang diuraikan sebelumnya memberikan dasar untuk mengimplementasikan langkah-langkah rekayasa praktis untuk peningkatan performansi sistem turbin gas. Akan tetapi langkah-langkah yang demikian itu harus diterapkan secara bijaksana. Langkah-langkah peningkatan performansi termodinamika pada suatu komponen dapat saja memberikan efek yang berlawanan, tidak mengarah ke peningkatan bersih secara keseluruhan. Selain itu, langkah-langkah untuk meningkatkan performansi termodinamika selalu mempunyai konsekuensi ekonomi. Hal ini tentunya memerlukan pertimbangan-pertimbangan baik dari sisi termodinamika maupun dari sisi ekonomi.

Siklus kombinasi gas-uap yang mana pemanfaatan panas dari gas buang dari turbin gas untuk dimanfaatkan lagi sehingga efisiensi siklus akan lebih tinggi daripada siklus turbin gas sederhana. Hal ini terlihat dari efisiensi eksergetik siklus turbin gas sederhana (siklus Brayton) yang hanya 29,3%, setelah dikombinasikan, efisiensi siklus kombinasi gas – uap meningkat menjadi 38%..

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Keampuhan analisis eksergi untuk evaluasi performansi instalasi pembangkit tenaga telah dibuktikan. Analisis eksergi pada Instalasi pembangkit tenaga listrik PLTGU Inderalaya telah dilaksanakan serta lokasi-lokasi dan besarnya kerugian eksergi, pembuangan dan pemusnahan pada berbagai proses di seputar instalasi telah diketahui. Sebagai tambahan, analisis eksergi mampu menemukan tingkat ketidakefisienan suatu proses. Dari hasil studi tersebut dapat ditarik kesimpulan:

1. Lokasi terjadi pemusnahan eksergi (*exergy destruction*) yang paling tinggi terjadi pada ruang bakar yang nilainya sebesar 47,41 [MW] atau jika dipersentasakan dengan total eksergi bahan bakar yang masuk kedalam sistem ialah 35,19%, dan kemudian diikuti oleh HRSG sebesar 10,46 [MW] atau sama dengan 7,77%, dan kompresor sebesar 5,87 [MW] sama dengan 4,35%.
2. Siklus kombinasi meningkatkan efisiensi, jika dibandingkan dengan efisiensi siklus gas sederhana (29,3%) maka efisiensi siklus kombinasi lebih tinggi (38,6%). Selain daripada itu siklus kombinasi turbin gas-uap ini mengurangi emisi termal gas buang dengan pemanfaatan gas buang turbin gas yang temperaturnya masih relatif tinggi sebesar 828,15 K dengan nilai ekserginya 47,9 MW berkurang menjadi menjadi 423,85 K dengan nilai eksergi 5,39 MW yang merupakan kerugian eksergi.

### 5.2 Saran

Berdasarkan analisis eksergi hendaknya pada PLTGU unit Inderalaya dilakukan peningkatan efisiensi pada ruang bakar, yang mana beberapa hal yang mungkin untuk

dilakukan ialah melakukan pra-pemanasan pada udara dari kompresor serta mengurangi rasio bahan bakar dan udara.

Melakukan analisis yang lebih terperinci pada sistim (instalasi) ini hendaknya dilakukan dulu kalibrasi alat ukur secara keseluruhan, dan mengambil data kondisi operasi aktual dan data desain dari sistim. Juga semua alat ukur pada keadaan atau semua parameter hendaklah terpasang.

Analisis peformansi dalam hal peningkatan efisiensi dari sistim PLTGU Indralaya ini maupun ditempat lain harusnya dikaitkan juga dengan nilai-nilai ekonomi, yaitu dengan termoeкономи dan eksergi ekonomi, hal ini dapat menghubungkan operasi dengan biaya operasi dari sistim itu sendiri.

## 6. REFERENCES

- Ahern, J. E. (1980). The exergy method of energy systems analysis. Canada: John Wiley and Sons Inc.
- Bathie, William W. (1984). Fundamentals of gas turbines. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Bejan, A. (1988). Advanced engineering thermodynamics. U.S.A: John Wiley and Sons Inc.
- Bejan, A. (1998). Advanced engineering thermodynamics, 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran M. (1996). Thermal design and optimization. U.S.A: John Wiley and Sons Inc.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A. (2006). Thermodynamics: an engineering approach, 5th ed., Dubuque, Iowa: McGraw-Hill.
- Çolpan, C.Ö. (2005). Exergy analysis of combined cycle cogeneration systems. Middle East Technical University.
- Ebadi, M. J., Gorji-Bandpy, M. (2005). Exergetic analysis of gas turbine plants. Int. J. Exergy, Vol. 2, No. 1.
- Holmberg, H. (2009). Determination of the real loss of power for a condensing and a backpressure turbine by means of second law analysis. Entropy 2009, 11, 702-712.
- Jubeh, N. M. (2005). Exergy analysis and second law efficiency of a regenerative brayton cycle with isothermal heat addition. Entropy 2005. 7[3], 172-187.
- Kotas, T. J. (1985). The exergy method of thermal plant analysis. London: Butterworths.
- Mahmoudi S. M. S., Ranjhar, F., Zare, V (2009). Energy and exergy analysis and regenerative gas turbines inlet air cooling using absorption refrigeration. Journal of Applied Sciences.
- Moran, M. (1982). Availability analysis. Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc.
- Priddy, A. P., Li K. W. (1985). Power plant system design. New York: John Wiley and Sons Inc.