

ANALISA EXERGI SISTEM KOGENERASI SIKLUS KOMBINASI

Ambo Intang

*Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tamansiswa Palembang**Email: ambo.intang@gmail.com*

ABSTRAK

Salah satu sektor pemakai terbesar energi fosil adalah Pusat Listrik Tenaga Gas, sehingga optimalisasi konservasi energi pada pusat listrik ini menjadi signifikan. Untuk mengetahui dimana konservasi energi dapat dilakukan pada peralatan maupun sistem yang ditinjau, hal penting yang harus dilakukan adalah dengan membuat analisis kesetimbangan massa dan kesetimbangan exergi, dan selanjutnya melakukan analisa exergi pada sistem tersebut sehingga dapat diketahui besaran peningkatan efisiensi pemakaian energi bahan bakar. Sistem kogenerasi dapat meningkatkan efisiensi pemakaian bahan bakar, yang tepat dalam hal ini adalah Sistem Kogenerasi Siklus Kombinasi. Pada aplikasinya dapat dilihat pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) yang gas buangnya masih dapat dimanfaatkan untuk pembangkit steam/uap untuk memutar turbin yang selanjutnya berguna untuk pembangkit listrik lanjutan. Analisa exergi dilakukan pada sistem kogenerasi siklus kombinasi pusat pembangkit tenaga gas uap milik PT. PLN PJB Unit Pembangkitan Muara Tawar yang menyuplai listrik untuk sistem Jawa Bali dimana pembangkit listrik ini mempunyai kapasitas 950 MegaWatt yang terdiri dari (5x145 MW Gas Turbine dan 1x225 MW Steam Turbin) . Dari hasil analisa peluang efisiensi pemakaian bahan bakar didapatkan sebesar 77,83%.

Kata Kunci: *Kogenerasi Siklus Kombinasi, Exergi, Exergi Rate, Exergi Loss.*

1. PENDAHULUAN

Usaha-usaha konservasi energi banyak dilakukan yang salah satunya dengan menggunakan kogenerasi. Semenjak krisis minyak dunia energi menjadi topik utama masyarakat baik di tingkat nasional maupun internasional. Energi telah disadari sebagai kebutuhan pokok dan meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi. Selain itu isu lingkungan hidup juga menjadi pendorong pengurangan penggunaan energi fosil (UNEP 2006). Sistem kogenerasi terdiri dari berbagai bentuk tergantung pada sistem pemanfaatan energinya sehingga dapat membangkitkan energi lanjutan yang bisa meningkatkan efisiensi dari pemakain sumber energi tertentu. Salah satu sistem kogenerasi yang bisa meningkatkan efisiensi pemakain bahan bakar adalah Sistem Kogenerasi Siklus Kombinasi yang pada aplikasinya dapat dilihat pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) yang gasbuangnya masih dapat dapat dimanfaataatkan untuk pembangkit steam/uap untuk memutar turbin yang selanjutnya berguna untuk pembangkit listrik lanjutan.

Salah satu sektor pemakai terbesar energi fosil adalah Pusat Listrik Tenaga Gas, sehingga optimalisasi konservasi energi pada pusat listrik ini menjadi signifikan. Untuk mengetahui dimana konservasi energi dapat dilakukan pada peralatan maupun sistem yang ditinjau, hal penting yang harus dilakukan adalah dengan membuat analisis kesetimbangan massa dan kesetimbangan energi, untuk selanjutnya melakukan analisa exergi pada sistem tersebut sehingga dapat diketahui besaran peningkatan efisiensi pemakaian energi bahan bakar.

Analisa exergi dalam hal ini dilakukan pada sistem kogenerasi siklus kombinasi pusat pembangkit tenaga gas uap milik PT. PLN PJB Unit Pembangkitan Muara Tawar yang menyuplai listrik untuk sistem Jawa Bali dimana pembangkit listrik ini mempunyai kapasitas 950 MegaWatt yang terdiri dari (5x145 MW Gas Turbine dan 1x225 MW Steam Turbin). Dari analisa exergi maka dapat diketahui Ireversibilitas masing-masing komponen utama PLTG dan

besarnya exergi yang dapat dimanfaatkan. Dengan mengetahui ireversibilitas masing-masing komponen, analisa pemanfaatan exergi yang terbuang dapat dilakukan dengan baik.

2. METODELOGI

Penelitian ini dilaksanakan pada Sistem Kogenerasi Siklus Kombinasi PT. PLN PJB Unit Pembangkitan Muara Tawar Blok 1. Penentuan lokasi dilakukan dengan pertimbangan bahwa Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan salah satu sektor yang menggunakan energi fosil cukup besar, sebaliknya potensi dilakukan kogenerasi untuk Turbin Gas sangat besar. Analisa energi juga tidak mamapu digunakan sebagai alat analisis karena tidak mampu menunjukkan bahwa energi pasca proses diturbin gas masih mempunyai tingkat kualitas yang berpotensi untuk termanfaatkan, sehingga perlu dilakukan analisa exergi pada sistem ini dengan memodelkannya menjadi sistem kogenerasi siklus kombinasi. Teknologi untuk melakukan ini pun, sampai dengan tingkat komersial sudah tersedia yang dikenal dengan PLTGU.

2.1. Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan berdasarkan prosedur berikut :

1. Mealukan orientasi di Pusat Listrik Tenaga Gas.
2. Pengambilan data operasi diperlukan dari lapangan dan mempelajari spesifikasi turbin gas dari manual book.
3. Mempelajari data-data operasi untuk menentukan kondisi operasi yang akan dievaluasi. Kondisi operasi yang diambil adalah pada beban tertinggi dan temperatur lingkungan yang rata-rata.
4. Melakukan Studi Pustaka
5. Membuat analisa exergi pada turbin gas.

2.2. Studi Pustaka

2.2.1. Pengertian dan Pembagian Kogenerasi

Pembangkit tenaga pada umumnya mempunyai dua permasalahan, pertama efisiensinya rendah kedua mengeluarkan gas buang yang mengandung bahan pencemar. Penurunan efisiensi ini disebabkan karena banyaknya panas yang terkandung dalam gas buang pada peralatan (kondensor) pembangkit (PLTU, PLTD dan PLTG). Untuk memanfaatkan panas pada gas buang dari kondensor yang disebut output termal menjadi pemanas/pendingin digunakan suatu alat yang disebut absorbtion chiller, heat exchanger dan waste heat recovery hal inilah yang disebut Kogenerasi. Atau dengan kata lain kogenerasi adalah suatu pembangkitan berurutan dua bentuk energi berbeda (biasanya energi mekanik dan energi termal) dari satu sumber bahan bakar. Energi mekanik yang dihasilkan selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik, sedangkan energi termalnya bisa digunakan langsung untuk suatu proses ataupun secara tidak langsung untuk menghasilkan uap, air panas atau sumber panas pada alat pendingin (*absorption chiller*).

Dengan konsep kogenerasi, efisiensi energi secara keseluruhan dalam suatu sistem energi bertambah secara signifikan. Dalam beberapa kasus bisa bertambah lebih dari 30% dibanding sistem energi konvensional. Pembangkit Kogenerasi yang menggabungkan panas dan pembangkit listrik dapat menghasilkan efisiensi lebih besar sampai 80%. Pembangkit jenis ini ideal bagi institusi besar seperti universitas, rumah sakit, dan bandar udara, yang membutuhkan energi listrik dan panas dalam jumlah besar, sehingga pada pembangkit kogenerasi energi panas tidak dibuang, tapi digunakan untuk menyediakan energi bagi sistem pemanas/pendingin, bahkan bisa juga digunakan kembali untuk membangkitkan listrik (Hasan 2006).

Sistim kogenerasi biasanya diklasifikasikan menurut urutan penggunaan energi dan skema operasi yang diambil. Pada sistim kogenerasi dasar ini dapat diklasifikasikan sebagai siklus atas atau bawah. Jika ditinjau dari tenaga penggeraknya maka kogenerasi dapat menggunakan berbagai teknologi yang secara garis besar adalah: kogenerasi turbin uap, kogenerasi turbin gas, *combined cycle cogeneration* atau kogenerasi siklus kombinasi dan kogenerasi mesin diesel.

Dari jenis – jenis kogenerasi di atas, kogenerasi siklus kombinasi adalah pilihan yang paling *attractive* untuk pendistribusian di pabrik karena dirasakan lebih efisien.

2.2.2 Kogenerasi Siklus Kombinasi

Kogenerasi ini menggunakan prinsip siklus uap kondensor di mana di dalam kondensat uap panas yang berasal dari air dingin diturunkan kemudian hal ini berakibat meningkatnya energi listrik yang dihasilkannya. Pemilihan sistim siklus kondensasi dan sistim *cogeneration* berdasarkan pertimbangan ekonomis. Seperti perusahaan listrik karena tidak membutuhkan energi termal. Berarti energi termal yang dihasilkan oleh pembangkit listrik akan digunakan untuk meningkatkan produksi listrik untuk itu yang tepat digunakan adalah sistim siklus kombinasi. Yaitu jika siklus gas dikawinkan dengan siklus uap sehingga menjadi siklus kombinasi maka akan menyebabkan terjadinya peningkatan efisiensi. Pada siklus kombinasi itu boiler PLTU dipanaskan hanya oleh gas buang PLTG. Kemudian oksigen dalam pipa pembuangan turbin gas digunakan untuk pembakaran bahan bakar primer dalam suatu sistim boiler uap hilir. Kompresor memasok udara terkompresi ke boiler untuk melakukan proses super canggih, kemudian boiler itu menghasilkan uap yang dapat menggerakkan turbin uap. Selain dari itu panas limbah dari pipa pembuangan turbin gas juga digunakan untuk memanaskan boiler yang akan menghasilkan uap untuk menggerakkan turbin uap. Di mana uap boiler itu digunakan untuk menggerakkan sebuah turbin uap yang pada gilirannya merupakan tenaga penggerak mula bagi sebuah generator listrik. Kemudian jika panas yang keluar dari pipa pembuangan turbin gas dinaikkan dan gas buang yang meninggalkan boiler digunakan untuk memanaskan kondensat yang menuju maka efisiensinya bisa meningkat sampai lebih dari 50% (UNEP 2006).

2.2.3 Konservasi Energi

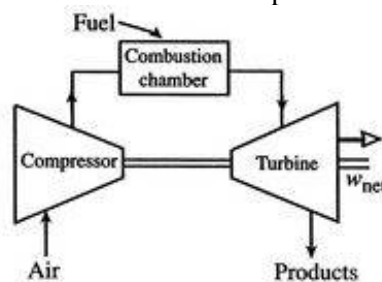
Sebagai langkah awal dari program konservasi energi, khususnya sektor industri, adalah melakukan analisis kesetimbangan exergi. Hal ini merupakan suatu cara dalam mengkaji dan mengetahui dimana dan berapa exergi terpakai secara benar atau terbuang percuma, serta membuat rekomendasi untuk pencegahan atau perbaikannya (Moran et.al 2000).

Dengan melakukan beberapa pengukuran dan pengujian untuk dapat membuat kesetimbangan exergi pada sistem energi, akan didapat ireversibilitas untuk masing-masing fungsi, sehingga dapat diidentifikasi ada atau tidaknya potensi konservasi energi ditinjau dari sisi ekonomis dan teknis.

2.2.4 Konstruksi Turbin Gas

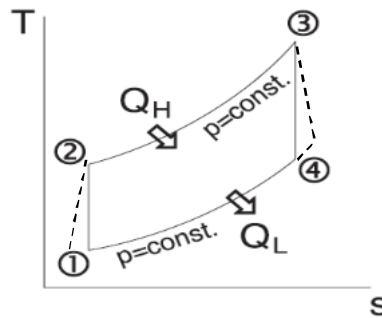
Turbin gas merupakan suatu sistem yang terdiri dari tiga komponen utama, seperti pada Gambar 1, dengan fungsinya masing-masing sebagai berikut :

1. Kompresor; yang berfungsi menghisap dan menaikkan tekanan udara serta memasukkannya ke dalam ruang bakar.
2. Ruang Bakar; di mana udara segar yang dimampatkan oleh kompresor dicampur dengan bahan bakar sehingga terjadi proses pembakaran dan udara terekspansi.
3. Turbin; udara yang terekspansi dalam ruang bakar akan memutar turbin yang energinya digunakan untuk memutar Alternator dan Kompresor.

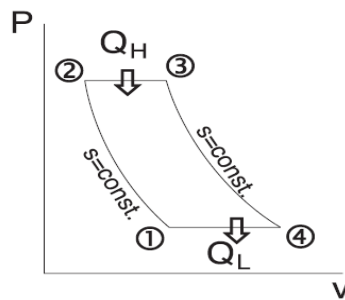


Gambar 1. Diagram Komponen Utama Gas Turbin (UNEP 2006)

Secara keseluruhan kerja ideal turbin gas adalah sesuai dengan siklus Brayton seperti pada gambar 2 dan gambar 3. Pada kenyataannya tidak ada yang benar-benar isentropis pada proses kompresi maupun ekspansi, sehingga proses 1-2 dan 3-4 pada gambar 2 tidak benar-benar tegak lurus tetapi agak miring ke arah s yang lebih besar, seperti yang diperlihatkan dengan garis putus-putus.



Gambar 2. Diagram T-s untuk Siklus Brayton (Moran et.al 2000)



Gambar 3. Diagram P-V untuk Siklus Brayton Ideal (Moran et.al 2000)

2.2.5 Analisa Exergi

Metode analisa exergi dibuat berdasarkan pada hukum termodinamika I dan II. Analisa berdasarkan hukum termodinamika I (analisa energi) didasarkan pada karakteristik unjuk kerja komponen-komponen yang digabung menjadi kesetimbangan energi. Meskipun analisa menghasilkan perhitungan yang benar, akan tetapi analisa energi ini tidak dapat menempatkan dan mengukur sumber-sumber kerugian yang terjadi di dalam sistem. Hal ini karena Hukum Termodinamika I tidak dapat membedakan antara panas dan kerja serta tidak bisa mengukur kualitas energi (Bustan 2010). Pada analisa exergi panas dianggap sebagai energi berkualitas rendah karena tidak semua energi panas dapat dirubah menjadi energi kerja, sebaliknya kerja adalah energi berkualitas tinggi karena dapat diubah menjadi panas seluruhnya (Moran et.al 2000).

- Konsep Dasar Exergi

Untuk menghitung kualitas variabel dari bentuk-bentuk energi yang tidak teratur, diperlukan suatu standar kualitas yang universal. Standar yang paling alami dan sesuai adalah kerja maksimum, yang dihasilkan dari suatu bentuk energi menggunakan parameter lingkungan sebagai keadaan referensi, standar kualitas energi ini disebut exergi (Kotas, 1985)

- Exergi Fisik

Exergi Fisik adalah jumlah maksimum kerja yang dapat diperoleh bila aliran suatu substansi dibawa dari kondisi awal ke keadaan lingkungan yang didefinisikan dengan P_0 dan T_0 , sehingga proses-proses fisik hanya meliputi interaksi thermal dengan lingkungan (Bejan, 1988). Biasanya

analisa proses fisik memerlukan selisih exergi fisika spesifik ϵ_{ph} untuk dua keadaan daripada dengan nilai yang terpisah.

$$\epsilon_{ph1} - \epsilon_{ph2} = (h_1 - h_2) - T_o (s_1 - s_2) \dots\dots\dots(1)$$

Pernyataan exergi fisika spesifik dari suatu gas sempurna adalah :

$$\epsilon_{ph} = c_p^h (T-T_o) - T_o (c_p^s \ln T/T_o - R \ln P/P_o) \dots\dots\dots(2)$$

$$= c_p^h (T-T_o) - T_o c_p^s \ln T/T_o + T_o R \ln P/P_o \dots\dots\dots(3)$$

Untuk suatu campuran gas yang terdiri banyak komponen, sesuai dengan aturan Gibbs-Dalton, persamaan (2) menjadi sebagai berikut

$$\epsilon_{ph} = \sum (x_i (c_{pi}^h (T-T_o) - T_o c_{pi}^s \ln T/T_o)) + T_o R \ln P/P_o \dots\dots\dots(4)$$

- Exergi Kimia

Exergi kimia adalah maksimum kerja yang dapat diperoleh bila suatu subtansi dibawa dari kondisi lingkungan ke kondisi mati (*dead state*) dengan proses-proses yang meliputi perpindahan panas dan perubahan subtansi hanya dengan lingkungan (Bejan, 1988).

Untuk mengetahui potensi kerja (exergi) dari suatu aliran subtansi, dilakukan dengan membandingkan potensial kimia dan lingkungannya. Sifat-sifat elemen kimia aliran harus merujuk pada sifat-sifat subtansi rujukan. Karakter utama subtansi rujukan adalah harus berada dalam kesetimbangan dengan lingkungan. Untuk gas ideal kerja per mol subtansi adalah sama dengan exergi kima molar ϵ_o :

$$\epsilon_o = R T_o \ln P_o/P_{oo} \dots\dots\dots(5)$$

Exergi untuk bahan bakar gas mempunyai komplikasi lebih dari gas ideal karena subtansi ini bukan bagian dari subtansi lingkungan yang umum dalam fungsi Gibbs rendah, yaitu subtansi rujukan. Untuk menyelesaikan hal ini, pemilihan proses reversibel untuk menentukan exergi kimia bahan bakar harus menyertakan suatu reaksi kimia reversibel untuk merubah bahan bakar, dengan bantuan oksigen dari lingkungan, menjadi satu atau lebih subtansi rujukan. Exergi kima molar untuk CO dapat diekspresikan sebagai berikut :

$$(\epsilon_o)_{CO} = - (\Delta G_o)_{CO} + (\epsilon_o)_{CO2} - 1/2 (\epsilon_o)_{O2} \dots\dots\dots(6)$$

Dalam beberapa aplikasi media kerja mengandung campuran beberapa macam gas ideal, misalnya bahan bakar gas, hasil pembakaran dan sebagainya. Misalnya campuran disuplai dengan laju tetap pada kondisi P_o dan T_o . Masing-masing komponen dipisahkan dengan *membrane* semi permabel dan ditekan secara reversibel dan isothermal pada tekanan parsial mulai P_i s/d P_o . Total kerja kompresi per mole dari campuran gas tersebut adalah :

$$\sum [W_{xi}]_{REV} = RT_o \sum x_i \ln x_i \dots\dots\dots(7)$$

Dimana x_i adalah fraksi mol dari komponen ke i, sehingga exergi campuran gas tersebut (ϵ_{OM}) adalah :

$$\epsilon_{OM} = \sum x_i \epsilon_{oi} + R T_o \sum x_i \ln x_i \dots\dots\dots(8)$$

Untuk gas real persamaan (8) menjadi

$$\epsilon_{OM} = \sum x_i \epsilon_{oi} + R T_o \sum x_i \ln \gamma_i x_i \dots\dots\dots(9)$$

dimana γ_i adalah koefisien aktivitas komponen ke i.

Dari persamaan (4) dan (8) diperoleh persamaan exergi total, untuk gas ideal, sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \epsilon = \epsilon_{ph} + \epsilon_{OM} = & \sum (x_i (c_{pi}^h (T-T_o) - T_o c_{pi}^s \ln T/T_o)) + T_o R \ln P/P_o \\ & + \sum (x_i \epsilon_{oi} + R T_o x_i \ln x_i) \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

Pada kenyataannya kondisi aktual kandungan air di udara berbeda dengan kondisi standar, sehingga persamaan (10) perlu dikoreksi menjadi sebagai berikut :

$$\varepsilon = \sum(x_i (c_{pi}^h (T-T_o) - T_o c_{pi}^s \ln T/T_o)) + T_o R \ln P/P_o + \sum(x_i \varepsilon_{oi} + R T_o x_i \ln x_i) + x_{H2O} R T_o \ln(P^{oo}/P_{oo})_{H2O} \dots\dots\dots(11)$$

2.3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan terhadap :

1. Data-data operasi seperti temperatur, tekanan, daya listrik, aliran bahan bakar.
2. Data-data spesifikasi Gas Turbin dari Manual Book seperti jumlah aliran udara.
3. Data analisa gas alam dari PGN
4. Tabulasi Data

2.4. Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan perhitungan kesetimbangan exergi baik pada exergi kimia pada proses kompresi udara, pembakaran serta pembentukan steam dan exergi fisik pada alat penukar panas, komponen mekanikal dan generatornya.

2.5 Hasil yang Diharapkan

Dengan perhitungan exergi diharapkan dapat lebih mengetahui unjuk kerja turbin gas dan kapasitas exergi yang dimanfaatkan untuk *Back Pressure Combine Cycle* atau Sistem kogenerasi siklus kombinasinya.

3. PEMBAHASAN

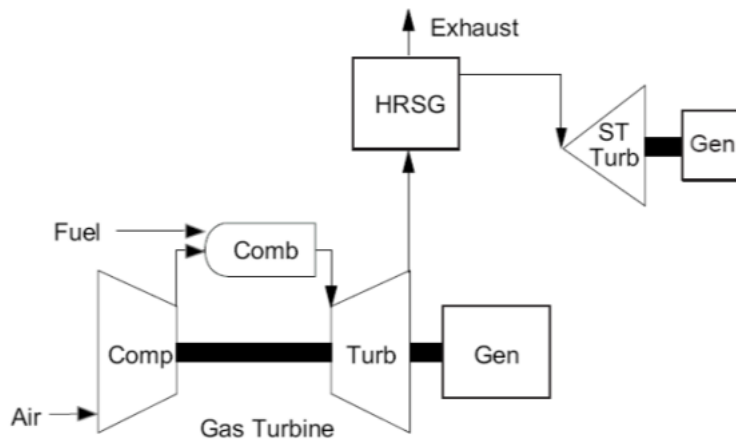
3.1 Diagram Pembangkit PLTGU Muara Tawar Blok-1

Berdasarkan data-data operasi pembangkit selama bulan Desember 2011, keluaran daya dari generator adalah berkisar antara 100 MW s/d 135 MW. Kondisi ini tergantung permintaan beban dari P3B Jawa bali . Keluaran daya dari PLTGU Muara Tawar sangat stabil karena PLTG beroperasi dengan bahan bakar Gas dari PGN dan Pertamina. Gambar potongan turbin gas seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Gambar Potongan Turbin Gas ABB 13E2 PLTG Muara Tawar

Diagram back pressure combine cycle yang direncanakan seperti pada Gambar 5 di bawah ini :



Gambar 5. Diagram Sitem Kogenerasi Sklus Kombinasi Rencana PLTGU Muara Tawar

3.2 Data-Data Operasi

Data-data operasi diperoleh dari buku laporan operator, manual book dan laporan laboratorium. Nilai kalor bahan bakar (NCV) adalah 876.747 kJ/kmol. Sedang kan data-data lainnya, dengan posisi seperti pada gambar 5 dan satuannya disesuaikan dengan perhitungan, diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data-Data Operasi PLTG Muara Tawar Blok 1

Posisi	Temperatur	Tekanan	Laju Aliran
1	308 K	14,6 psi	29.006,52 kmol/jam
2	308 K	100,2 psi	610,33 kmol/jam
3	582 K	100,2 psi	29.006,52 kmol/jam
4	1125 K	100,2 psi	29.536,87 kmol/jam
5	795 K	15,33 psi	29.536,87 kmol/jam
6	473 K	14,6 psi	29.536,87 kmol/jam
7	401 K	55 bar	105.175,23 kg/jam
8	773 K	55 bar	105.175,23 kg/jam
9	324 K	0,13 bar	105.175,23 kg/jam

3.3 Keseimbangan Massa

Keseimbangan massa dilakukan dengan mengangap bahwa udara terdiri dari Oksigen, Nitrogen dan uap air, sedangkan unsur-unsur lainnya diabaikan. Data aliran bahan bakar yang masuk diperoleh dari uji unjuk kerja mesin yang dilakukan setiap bulan. Hal ini dilakukan karena flowmeter berada di produsen gas, sehingga sulit mengetahui aliran bahan bakar pada beban tertentu untuk setiap saat, dan hanya bisa dilakukan dengan koordinasi antar operator yang cukup rumit.

Uji unjuk kerja dilakukan pada beban 134 MW dengan aliran bahan bakar sebesar 12.108,27 m³/jam. Dengan data dari kurva unjuk kerja turbin (lampiran B3), aliran bahan bakar pada beban 134 MW dapat dihitung. Dari perhitungan kestimbangan massa, diperoleh aliran gas hasil pembakaran adalah 29.536,87 kmol/jam, dengan komposisi seperti pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Neraca Massa Gas Buang

Komponen Gas buang	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	Jumlah
Aliran, n (kmol/jam)	611,69	2509,37	4644,32	21.771,50	29.536,87
Fraksi Aliran, x	0,0207	0,0850	0,1572	0,7371	1,00

3.4 Analisa Exergi Pada Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG)

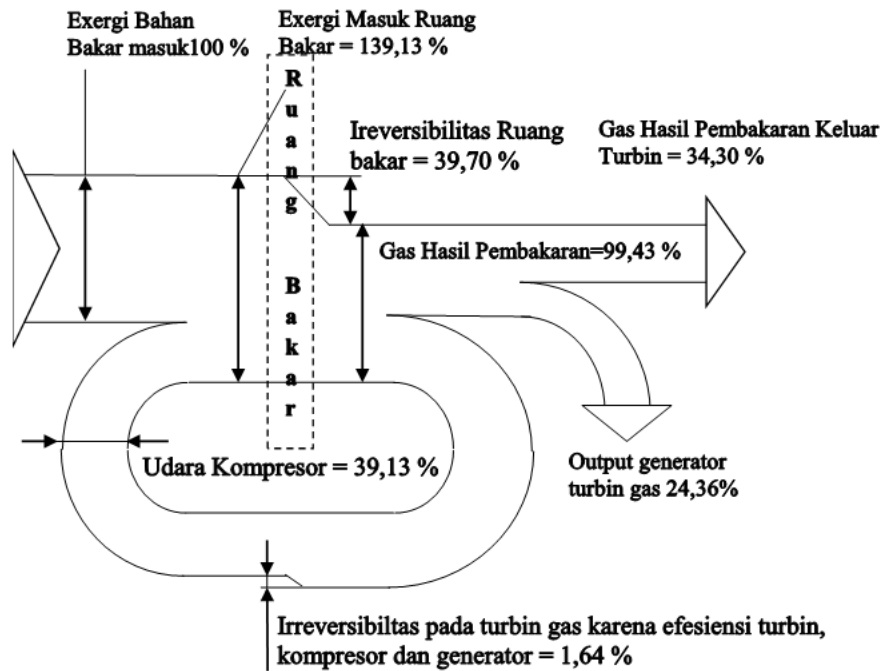
Dari hasil perhitungan exergi seperti pada persamaan 1-11 diperoleh exergi pada berbagai posisi turbin gas (lihat Gambar 5) seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Exergi Pada Turbin Gas

Posisi	Exergi	Exergi Loss	Exergi Rate	Exergi Loss Rate
	kJ/jam	kJ/jam	%	%
1	0	0	0	0%
2	561.599.062	-	100,00%	0%
3	219.741.974	9.220.636	39,13%	1,64%
4	558.408.634	222.932.403	99,43%	39,70%
5	192.646.024	-	34,30%	0%
10	136.800.000	-	24,36%	0%

Hasil dari tabel tersebut dapat dibuat *grassman* diagram seperti pada Gambar 6. Dari *Grassman* diagram tersebut, terlihat rugi-rugi exergi atau ireversibilitas terbesar terjadi pada ruang bakar. Hal ini disebabkan oleh terjadinya perubahan exergi kimia menjadi exergi panas.

Exergi gas pembakaran sebagian menjadi exergi turbin dan sisanya terbuang bersama gas buang dan merupakan nomor dua terbesar setelah exergi ruang bakar. Besarnya exergi turbin adalah selisih exergi gas hasil pembakaran pada posisi 4 dan 5 yaitu sebesar 558.408.634 – 192.646.024 = 365.762.610 kJ/jam.



Gambar 6. Diagram Grassman Turbin Gas

Exergi turbin digunakan untuk menggerakkan kompresor dan generator. Terlihat bahwa exergi turbin sebagian besar ($219.741.974/365.762.610 \times 100\% = 60,08\%$) digunakan untuk kompresor, sedangkan rugi-rugi exergi akibat gesekan, efisiensi turbin dan kompresor serta pada generator hanya $12.411.064/365.762.610 \times 100\% = 3,39\%$. Sisanya sebesar $36,53\%$ menjadi keluaran energi listrik di generator (dengan asumsi energi listrik dapat dirubah 100% menjadi exergi).

Efisiensi rasional total Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG) sendiri adalah :

$$\psi = W_e / E_{bb} ; \text{dimana } \begin{matrix} W_e & = & \text{Keluaran Daya Listrik Generator} \\ E_{bb} & = & \text{Exergi Bahan Bakar Gas} \end{matrix}$$

$$\psi = 136.800.000 / 561.599.062 = 0,2436 \dots \dots \dots (12)$$

Sedangkan efisiensi konvensional PLTG adalah :

$$\eta = W_e / (m \cdot \text{NCV}) = 136.800.000 / (610,33 \times 876.747) = 0,2557 \dots \dots \dots (13)$$

Dari (12) dan (13) terlihat bahwa efisiensi rasional dan efisiensi konvensional turbin tidak banyak berbeda.

3.5 Analisa Exergi Untuk Rencana Combine Cycle

Dari sub bab 4.D di atas terlihat bahwa rugi-rugi exergi terbesar berada di ruang bakar. Rugi-rugi ini karena ireversibilitas dari proses pembakaran adiabatik itu sendiri. Dengan beberapa cara efisiensi ruang bakar dapat dinaikkan, namun dari beberapa studi yang dilakukan peningkatan efisien ini hanya berkisar 3,5% sampai dengan 4,5%.

Rugi-rugi exergi nomor dua terbesar adalah melalui aliran gas buang ke lingkungan. Exergi ini sebenarnya masih dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan uap ketimbang terbuang percuma. Dalam tulisan ini uap yang dihasilkan akan digunakan untuk membangkitkan energi listrik. Pada saat ini di PLTG Muara Tawar pun sedang dibangun combine cycle. Diharapkan energi gas buang dari unit 1, dapat membangkitkan energi listrik sebesar 20.000 kW.

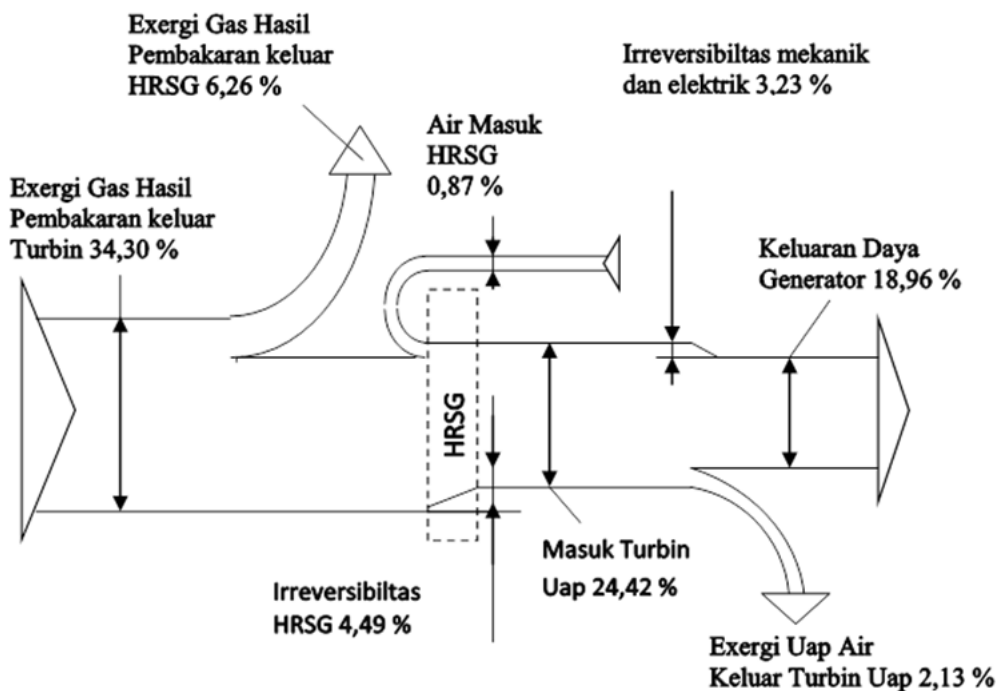
Dari data-data spesifikasi combine cycle yang sedang di bangun diperoleh hal-hal sebagai berikut :

- a. Temperatur air masuk HRSG = 128 °C = 401 K
- b. Temperatur uap masuk Turbin = 500 °C = 773 K
- c. Tekanan uap masuk turbin = 55 bar

Dari lampiran A2 mengenai perhitungan exergi di HRSG (dengan kondisi ideal, adiabtis) diperoleh exergi pada masing-masing posisi combine cycle (lihat gambar 5), seperti pada tabel 4. Exergi turbin adalah $137.164.353 - 11.987.629 = 125.176.724$ kJ/jam. Dengan asumsi efisiensi mekanik dan elektrik turbin dan generator adalah 0,9 dan 0,95 maka keluaran daya generator turbin uap adalah $W_e = 125.176.724 \times 0,9 \times 0,95 = 107.026.099$ kJ/jam dibagi dengan 3600 untuk merubah satuan dalam kW diperoleh $107.026.099 / 3600 = 29.729$ kW.

Tabel 4. Exergi Pada *Combine Cycle*.

Posisi	Exergi	Exergi Loss	Exergi Rate	Exergi Loss Rate
	kJ/jam	kJ/jam	%	%
6	35.159.675	0	6,26%	0
7	4.896.528	0	0,87%	0
8	137.164.353	25.218.522	24,42%	4,49%
9	11.987.629	0	2,13%	0
11	106.479.182	18.139.649	18,96%	3,23%



Gambar 7. Diagram *Grassman Combine Cycle*

Kapasitas Steam Turbine yang dibangun adalah 225.000 kW atau $(72.000.000 \times 11,25)$ kJ/jam, lebih kecil dari kondisi ideal, hal ini untuk mengantisipasi kondisi operasi PLTG yang bebannya tidak tetap dan kebocoran-kebocoran yang terjadi. Walaupun demikian, dengan

manajemen pengoperasian dan perhitungan yang baik, seharusnya kapasitas combine cycle dapat diperbesar sehingga dapat meningkatkan efisiensi. Selain itu, dengan kapasitas yang sedikit lebih besar, faktor keamanan dalam desain akan lebih baik.

Dengan tambahan *combine cycle* efisiensi rasional (Gambar 7) total PLTGU menjadi :

$$\begin{aligned} \Psi_{\text{creal}} &= (W_{\text{eGT}} + W_{\text{eComb}}) / E_{\text{bb}} = (136.800.000 + 72.000.000) / (561.599.062) \\ &= 0,3718 \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

Sedangkan apabila combine cycle dianggap ideal maka efisiensi rasional PLTGU

$$\Psi_{\text{cideal}} = (136.800.000 + 106.479.182) / 561.599.062 = 0,4332. \dots\dots\dots (15)$$

Pada kondisi real peningkatan efisiensi rasional

$$\Delta\Psi_{\text{real}} = (14) - (12) = 0,3718 - 0,2436 = 0,1282$$

atau Persen Efisiensi Rasional = $\Delta\Psi_{\text{real}} / \Psi = 0,1282 / 0,2436 = 52,63\% \dots\dots\dots (16)$

Pada kondisi ideal peningkatan efisiensi rasional

$$\Delta\Psi_{\text{ideal}} = (15) - (12) = 0,4332 - 0,2436 = 0,1896$$

atau Persen Efisiensi Rasional = $\Delta\Psi_{\text{ideal}} / \Psi = 0,1896/0,2436 = 77,83\% \dots\dots\dots (17)$

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Rugi-rugi exergi terbesar terjadi pada ruang bakar sebesar 39,70% dari exergi bahan bakar yang masuk dan efisiensi rasional PLTG adalah 0,2436
2. Untuk PLTG Muara Tawar Blok 1, pada beban 38.000kW exergi gas buang pada *exhaust* turbin gas sebesar 192.646.024 kJ/jam atau 34,30% dari exergi bahan bakar.
3. Exergi gas buang tersebut dapat dimanfaatkan untuk *Combine Cycle*. Pada kondisi ideal energi listrik yang dapat dihasilkan adalah 18,96% dari exergi bahan bakar.
4. *Combine cycle* yang sedang dibangun saat ini sebesar 20.000 kW, lebih kecil dari yang dapat dimanfaatkan. Efisiensi rasional PLTGU berdasarkan rencana pembangunan adalah 0,3718, dimana pada kondisi ideal efisiensi rasional adalah 0,4332 dan peluang efisiensi pemakaian bahan bakar sebesar 77,83%
5. Dengan manajemen pengoperasian dan perhitungan yang baik, seharusnya kapasitas *combine cycle* dapat diperbesar sehingga dapat meningkatkan efisiensi

4.2 Saran

Dalam analisis ini masalah difokuskan untuk menghitung exergi di PLTG Muara Tawar Blok 1, sehingga dapat mengetahui besarnya exergi yang masih dapat dimanfaatkan. Untuk penelitian lebih lanjut dapat dilakukan perhitungan-perhitungan untuk hal-hal sebagai berikut :

1. Pengaruh kelembaban pada udara masuk terhadap unjuk kerja turbin gas dan *combine cycle*.
2. Pengaruh regenerasi steam terhadap unjuk kerja turbin gas dan *combine cycle*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bejan, A. (1988). “*Advanced Engineering Thermodynamics*”. Wiley, New York: Wiley.
- Bustan, M.D. (2010). “ *Pengaruh Proses Pengintegrasian Panas terhadap Konversi Amoniak pada Intercooler Reaktor Amoniak dengan Analisis Eksergi dan Pinch*”. *Reaktor* 13(2):117-123.
- Hasan, Achmad. (2006). “*Teknologi Kogenerasi*”. Pusat Teknologi Konversi dan Konservasi Energi Deputi Teknologi Informasi, Energi, dan Material - BPPT.
- Kotas, T., J. (1985)., “*The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*”. Butterworths, London.
- Moran, M. J. and Shapiro, H. N.(2000). “*Termodinamika Teknik*”. Edisi 4. Jilid 1&2. Terjemahan oleh Yulianto Sulisty Nugroho. 2004. Universitas Indonesia: Erlangga.
- PT. PLN (Persero). (1977.) “*Operator / Maitenance Manual Book*”.
- UNEP.(2006.), “*Kogenerasi*”. Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia – www.energyefficiencyasia.org, Tersedia di http://www.energyefficiencyasia.org/docs/ee_modules/indo/Chapter%20-%20Cogeneration%20%28Bahasa%20Indonesia%29.pdf [dikases 10-11-2012]