

Peranan *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) pada Pembangkit Listrik PLTGU

Moch. Rayhan Akbar. S¹, Muhammad Ramdhani Arif Miming², Yudi
Sukmono³, Mochammad Hanafi⁴

^{1,2,3}Program Studi Teknik Industri, Universitas Mulawarman, Jalan Sambaliung No. 9 Kampus
Gunung Kelua, Samarinda

e-mail: *¹rehanakbar150802@gmail.com, ²dhaniarif20@gmail.com, ³y.sukmono@ft.unmul.ac.id,
⁴mochamad.hanafi.mh@gmail.com

(artikel diterima: 13-01-2025, artikel disetujui: 21-03-2025)

Abstrak

Pembangkit listrik mengubah berbagai sumber energi *non*-listrik menjadi listrik menggunakan berbagai bahan bakar seperti minyak, batu bara, dan energi terbarukan. Jenis pembangkit listrik, seperti PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), dan PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap), mencerminkan sumber energinya dan teknologi yang digunakan. PLTGU, khususnya, menggabungkan siklus *Brayton* (gas) dan *Rankine* (uap), yang meningkatkan efisiensi dan daya pembangkit, meskipun dengan kompleksitas yang lebih tinggi. Penelitian ini melalui beberapa tahap, termasuk kajian dokumen dan literatur terkait prinsip kerja PLTGU dan komponen *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). PLTGU dengan HRSG meningkatkan efisiensi energi dengan memanfaatkan sisa panas dari turbin gas untuk menggerakkan turbin uap, yang menghasilkan daya tambahan tanpa konsumsi bahan bakar ekstra. Dengan efisiensi pembangkitan listrik lebih dari 50% dan pengurangan emisi, HRSG juga berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan. Gas buangan dari turbin gas mengubah air menjadi uap yang kemudian digunakan secara berulang kali dalam sistem pembangkit. Oleh karena itu, pembangkit listrik berperan penting dalam infrastruktur tenaga dengan mengubah berbagai sumber energi menjadi listrik, dan PLTGU menggunakan HRSG untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi. Sinergi antara pembangkit, transmisi, dan distribusi memastikan penyediaan listrik yang efisien dan berkelanjutan.

Kata kunci: Pembangkit Listrik, PLTGU, HRSG, Efisiensi, Energi.

Abstract

Power plants convert various energy sources non-Electricity becomes electricity using various fuels such as oil, coal and renewable energy. The type of power plant, such as PLTA (Hydro Power Plant), PLTU (Steam Power Plant), and PLTGU (Steam Gas Power Plant), reflects the energy source and the technology used. PLTGU, in particular, combines cycles Brayton (gas) and Rankine (steam), which increases the efficiency and power of the plant, although with higher complexity. This research went through several stages, including reviewing documents and literature related to PLTGU working principles and components Heat Recovery Steam Generator (HRSG). PLTGU with HRSG increases energy efficiency by utilizing residual heat from the gas turbine to drive the steam turbine, which produces additional power without extra fuel consumption. With electricity generation efficiency of more than 50% and reduced emissions, HRSG also contributes to reducing environmental impact. The exhaust gas from the gas turbine converts water into steam which is then used repeatedly in the generating system. Therefore, power plants play an important role in power infrastructure by converting various energy sources into electricity, and PLTGU uses HRSG to increase efficiency and reduce emissions. Synergy between generation, transmission and distribution ensures efficient and sustainable electricity supply.

Keywords: Power Generation, PLTGU, HRSG, Efficiency, Energy.

1. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik adalah bagian integral dari infrastruktur tenaga listrik yang memiliki peran penting dalam mengubah beragam sumber energi *non*-listrik menjadi tenaga listrik yang dapat digunakan. Pembangkit listrik dapat beroperasi dengan berbagai jenis bahan bakar, termasuk minyak, batubara, air, energi angin, tenaga surya, dan sumber daya lainnya. Khususnya, setiap jenis pembangkit listrik memiliki karakteristik unik yang mempengaruhi cara operasinya, dan harus

disesuaikan dengan keadaan geografis dan kepentingan khusus wilayah tempat pembangkit tersebut berada. Sistem pembangkit listrik dapat dikelompokkan berdasarkan prinsip kerjanya dan jenis energi yang digunakan. Ini melibatkan berbagai komponen listrik yang bekerja secara bersinergi, termasuk transmisi untuk mengirimkan listrik ke berbagai lokasi, distribusi untuk mendistribusikan listrik ke konsumen akhir, dan beban yang harus terkoordinasi untuk memenuhi kebutuhan listrik mereka. Sistem pembangkit listrik adalah entitas yang kompleks yang mendukung penyediaan listrik bagi konsumen dalam berbagai sektor, dari rumah tangga hingga industri.

Tenaga listrik dihasilkan di berbagai pusat pembangkit, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Proses ini melibatkan transformator penaik tegangan (*step-up transformer*) di pusat pembangkit untuk meningkatkan tegangan listrik sebelum disalurkan melalui jaringan transmisi. Penamaan pembangkit listrik, seperti PLTA, PLTU, PLTP, dan sebagainya, biasanya didasarkan pada jenis tenaga penggerak yang digunakan pada awalnya. Sebagai contoh, PLTA mengacu pada pembangkit listrik di mana generatornya digerakkan oleh turbin air yang berputar karena aliran air yang menggerakkan turbin tersebut. Demikian pula, PLTU mengacu pada pembangkit listrik di mana mesin pembangkitnya digerakkan oleh turbin 11 uap. Dengan kata lain, nama-nama tersebut mencerminkan sumber daya alam atau energi yang digunakan untuk menghasilkan listrik, serta teknologi yang terlibat dalam proses pembangkitan.

Salah satu pembangkit listrik yang menggabungkan pemanfaatan dua daya siklus gabungan adalah PLTGU. Pembangkit daya siklus gabungan pada dasarnya terdiri dari dua siklus utama, yakni siklus *Brayton* (siklus gas) dan siklus *Rankine* (siklus uap) dengan turbin gas dan turbin uap yang menyediakan daya ke jaringan. Dalam pengoperasian turbin gas, gas buang sisa pembakaran yang keluar mempunyai suhu yang relatif tinggi. Sehingga jika dibuang langsung ke atmosfer merupakan kerugian energi.

Oleh karena itu, panas hasil buangan turbin gas tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber panas ketel uap yang dalam hal ini disebut *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG), disamping menghasilkan efisiensi yang tinggi dan keluaran daya yang lebih besar, siklus gabung bersifat luwes, mudah dinyalakan dengan beban tak penuh, cocok untuk operasi beban dasar dan turbin bersiklus dan mempunyai efisiensi yang tinggi dalam daerah beban yang luas. Kelemahan berkaitan dengan keruwetannya, karena pada dasarnya instalasi ini menggabungkan dua teknologi didalam satu kompleks pembangkit daya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini melibatkan beberapa tahapan, yaitu persiapan, pengumpulan data, analisis dan pembahasan, serta penutup. Proses penelitian dilakukan melalui kajian terhadap berbagai dokumen, artikel, dan surat kabar yang berkaitan dengan objek atau subjek penelitian secara sistematis. Media studi literatur yang digunakan meliputi jurnal yang berkaitan, serta situs resmi PT PLN (Persero) dan PLTGU Tanjung Batu. Kajian ini dimulai dari konsep dasar, kemudian dilanjutkan ke aspek yang lebih mendalam. Pada tahap dasar, dilakukan kajian literatur terkait prinsip kerja PLTGU, komponen utama *heat recovery steam generator*, dan prinsip kerja *heat recovery steam generator*.

A. Prinsip Kerja PLTGU

1. Siklus Turbin Gas (*Brayton Cycle*)

Turbin gas digunakan untuk menghasilkan tenaga listrik mandiri (siklus sederhana) atau dikombinasikan dengan turbin uap (siklus gabungan) pada bagian suhu tinggi. Turbin uap (siklus gabungan) menggunakan gas buang turbin gas sebagai sumber panasnya. Turbin uap adalah jenis mesin pembakaran luar (*external combustion*), dimana proses pembakaran berlangsung di luar mesin. Energi termal dialihkan ke uap sebagai panas. Biasanya turbin gas beroperasi pada siklus terbuka. Udara yang berasal dari lingkungan mengalir ke kompresor, suhu dan tekanannya dinaikkan. Udara bertekanan terus mengalir ke dalam ruang pembakaran, di mana bahan bakar dibakar pada tekanan

yang konstan. Gas panas yang dihasilkan masuk ke turbin, kemudian berekspansi ke tekanan udara luar melalui sudu nosel. Ekspansi ini membuat sudu turbin berputar, yang kemudian memutar poros rotor berkeliling magnet, sehingga menghasilkan tegangan listrik di kumparan stator generator. Gas buang (*exhaust gases*) yang keluar dari turbin dalam siklus terbuka tidak direkayasa kembali.

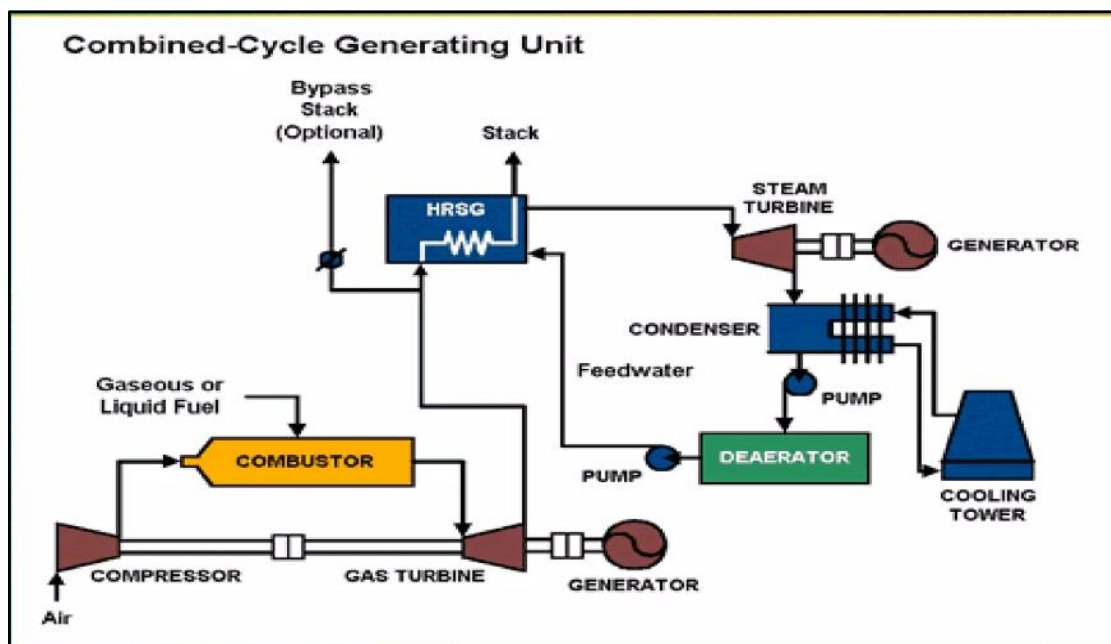
Proses yang terjadi pada PLTG adalah sebagai berikut :

- Energi mekanik yang dibutuhkan untuk memutar rotor generator dan kompresor yang terpasang pada satu sumbu dihasilkan oleh turbin gas namun, selama penyalaan awal, peran ini dipenuhi oleh penggerak utama. Penggerak utama ini dapat berupa mesin diesel, motor listrik, atau generator turbin gas itu sendiri, yang beroperasi sebagai motor melalui mekanisme SFC (*Static Frequency Converter*). Setelah kompresor mulai berputar terus-menerus, kompresor akan menarik udara luar hingga udara bertekanan dihasilkan di sisi pembuangan (tekanan), yang kemudian mengalir ke ruang pembakaran.
- Di ruang bakar, jika bahan bakar cair (bahan bakar minyak) digunakan saat penyalaan, maka akan terjadi proses atomisasi. Proses ini dilanjutkan dengan proses pembakaran, yang diawali dengan penyalaan dari busi, yang menghasilkan api dan gas panas bertekanan. Gas panas tersebut kemudian diarahkan ke turbin, sehingga dapat menghasilkan tenaga mekanis melalui putaran. Selain itu, gas panas tersebut dikeluarkan ke atmosfer sambil tetap mempertahankan suhu tinggi.

Kelemahan utama mesin turbin gas (PLTG) adalah efisiensi termalnya yang rendah. Ketidakefisienan ini muncul akibat hilangnya panas yang cukup besar pada gas buang. Untuk meningkatkan efisiensi termal, banyak inisiatif telah dilakukan untuk mengembangkan mesin siklus gabungan, yang kita lihat digunakan saat ini.

2. Siklus Kombinasi (*Combined Cycle*)

Untuk meningkatkan efisiensi termal turbin gas yang digunakan sebagai unit pembangkit tenaga listrik (PLTG), siklus PLTG digabungkan dengan siklus PLTU sehingga membentuk siklus gabungan yang disebut "*combined cycle*" atau pembangkit listrik tenaga gas uap (PLTGU). Satu siklus PLTGU terdiri dari siklus PLTG dan PLTU siklus. Siklus PLTG menerapkan siklus *Brayton*, dan siklus PLTU menerapkan siklus *ideal Rankine*.



Gambar 1. *Combined cycle generating unit*

Kombinasi siklus turbin gas dan siklus turbin uap dilakukan oleh boiler atau alat perpindahan panas yang biasa disebut dengan *heat recovery steam generator* (HRSG). Siklus gabungan ini tidak

hanya meningkatkan efisiensi termal tetapi juga mengurangi polusi udara. Penggabungan PLTG siklus tunggal dengan pembangkit listrik siklus gabungan (PLTGU) memberikan beberapa manfaat sebagai berikut :

- a) Efisiensi termalnya tinggi, sehingga biaya operasi (Rp/kWh) lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit thermal lainnya.
- b) Biaya pemakaian bahan bakar (konsumsi energi) lebih rendah.
- c) Pembangunannya relatif cepat.
- d) Kapasitas dayanya bervariasi dari kecil hingga besar.
- e) Menggunakan bahan bakar gas yang bersih dan ramah lingkungan.
- f) Fleksibilitasnya tinggi.
- g) Tempat yang diperlukan tidak terlalu luas, sehingga biaya investasi lahan lebih sedikit.
- h) Pengoperasian PLTGU yang menggunakan komputerisasi memudahkan pengoperasian.
- i) Waktu yang dibutuhkan: untuk membangkitkan beban maksimum 1 blok PLTGU relatif singkat yaitu 150 menit.
- j) Prosedur pemeliharaan lebih mudah dilaksanakan dengan adanya fasilitas sistem diagnosa.

B. Komponen Utama *Heat Recovery Steam Generator*

Heat Recovery Steam Generator (HRSG) merupakan peralatan utama pada pembangkit listrik tenaga uap gas dan menggunakan gas buang dari turbin gas untuk menghasilkan uap bertekanan terutama uap *superheated*. Energi panas bersuhu relatif tinggi dikirim ke boiler pemulihan panas HRSG, yang memanaskan air di pipa pemanas dan keluar melalui cerobong asap, dan energi panas habis pada suhu yang lebih rendah. Air dalam tabung pemanas yang keluar dari drum diubah sebagian menjadi uap melalui pemanasan yang terjadi, kemudian campuran uap dan air kembali ke drum dengan menggunakan separator pada drum, air dan *steam* dipisahkan.

Uap tersebut kemudian dialirkan menuju turbin uap agar dapat berputar, dan air dikembalikan ke drum untuk dicampur dengan air muatan segar. Proses ini berulang terus menerus selama pembangkit uap pemulihan panas (HRSG) beroperasi. Pembangkit Uap Pemulihan Panas (HRSG) agar dapat menghasilkan uap dalam jumlah besar dalam waktu yang relatif singkat, perpindahan panas harus berlawanan arah atau arus silang, dan sirkulasi air harus cepat

Sumber panas dari *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) berasal dari energi panas yang terkandung di dalam gas buang PLTG. Secara sederhana prinsip kerja dari *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) adalah memanfaatkan kembali limbah panas atau gas sisa yang tersedia dari gas buang GT (*Gas Turbine*) dan mentransfernya ke dalam air kemudian membentuk uap. Konstruksi pipa-pipa pemanas dari *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) disusun tegak lurus terhadap aliran gas buang. *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) juga tidak memiliki ruang bakar karena tidak dilengkapi dengan sistem bahan bakar. Berikut ini merupakan komponen utama *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG):

1. *Superheater*

Superheater adalah bagian dari pipa boiler subkritis yang berfungsi untuk memanaskan ulang uap jenuh dengan tekanan kerja konstan sehingga menjadi uap super panas. Pipa ini mengubah air menjadi uap yang kemudian didistribusikan ke turbin dan mesin lain yang membutuhkan uap panas bertekanan tinggi. Dengan meningkatkan suhu uap, *superheater* juga membantu dalam mengurangi korosi dan meningkatkan output energi.

Superheater dapat terdiri dari satu atau lebih modul penukar panas. Banyak modul *superheater* biasanya memiliki pengatur suhu uap antar modul, dirancang untuk mencegah suhu logam berlebihan di ujung modul dan meminimalkan kemungkinan masuknya uap air ke turbin uap. *Superheater* (pemanas uap lainnya) dipasang di saluran gas buang ketel uap. Dalam *superheater*, uap jenuh atau basah dari drum *boiler* dipanaskan hingga suhu yang diinginkan pada tekanan konstan. Energi panas diperoleh dari gas buang melalui radiasi atau konveksi. Hal yang sama berlaku untuk pipa air lainnya.

Temperatur steam sangat tinggi, sehingga material boiler harus tahan terhadap temperatur dan tekanan operasi. Ketika uap mencapai tingkat tertentu dalam turbin tekanan multistage, pemanasan ulang terjadi dalam alat yang disebut pemanas ulang. Uap yang dipanaskan kembali pada *reheater*

ini diperluas pada turbin tingkat berikutnya. *Superheater* dibagi menjadi dua jenis: *superheater* konveksi dan *superheater* konveksi radiasi. Prinsip *Superheater* konveksi sama seperti *ekonomizer*, yakni menyerap panas gas bekas yang melewati *superheater*. Kenaikan temperatur uap praktis terjadi pada tekanan tetap sampai akhirnya gas bekas meninggalkan *superheater*. Menurut penempatannya *superheater* ditempatkan diantara pipa-pipa air dan diatas pipa-pipa air.

2. *Reheater*

Reheater adalah suatu alat yang dirancang untuk meningkatkan suhu uap dari turbin bertekanan tinggi dan, jika perlu, memanaskan kembali uap untuk menaikkan turbin ke tahap tekanan berikutnya. Uap yang digunakan untuk memutar turbin bertekanan tinggi (turbin HP) mengurangi tekanan dan suhu. Dengan menggunakan gas buang, uap dipanaskan kembali dan suhunya dinaikkan pada tekanan konstan, sehingga menghasilkan entalpi yang lebih tinggi. Analisis termodinamika menunjukkan bahwa penggunaan uap super panas pada *superheater* dan *reheater* meningkatkan efisiensi termal sistem.

3. *Evaporator*

Evaporator boiler disebut juga dinding tabung. Pada pipa dinding, air dari drum boiler bersirkulasi melalui sudut trap dan kolektor bawah. Sebagian panas yang dihasilkan selama proses pembakaran di tungku dipindahkan ke air di dinding tabung, dan air tersebut diubah menjadi panas uap. Selain berfungsi mengubah air menjadi uap, dinding tabung mencegah difusi panas dari dalam tungku ke udara luar dan juga memastikan tidak ada panas yang dilepaskan ke udara luar melalui dinding atau dinding tabung dipasang di belakang dinding pipa yang terbuat dari serat mineral (mengarah ke udara luar). Sedangkan pada *down comer* terpasang pipa yang berukuran besar, menghubungkan bagian bawah boiler drum dengan *lower header*. *Down comer* (pipa turun) tidak terkena panas secara langsung dari ruang bakar. Dan untuk menghindari kerugian panas yang terbang pada *down comer*, maka *down comer* diberi isolasi.

4. *Economizer*

Economizer terdiri dari pipa-pipa air yang ditempatkan pada jalur gas buang sebelum keluar dari ketel. Pipa-pipa ekonomiser ini terbuat dari baja atau besi tuang yang mampu menahan panas dan tekanan tinggi. Korosi di sisi air dapat dicegah dengan terlebih dahulu melunakkan air pengisi, sementara korosi di sisi luar gas buang dapat diatasi dengan menjaga suhu gas buang tetap tinggi di atas titik embun gas sulfur. Masalah konduktivitas panas dan hambatan aliran gas akibat debu atau abu yang menempel pada pipa dapat dihindari dengan pembersihan rutin. Penggunaan *ekonomizer* dapat meningkatkan efisiensi termal ketel, dengan perkiraan penghematan bahan bakar sebesar 1% untuk setiap kenaikan suhu air pengisi sebesar 5°C.

Economizer yang umum digunakan pada ketel Pembangkit Tenaga Listrik memiliki kotak pengumpul (*header*) atas dan bawah di setiap seksinya, yang dihubungkan dengan delapan pipa polos atau bersirip yang dipasang sejajar. Pipa dan kotak pengumpul tersebut terbuat dari besi tuang, dengan kotak pengumpul yang tidak memiliki sambungan dan ujung-ujungnya berbentuk bulat.

Air pengisi dimasukkan ke dalam *header* melalui *down comer* dan kemudian disebarkan ke semua pipa pemanas. Air mengalir ke atas melalui pipa-pipa vertikal dengan kecepatan rendah, sambil dipanaskan oleh gas panas yang mengalir tegak lurus terhadap pipa. Air panas yang dihasilkan kemudian ditekan ke dalam drum ketel melalui pipa yang terhubung dengan drum. Suhu air ini dapat mencapai 100-150°C, tergantung pada suhu gas pembakaran.

Pipa induk atas (di atas pipa-pipa vertikal) dilengkapi dengan lubang pembersih untuk membersihkan bagian dalam pipa, sementara pipa induk bawah memiliki lubang untuk membuang lumpur yang mengendap. Debu dan abu terbang yang terbawa oleh gas buang melekat pada sisi luar pipa dan dibersihkan menggunakan blower yang bergerak perlahan naik turun secara terus-menerus.

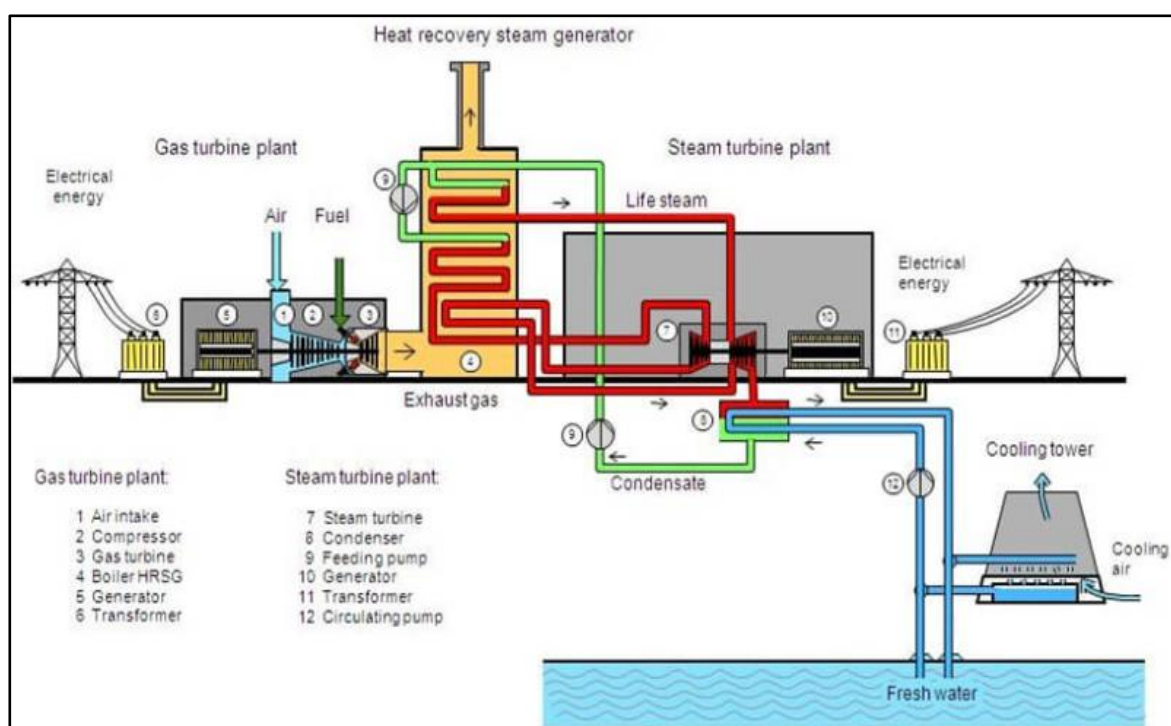
5. *Stack and Silencer*

Stack adalah saluran yang digunakan untuk mengeluarkan gas bekas turbin uap setelah melalui *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) ke atmosfer. Untuk jenis HRSG horizontal *stack* terdapat

dibelakang HRSG. Sementara itu, *silencer* (atau peredam suara) adalah perangkat yang dirancang untuk mengurangi suara bising yang dihasilkan oleh gas buang saat keluar melalui *stack*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penggunaan *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) pada pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU) menjadi sangat penting karena dapat meningkatkan efisiensi energi secara signifikan. HRSG memanfaatkan sisa panas buangan turbin gas dengan mengubahnya menjadi uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Dengan memanfaatkan sisa panas tersebut, PLTGU dapat menghasilkan daya tambahan tanpa mengonsumsi bahan bakar tambahan sehingga meningkatkan efisiensi pembangkitan listrik hingga lebih dari 50%. Selain itu, penggunaan HRSG juga membantu mengurangi emisi, yang pada gilirannya membantu mengurangi dampak lingkungan dari pembangkit listrik. Efisiensi tinggi dan penghematan bahan bakar inilah yang menjadi alasan utama penggunaan HRSG pada PLTGU.



Gambar 2. Siklus kerja HRSG

Gas buang dari turbin gas dengan suhu masih tinggi (sekitar 550°C) diarahkan ke HRSG untuk memanaskan air di dalam pipa-pipa pemanas. Setelah melalui proses pemanasan, gas buang tersebut dilepaskan ke atmosfer melalui cerobong dengan suhu yang lebih rendah (sekitar 130°C). Air di dalam pipa, yang berasal dari drum, sebagian berubah menjadi uap akibat pemanasan ini.

Campuran air dan uap tersebut kemudian kembali ke dalam drum, di mana uap dipisahkan dari air menggunakan separator. Uap yang terkumpul diarahkan untuk memutar turbin uap, sementara air dikembalikan ke drum untuk didaur ulang ke dalam pipa-pipa pemanas, bersama dengan air pengisi baru. Proses ini berulang terus selama HRSG beroperasi. Untuk menghasilkan uap dalam jumlah besar dalam waktu yang relatif singkat, perpindahan panas dilakukan dengan aliran berlawanan atau *cross flow*, dan sirkulasi airnya harus cepet.

Pada dasarnya, HRSG dan boiler memiliki fungsi yang sama, yaitu sebagai alat penukar panas yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap dengan bantuan panas. Perbedaan utama terletak pada sumber panas yang digunakan dan susunan pipa pemanasnya. Pada HRSG, sumber panas untuk menghasilkan uap berasal dari energi panas yang terkandung dalam gas buang dari PLTG. Sementara itu, pada boiler, panas dihasilkan dari pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar (*furnace*). Pipa-

pipa pemanas pada boiler disusun membentuk dinding ruang bakar, sedangkan pada HRSG, pipa-pipa pemanas dipasang tegak lurus terhadap aliran gas buang.

4. KESIMPULAN

Pembangkit listrik merupakan komponen penting dalam infrastruktur tenaga listrik yang mengubah berbagai sumber energi non-listrik menjadi tenaga listrik. Setiap jenis pembangkit listrik memiliki karakteristik unik yang bergantung pada bahan bakar dan kondisi geografisnya. Pembangkit listrik bekerja secara sinergis dengan sistem transmisi dan distribusi untuk memenuhi kebutuhan listrik konsumen dari berbagai sektor, sehingga mendukung penyediaan listrik secara efisien dan berkelanjutan.

Pada dasarnya untuk mencapai efisiensi pemanfaatan dua siklus pembangkitan pada PLTGU menggunakan *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) yang memainkan peran penting dalam Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) karena kemampuannya memanfaatkan panas sisa dari gas buang turbin gas untuk menghasilkan uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap, sehingga meningkatkan efisiensi pembangkitan listrik secara signifikan tanpa konsumsi bahan bakar tambahan. Selain itu, HRSG membantu mengurangi emisi gas buang, sehingga berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan. Proses HRSG berbeda dengan boiler tradisional karena HRSG menggunakan panas dari gas buang, sementara boiler menghasilkan panas melalui pembakaran bahan bakar langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Apriani, Y. O. S. I., 2021, Analisa Sistem Pengaman Motor Listrik Dengan Menggunakan Main Control Center (MCC) PT. Perta-Samtan Gas Sungai Gerong, *J. Tek. Elektro*, vol. 9, no.1, hh. 45-55.
- Baskoro, F., Karim, M. W. N., Widyartono, M., & Haryudo, S. I., 2021, Kajian kemiringan blade dan Head Turbin *Archimedes Screw* Terhadap Daya Keluaran Generator AC 1 Phase 3 kW. *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 1, hh. 219-228.
- Borglet, C., 2003, Finding Association Rules with Apriori Algorithm, <http://www.fuzzy.cs.uniagdeburg.de/~borglet/apriori.pdf>, diakses tgl 23 Februari 2022.
- Castleman, K.R., 2004, *Digital Image Processing*, vol. 1, ed.2, *Prentice Hall*, New Jersey.
- Indarwati, S., Respati, S. M. B., & Darmanto, D., 2019, Kebutuhan Daya Pada Air Conditioner Saat Terjadi Perbedaan Suhu dan Kelembaban. *Jurnal Ilmiah Momentum*, vol. 15, no. 1.
- Priyambodo, A. D., & Agung, A. I., 2019, *Prototype* Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Generator DC Di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya. *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 8, no. (2).
- Rahmat Kurniawan, M., 2014, Analisa Performansi Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) Sicanang Belawan. *Jurnal e-dinamis*, vol. 10, no. 2.
- Saifudin, A. R., & Gunawan, G., 2022, Analisis Performansi Steam Turbine Generator 1 Pada Power Plant 2 Utilities Pt Pertamina Ru V Balikpapan. *Jurnal Rekayasa Mesin dan Inovasi Teknologi*, vol. 3, no. 1, hh. 172-178.
- Sihombing, G. (2020). Transformator Energi, Potensi dan Pengujian Model Energi. *Jurnal Syntax Transformation*, vol. 1, no. 09, hh. 612-618.
- Sitorus, H. F., Armansyah, A., & Harahap, R., 2022, Pemeliharaan Motor Induksi 3 Fasa Tegangan 380 V Pada GT 2.1 di PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pengendalian Pembangkitan Belawan, JET (*Journal of Electrical Technology*), vol. 7, no. 3, hh. 119-123.
- Stanton, N., Hedge, A., Brookhuis, K., Salas, E., and Hendrick, H., 2005, *Handbook Of Human Factors And Ergonomics Methods*, CRC Press, Florida.
- Sugandi, B., Atabiq, F., & Asti, R. A., 2023, Pengaruh Beban Gas Turbine Generator terhadap Efisiensi *Heat Recovery Steam Generator* pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU). *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 11, no. 3, hh. 639.

- Sundari, A. S., & Rinaldo, D., 2019, Analisis Kegagalan Proses Regenerasi Water Treatment Plant# 2 Pltgu Unit Pembangkitan Tanjung Priok dengan Metode FMEA. *Jurnal Rekayasa dan Optimasi Sistem Industri*, vol. 1, no. 1, hh. 18-24.
- Tri Parlan Zaputra, T. P. Z., 2022, Analisis Pengaruh Jumlah Lilitan dan Kecepatan Putar Terhadap Efisiensi pada *Permanent Magnet Synchronous Generator 18 Slot 16 Pole*, vol. 8, no. 2, hh. 411-419.
- Wahyudi, D., & Iswanto, P. T., Analisis Sisa Umur Pakai *Tube Heater* Pada *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*, *Journal of Mechanical Design and Testing*, vol. 5, no, 1, hh. 10-15.
- Xavier Pi-Sunyer, F., Becker, C., Bouchard, R.A., Carleton, G. A., Colditz, W., Dietz, J., Foreyt, R. Garrison, S., Grundy, B. C., 1998, Clinical Guidlines on The Identification, Evaluation, and Treatment of Overweight and Obesity in Adults, *Journal of National Institutes of Health*, vol.4, no.4, hh.123-130, http://journals.lww.com/acsm-msse/Abstract/1998/11001/paper_treatment_of_obesity.pdf, diakses tgl 23 Februari 2022.