

Sistematik Review Studi Peningkatan Efisiensi Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

FAYZA YULIA, RIFAT SATRIO, ARYA DWI, RIZKY VINDRA, DAFFA FEBRIANSYAH,
WIWEKO ALFARABY, FITRI WAHYUNI, REDA RIZAL

ABSTRACT

Heat Recovery Steam Generator (HRSG) merupakan komponen di mana proses pemanfaatan panas yang keluar (*waste heat*) dari turbin gas pada PLTG, yang masih memiliki temperatur tinggi untuk memanaskan air dan menghasilkan uap, digunakan untuk memutar *steam turbine*. Semakin tinggi efisiensi dari suatu *combined cycle* semakin rendah juga gas emisi yang dikeluarkan, hal ini bisa mengurangi limbah yang diterima oleh lingkungan. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui faktor-faktor yang memengaruhi kinerja dan efisiensi HRSG, kerugian dan pengaruh lain dari penggunaan energi pada HRSG, serta menganalisis cara terbaik untuk meningkatkan kinerja suatu HRSG. Dari hasil studi yang telah dilakukan, didapatkan beberapa faktor untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi HRSG. Yang pertama adalah dari faktor desain. Misal dengan menggunakan *dual recovery boiler* dan juga penambahan *duct burner* dapat mengurangi penggunaan dari gas emisi CO₂ sebesar 158,68 kg/MWh. Selain itu, faktor bahan bakar, seperti natural gas memiliki efisiensi energi dan termal yang lebih tinggi, akan tetapi dalam memperpanjang lifetime, lebih baik menggunakan bahan bakar dari High Speed Diesel. Terlebih jika digabungkan dengan SOFC-GT dapat meningkatkan efisiensi energi sebesar 60%. Beberapa faktor lainnya yang mempengaruhi kinerja dari HRSG antara lain beban gas turbine, variasi pinch point dan approach point, pengurangan area pertukaran panas, dan kebutuhan daya daur ulang. Maka dari itu, dari semua faktor yang telah didapatkan, HRSG dapat dimodifikasi dan ditingkatkan kinerjanya melalui alternatif cara yang telah ditelaah. Dengan demikian, konservasi energi, pengurangan limbah di lingkungan, serta peningkatan kinerja HRSG & CCPP dapat bekerja efektif dalam waktu bersamaan.

Keywords: HRSG, Efisiensi, *Improvement*, Konservasi Energi, Teknologi *Heat Recovery*, Efisiensi Energi

PENDAHULUAN

Menurut Fajar et al. (2016), di dunia, kebutuhan energi selalu meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk. Kemudian, sesuai dengan kajian yang dilakukan oleh Mulyani et al. (2018), peningkatan kebutuhan ekonomi, pembangunan, dan gaya hidup penduduk yang terjadi di Indonesia mengakibatkan konsumsi energi – khususnya energi listrik – meningkat secara cepat. Hal ini menjadi alasan mengapa kita memerlukan pembangkit listrik (*Power Plant*) dan menggunakannya semaksimal mungkin (Elian, 2017). Namun, penggunaan pembangkit listrik secara maksimal ini harus kita hubungkan dengan total efisiensi dan faktor-faktor lainnya. Pada faktanya, sampai saat ini belum ada pembangkit listrik yang memiliki 100% efisiensi (UNKRIS, 2020). Sampai saat ini, semua pembangkit listrik

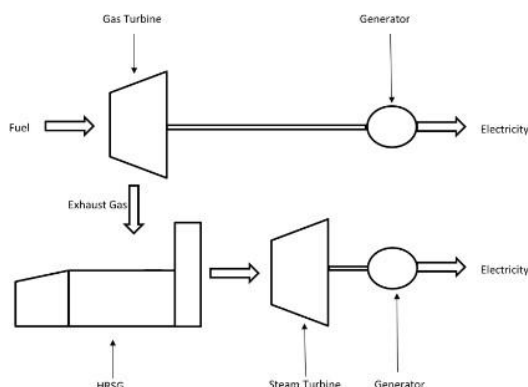
belum ada yang mencapai 100% efisiensi dikarenakan teknologi yang belum mencukupi juga karena banyaknya keraguan dalam hal efek penggunaan banyak teknologi terhadap lingkungan. Tidak ada yang menutup kemungkinan, bila kita meningkatkan teknologi terhadap efisiensi pembangkit listrik, justru akan membawa efek yang buruk bagi lingkungan sekitar. Maka dari itu, yang dapat dilakukan saat ini adalah melakukan konservasi energi / penghematan energi.

Sebelum mencapai ke pemikiran mengenai 100% efisiensi, kita dapat melakukan beberapa modifikasi terhadap teknologi yang sudah ada. Menurut Suryady dan Teguh (2021), untuk saat ini, Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) dapat dikatakan sebagai pembangkit listrik yang paling efisien (> 50%). Namun, PLTGU juga masih memiliki efek buruk bagi lingkungan. PLTGU menghasilkan air limbah sebagai buangan proses produksi listrik. Air

limbah PLTGU berasal dari beberapa tempat antara lain, *Boiler area*, *Turbin area*, dan *Flue Gas Desulfurization (FGD) plant* (Sahlan & Razak, 2013). Kemudian, beberapa PLTGU juga menggunakan burner bantu (*Auxiliary Burner*) pada HRSG yang masih menggunakan bahan bakar fosil (Rakhman, 2013). Tujuan dari jurnal review ini adalah untuk mengetahui faktor-faktor apa saja yang dapat meningkatkan kinerja dari HRSG.

GAMBARAN UMUM HRSG

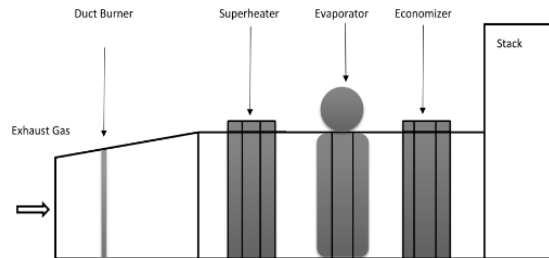
Salah satu aspek yang paling penting dalam pemakaian energi secara efisien adalah mengenai energi yang cepat habis. Salah satu cara yang dipakai oleh industri dalam hal efisiensi energi adalah dengan menyimpan *flue gas* dan menggunakan panasnya untuk memproduksi uap melalui boiler serta kelistrikannya, kemudian melalui generator. Menurut Jouhara et al. (2018), studi menunjukkan bahwa *waste heat* terkumpul secara efektif dengan beberapa teknologi dibandingkan dengan banyaknya energi yang hilang di lingkungan. *Cogeneration plant* atau *combined heat and power plant* adalah salah satu fasilitas yang tersedia di industri yang berfungsi untuk mengumpulkan *waste heat* secara efisien. Cogeneration plant meliputi *Gas Turbine Generator (GTG)* dan *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*. GTG di sini berfungsi untuk menciptakan listrik dan hot exhaust gas dalam waktu yang bersamaan. Sedangkan HRSG berfungsi untuk memproduksi uap menggunakan *exhaust gas* yang dikeluarkan oleh GTG.



GAMBAR 1. Struktur umum Combined Cycle Power Plant

HRSG merupakan bagian yang penting dari *cogeneration plant* dan *combined cycle power plant (CCPP)*.

Struktur umum dari HRSG dapat dilihat di Gambar 2.



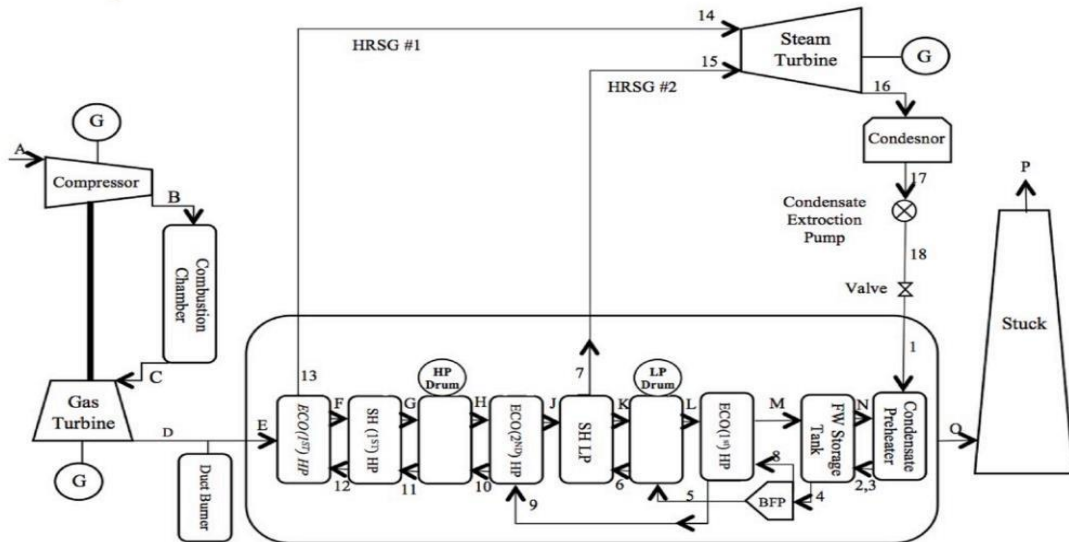
GAMBAR 2. Struktur umum HRSG

FAKTOR PERTIMBANGAN PENINGKATAN HRSG

Dari studi yang telah dilakukan, terdapat beberapa faktor pada HRSG yang dapat ditingkatkan atau diperbaiki demi mencapai tujuan studi. Faktor-faktor tersebut terbagi menjadi lima, yaitu faktor desain, faktor bahan bakar, faktor beban *gas turbine*, faktor *pinch point* dan *approach point*, dan faktor sistem kerja utama HRSG.

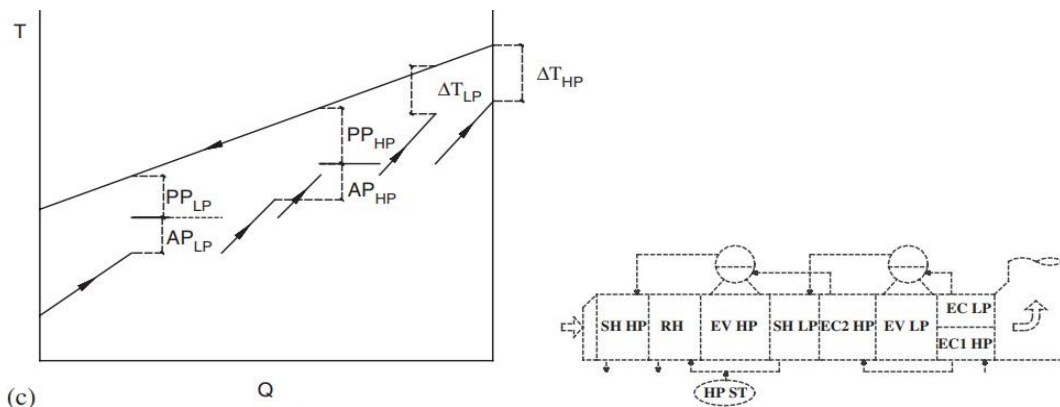
1. Desain HRSG

Terdapat beberapa hal dalam desain HRSG yang dapat diubah atau dioptimalisasi untuk meningkatkan efisiensi kerja HRSG itu sendiri. Pertama, penggunaan *dual recovery boiler* dan penambahan unit *duct burner*. Perubahan desain ini dapat dilihat di Gambar 3. Pada analisis *exergy* dan *environment* dengan menggunakan desain seperti ini, hasilnya menunjukkan bahwa hasil tertinggi dari *exergy losses* diperoleh pada saat suhu di sekitar 16°C, dengan *combustion chamber* dan *thermal recovery boiler* masing-masing pada 145.71 MW dan 31.52 MW. Saat proses pembakaran secara umum memiliki *exergy destruction* tertinggi karena terjadi proses *irreversible* secara alami. Menurut Mohtaram et al. (2020), *exergy destruction* pada *recovery boiler* dapat



GAMBAR 3. Desain HRSG dengan penambahan dual recovery boiler dan duct burner

(Mohtaram et al, 2020)



GAMBAR 4. Double pressure HRSG dengan reheater (Sharma & Singh, 2016)

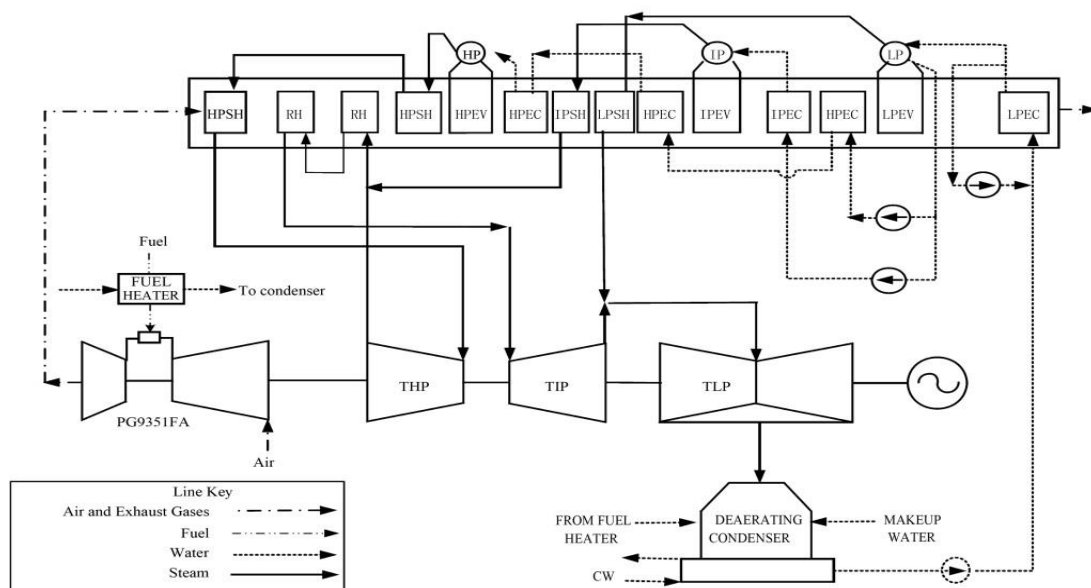
terjadi karena hasil dari variasi suhu panas dan dingin dan juga akibat dari tekanan gas yang hilang. Diketahui juga penggunaan *combined cycle* lebih baik dalam mengurangi gas emisi dibandingkan dengan steam cycle saja. Penggunaan desain seperti ini juga menghasilkan NO_x dan juga Monoxide yang lebih sedikit dari beban relatif. Dalam pengurangan gas emisi CO₂ *dual pressure recovery boiler* dan *duct burner* berperan sangat penting sehingga dapat mengurangi sebesar 158.68 kg/MWh.

Hasil lainnya juga menunjukkan bahwa optimalisasi yang berdasarkan pada semua siklus dan juga pada semua suhu tidak mempengaruhi atau merubah nilai dari ekonominya, sebaliknya pada optimalisasi ini total dari efisiensi exergy dan juga biaya lebih baik daripada optimalisasi lainnya. Pada optimalisasi berdasarkan emisi gas CO₂ diketahui bahwa semakin tinggi efisiensi

exergy, semakin optimal juga CO₂ yang dihasilkan. Dalam pengujian ini suhu lingkungan sekitar menjadi nilai parameter yang penting dari *combined cycle power plant*, oleh karena itu tidak mungkin dilakukan menerapkan nilai *combined cycle power plant* yang sama pada berbagai suhu

Kedua, perubahan desain HRSG dengan tingkat *double-pressure* serta *reheater*. HRSG tingkat *double-pressure* dengan *reheater* mampu menghasilkan uap *superheated* pada tiga level (Nadir & Ghenaiet, 2015). Karena ketidakmampuan untuk memasok uap ke suhu saluran masuk MPT, sambungan jalur LP HRSG ke LPT tidak dimungkinkan.

Dalam *repowering* penuh, pemanasan awal air umpan dilakukan oleh HRSG. Dalam hal ini, pemanas awal air umpan dikeluarkan dari sirkuit, dan akibatnya semua ekstraksi turbin uap akan ditutup. Jumlah minimum uap yang

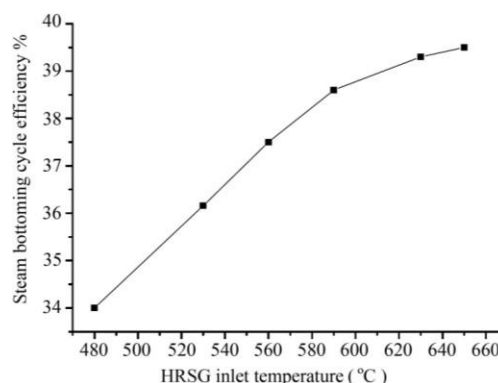


GAMBAR 5. Layout combined cycle dengan three-pressure reheat HRSG (Xiang & Yingying, 2007)

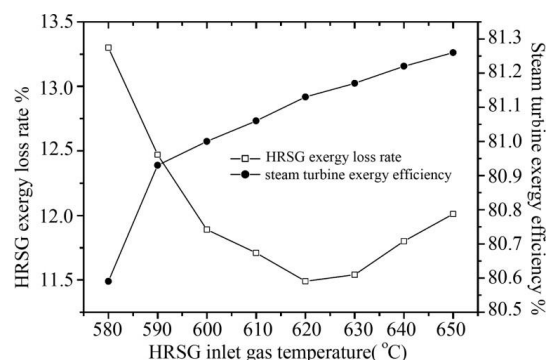
melewati siklus uap adalah ketika bagian uap pembangkit listrik dioperasikan pada beban seminimal mungkin. Dalam hal ini, di mana kekuatan bagian uap adalah 75 MW, untuk menyediakan uap super panas untuk turbin uap, diperlukan outlet gas panas dari nomor 1,86 GT model V94.2 (Gambar 4). Laju aliran uap maksimum dari siklus juga berhubungan dengan waktu ketika semua ekstraksi uap ditutup. Dalam hal ini, laju aliran uap melalui HRSG sama dengan 1,373 kali lebih tinggi dari beban pengenalan pembangkit listrik. Panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan uap ideal untuk turbin uap dalam hal ini sama dengan panas keluaran gas dari 4.36 GT model V94.2. Oleh karena itu, menurut Nadir & Ghenaïet (2015), karena jumlah turbin gas semakin berubah, tergantung pada tenaga uap dan jenis *gas turbine* yang dipilih, dua hingga lima turbin gas dapat digunakan dalam siklus baru. Mempertimbangkan proses seperti itu, dalam empat skenario dan dari 2 hingga 5 turbin gas dalam *repowering*, dalam setiap kasus, optimasi siklus dianalisis.

Ketiga, perubahan desain HRSG yang dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan kinerjanya adalah penggunaan *combined cycle with three-pressure reheat heat recovery steam*. Desain HRSG ini (Gambar 5) tidak menggunakan *supplementary firing*, memiliki tiga tekanan yaitu *High Pressure*, *Intermediate Pressure*, dan *Low Pressure*. Pada *Low Pressure* ini memiliki saluran ganda dan saluran pembuangan bawah. Selain itu juga memiliki

Deaerator Condensor dengan sistem pendingin yang memiliki menara basah (*wet tower*). Kemudian *Supply natural gas*-nya dipanaskan terlebih dahulu dengan udara yang diambil dari *Intermediate Pressure* yang kemudian diteruskan ke kondensor.



GAMBAR 6. Pengaruh suhu masuk terhadap efisiensi *steam bottoming cycle* (Xiang & Yingying, 2007)



GAMBAR 7. Pengaruh suhu masuk terhadap efisiensi *steam bottoming cycle* dan *exergy loss rate*

Pada saat suhu *High Pressure steam* dan suhu dari *reheat steam* berada di 565°C, dan ketika tekanan HP dan IP dinaikkan hingga ke nilai optimal tingkat efisiensi pada *steam bottoming cycle* meningkat dari 38,6% ke 39,2% (Gambar 6), dan efisiensi dari HRSG nya pun juga meningkat dari 87,34% ke 89%, sehingga *combined cycle*-nya pun meningkat dari 57.74% ke 58.48%. Menurut penelitian Xiang & Chen (2007), begitu juga pada saat beban sebesar 75%, efisiensi dari *combined cycle*-nya meningkat sebesar 1,35%, dan pada saat beban 50% efisiensi dari *combined cycle* juga meningkat sebesar 3,18%. Pada efisiensi yang dipengaruhi oleh suhu masuk diketahui bahwa semakin tinggi suhu masuknya dari 590°C semakin berkurang juga *steam bottoming cycle efficiency*-nya (Gambar 7). Selain itu analisis *exergy* pada HRSG ini diketahui bahwa *exergy losses* terkecilnya berada pada suhu 620°C. generator (HRSG)

2. Bahan Bakar

HRSG memerlukan bahan bakar untuk beroperasi. Melalui studi yang telah dilakukan, jenis bahan bakar yang digunakan untuk mengoperasikan HRSG dapat memengaruhi beberapa hal, salah satunya efisiensi HRSG tersebut. Setelah dianalisis, terdapat tiga jenis bahan bakar yang telah diuji efeknya pada kinerja HRSG. Pertama adalah *natural gas*. *Natural gas* memiliki efisiensi yang bisa didapatkan dengan menghitung laju aliran energi panas yang dibutuhkan air menjadi uap (Qh) dengan mengambil data parameter operasi yang dapat digunakan untuk mencari nilai-nilai entalpi (h) pada saat menggunakan bahan bakar *natural gas*.

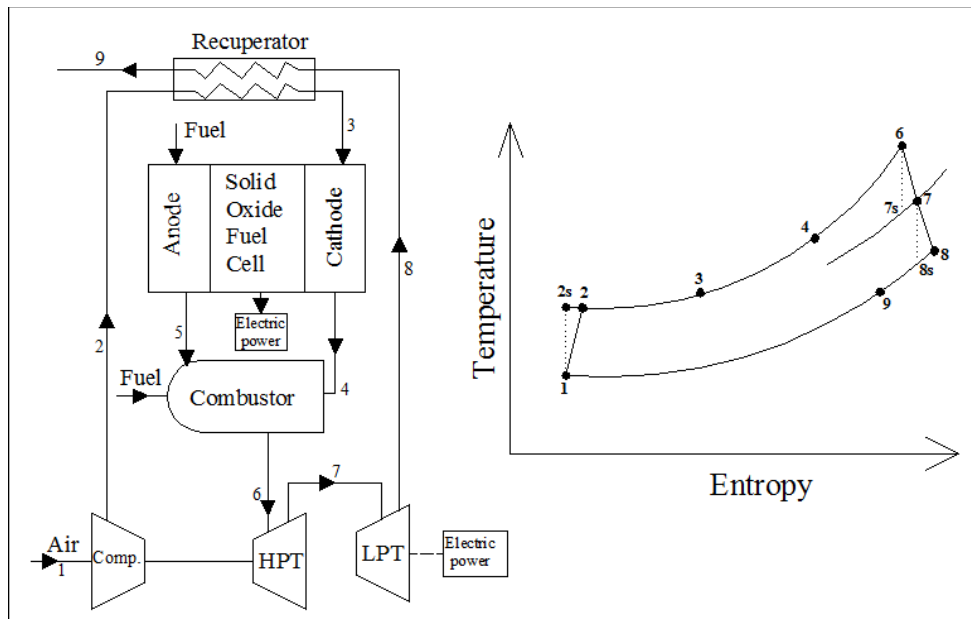
Dari hasil penelitian, efisiensi HRSG menggunakan metode *energy balance* dapat disimpulkan bahwa efisiensi yang dicapai oleh HRSG pada saat *gas turbine* beroperasi menggunakan bahan bakar *natural gas* dan HSD adalah identik, dengan selisih besar nilai efisiensi kurang dari 3% pada masing – masing *load set* operasi.

Untuk hasil penelitian efisiensi HRSG menggunakan metode *thermal loss* terdapat perbedaan nilai efisiensi mencapai 10% pada masing-masing *load set* operasi dengan keunggulan efisiensi diperoleh HRSG pada saat *gas turbine* beroperasi menggunakan bahan

natural gas. HRSG dapat mencapai nilai efisiensi yang optimal sebesar 83.15% pada saat *load set* 100% dengan *gas turbine* beroperasi menggunakan bahan bakar *natural gas* (Ramadhan et al. 2015).

Kedua, jenis bahan bakar yang diuji dan dapat dipakai oleh HRSG adalah *High Speed Diesel* (HSD). Perbedaan pencapaian efisiensi dari HRSG bisa terjadi karena perbedaan karakteristik bahan bakar yang digunakan oleh *gas turbine* (Ramadhan et al. 2015). Pada saat *gas turbine* beroperasi menggunakan bahan bakar HSD, diperlukan *preheating* pada air pengisi untuk mengurangi besar penyerapan energi panas yang terjadi pada *evaporator-tubes*, dengan tujuan untuk menjaga supaya suhu gas buang pada *stack* tidak lebih rendah dari suhu *dew point* sulfur. Hal ini jelas berpengaruh terhadap efisiensi, terutama bila dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar *natural gas* yang memiliki efisiensi energi & termal yang lebih tinggi. Akan tetapi dengan perlakuan tersebut, diharapkan HRSG & GT (*gas turbine*) mempunyai *lifetime* yang lebih panjang karena terhindar dari korosi akibat mengendapnya sulfur pada sisi luar *tube – tube* HRSG.

Ketiga, jenis bahan bakar yang telah diuji dan dapat digunakan pada HRSG adalah SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*). Dapat dilihat pada Gambar 8, penggunaan SOFC-GT (*Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine*) dilakukan dengan cara menggabungkannya dengan sistem bahan bakar utama. Menurut kajian Vojdani et al. (2021), penggabungan penggunaan SOFC-GT dengan bahan bakar lainnya (seperti *natural gas*) akan mempengaruhi efisiensi keseluruhan dari *gas turbine* dan HRSG, serta mengurangi polusi dari bahan bakar secara drastis. Hal itu terjadi karena adanya *internal reforming process*. Melalui perhitungan dan demonstrasi, penggunaan SOFC-GT akan mencapai efisiensi energi sebesar 60% atau lebih. Karena efisiensi dari penggunaan SOFC-GT ini melebihi 50% (yang merupakan efisiensi rata-rata dari CCPP), keunggulan ini dapat digunakan menjadi alternatif bagi pembangkit listrik dengan *gas turbine* yang konvensional.



GAMBAR 8. Letak dan analisis dari SOFC (Vojdani et al. 2021)

3. Beban Gas Turbine

Gas yang masuk ke dalam HRSG merupakan *waste heat* yang dihasilkan oleh *gas turbine*. Pemasukan gas tersebut berupa gas yang memiliki temperatur cukup tinggi. Dalam penggunaan GT, beban yang digunakan saat pengoperasian akan mempengaruhi hasil gas pengeluarannya, laju massa air yang dibutuhkan, dan efisiensi HRSG. Maka dari itu perlu terdapat 4 variasi beban turbin gas, yaitu saat 100%, 90%, 80%, dan 70%, agar dapat membandingkan hasil dan efeknya.

Untuk dapat menyeimbangkan dengan kalor yang masuk, pada beban gas turbin 100% dibutuhkan laju alir massa air sebesar 18,59 kg/s. Bila beban turbin 90%, dibutuhkan laju alir massa air sebesar 17,37 kg/s. Pada beban turbin 80%, dibutuhkan 15,3 kg/s. Lalu pada beban turbin 70%, dibutuhkan laju alir massa air sebesar 15 kg/s. Dengan data tersebut, terbukti bahwa nilai laju aliran massa air/uap terlihat terus mengalami peningkatan seiring meningkatnya beban *gas turbine*. Hal tersebut terjadi karena dengan meningkatnya beban *gas turbine*, maka laju alir massa gas juga akan meningkat (Elian, 2017). Hal ini akan mengakibatkan kalor yang dapat diserap HRSG meningkat sehingga uap yang dapat dihasilkan juga meningkat.

4. Variasi Pinch Point dan Approach Point

Berdasarkan kajian oleh Hidayat & Dwiyanoro (2017), *Pinch point* adalah perbedaan antara suhu *feed water* yang masuk ke evaporator dan suhu gas buang yang keluar dari evaporator ($T_{g3} - T_s$). *Pinch point* adalah variabel yang paling berpengaruh dalam hal efisiensi, di samping itu, batasan perbedaan temperatur (ΔT) hanya memiliki pengaruh yang kurang signifikan (Valdes et al. 2004). Nilai pinch point yang disarankan adalah antara 5°C dan 15°C.

Variasi perubahan *pinch point* pada HRSG akan mempengaruhi penyerapan panas yang terjadi pada modul HRSG sehingga menyebabkan perubahan efisiensi generator secara keseluruhan. Semakin rendah nilai *pinch point*, semakin baik perpindahan panas, yang akan menyebabkan nilai daya total dan efisiensi pembangkit meningkat dan nilai *net plant heat rate* menurun.

Approach point adalah perbedaan antara suhu saturasi air di evaporator. Nilai *approach point* bervariasi dari 5°C sampai 12°C. Variasi perubahan *approach point* pada HRSG akan mempengaruhi penyerapan panas yang terjadi pada modul HRSG di bagian evaporator, yang pada gilirannya dapat menyebabkan perubahan efisiensi mesin pembangkit listrik secara keseluruhan. Semakin rendah nilai *approach point* maka semakin besar *mass flow steam* untuk perpindahan panas secara terus menerus yang mengakibatkan peningkatan nilai daya total dan *net plant efficiency*, serta penurunan nilai *net plant heat rate*.

5. Sistem Kerja Utama HRSG

Dalam studi yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal dalam sistem kerja HRSG yang dapat diubah atau dimodifikasi untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja dari HRSG tersebut. Yang pertama adalah sistem refrigerasi kompresi uap. Tidak dapat dipungkiri bahwa pembangkit listrik siklus gabungan sedang banyak digunakan mengingat kemampuannya dalam menawarkan *output* kerja spesifik yang lebih tinggi dan efisiensi dibandingkan dengan pembangkit listrik termal lainnya untuk konsumsi bahan bakar yang sama. *Output* daya berkurang dengan meningkatnya suhu udara masuk kompresor. Peningkatan kerapatan udara masuk pada kompresor menghasilkan laju aliran massa udara yang lebih tinggi setelah laju aliran volumetrik konstan. Akibatnya kinerja pembangkit listrik turbin gas siklus gabungan meningkat. Sistem refrigerasi kompresi uap merupakan salah satu metode yang efisien untuk pendinginan udara masuk yang dioperasikan pada iklim panas dan lembab (Nayak dan Mahto, 2014).

Peningkatan efisiensi dapat dicapai dengan mengurangi kerugian internal, meningkatkan GTIT dan menurunkan suhu udara masuk ke kompresor siklus turbin gas. *Output* daya dari siklus gabungan meningkat dengan peningkatan suhu masuk turbin gas. Dengan peningkatan suhu masuk turbin, pendinginan sudu turbin diperlukan untuk menghindari pengurangan umur operasi karena oksidasi, mulur dan tegangan termal pada mereka. Pada analisis ini digunakan sistem refrigerasi kompresi uap yang dioperasikan pada iklim panas dan lembab. Sistem ini tidak sensitif terhadap temperatur *wet bulb* udara *ambient*. Sistem refrigerasi kompresi uap tidak memiliki batasan pada suhu udara masuk yang dapat dicapai dan durasi pendinginan udara masuk. Sistem refrigerasi kompresi uap (sistem refrigerasi mekanis) pada saluran masuk kompresor digunakan, yang mengurangi suhu udara masuk ke tingkat yang diinginkan. Efisiensi siklus gabungan berkisar antara 47 hingga 60% dibandingkan dengan 35 hingga 40% dari pembangkit listrik tenaga gas atau uap konvensional.

Model ini melibatkan analisis termodinamika siklus gabungan (HRSG tekanan ganda) menggunakan pendinginan udara masuk dengan siklus kompresi uap. Pendinginan udara

masuk dengan siklus kompresi uap dapat meningkatkan kerja spesifik dan efisiensi pembangkit listrik siklus gabungan. Persentase peningkatan kerja spesifik dan efisiensi dengan pendinginan udara masuk ditemukan masing-masing 8,9% dan 0,6%.

Kemudian, modifikasi yang dapat diberikan pada sistem kerja HRSG adalah pengurangan area pertukaran panas dan kebutuhan daya daur ulangnya. Pengurangan area pertukaran panas dan kebutuhan daya daur ulang diperlukan untuk mengendalikan suhu maksimal (Zebian dan Mitsos, 2014). Akibat area penukar panas dibatasi, hal tersebut menghasilkan perpindahan panas yang kurang efektif dan penurunan tekanan yang lebih besar dari aliran karena jalur yang padat dan terbatas sehingga efisiensi siklus berkurang.

Pemisahan aliran panas, sebelum pengenceran aliran memiliki suhu lebih tinggi dimasukkan ke dalam penukar panas. Pada saluran masuk gas buang, jumlah pengenceran yang lebih rendah diperlukan untuk mengontrol suhu laju aliran fluida yang sekarang lebih kecil. Fraksi yang dipecah kemudian dimasukkan ke dalam penukar panas pada titik tengah hilir, meningkatkan suhu aliran panas dan meningkatkan gradien suhu dari proses pertukaran panas. Konsep ini mampu mengurangi biaya dengan mengurangi kebutuhan area dan meningkatkan efisiensi dengan mengurangi daya yang dibutuhkan untuk mengimbangi kehilangan tekanan gas buang.

Proses pertukaran panas ditingkatkan dengan sedikit modifikasi pada desain penukar panas sambil menahan aliran input dan total energi panas yang ditransfer konstan. Namun, aliran input ke penukar adalah variabel dari proses yang dimilikinya. Oleh karena itu, kinerja keseluruhan proses dan kinerja HRSG serta penghematan biaya modal dapat ditingkatkan dengan optimalisasi simultan HRSG-Split dan desain pembangkit listrik.

Daur ulang gas buang (FGR) dalam boiler juga diperlukan untuk memadamkan gas pembakaran untuk membatasi resimen perpindahan panas dominan radiasi (suhu tinggi) dan memungkinkan perpindahan panas dominan konvektif. FGR diterapkan karena radiasi lebih mahal daripada konveksi untuk tingkat transfer energi panas yang sama. FGR juga meningkatkan efisiensi boiler dan mengurangi emisi, dan diterapkan di hampir

semua pembangkit listrik tenaga batubara yang relatif baru (berusia kurang dari 30 tahun).

Ketiga, modifikasi yang dapat dilakukan adalah meminimalisir exergy yang tidak tersedia. Menurut In dan Lee (2008), untuk meminimalisir exergy yang tidak tersedia, diharuskan untuk melipat suhu tertentu di sisi air masuk, keluar, di saluran masuk gas sistem HRSG hingga pencapaian tertentu dari suhu saluran masuk gas tersebut. Secara umum, temperatur evaporasi optimum untuk efisiensi eksergi maksimum hampir sama dengan analisis siklus dasar, yang mana ini mengartikan bahwa kita dapat memprediksikan kondisi untuk memaksimalkan efisiensi siklus bawah dengan akurasi yang lebih wajar dengan cara meminimalkan eksergi yang tidak tersedia pada sistem HRSG, namun tetap diperlukan pemeriksaan ketergantungan NTU pada suhu penguapan. Dengan demikian, suhu operasi praktis evaporator dalam sistem HRSG harus berbeda dari kondisi exergy minimum.

KESIMPULAN

Pada artikel ini diketahui bahwa terdapat banyak faktor yang mempengaruhi kinerja ataupun efisiensi dari HRSG. Yang pertama adalah desain dari HRSG itu sendiri. Misalnya dengan menggunakan *dual recovery boiler* dan juga penambahan *duct burner* dapat mengurangi penggunaan dari gas emisi CO₂ sebesar 158,68 kg/MWh. Selain itu dalam penggunaan desain *combined cycle* tiga tekanan dengan reheater dapat meningkatkan 0,74% efisiensi pada beban 100% dan 3,18% pada beban 50%. Maka diketahui bahwa setiap perbedaan dari desain HRSG menghasilkan efisiensi yang berbeda-beda.

Pada penggunaan bahan bakar dibagi menjadi dua macam yaitu *natural gas* dan *high speed diesel* (HSD). Penggunaan bahan bakar *natural gas* memiliki efisiensi energi dan termal yang lebih tinggi, akan tetapi dalam memperpanjang *lifetime* lebih baik menggunakan bahan bakar dari *High Speed Diesel* (HSD). Apalagi jika digabungkan dengan SOFC-GT dapat meningkatkan efisiensi energi sebesar 60%.

Terdapat 4 variasi beban turbin gas, yaitu saat 100%, 90%, 80%, dan 70%, agar dapat membandingkan hasil dan efeknya. Dengan meningkatnya beban gas turbin, maka laju alir massa gas juga akan meningkat. Hal ini akan mengakibatkan kalor yang dapat diserap HRSG

meningkat sehingga uap yang dapat dihasilkan juga meningkat.

Dalam perbedaan variasi perubahan *pinch point* pada HRSG akan mempengaruhi penyerapan panas yang terjadi pada modul HRSG sehingga menyebabkan perubahan efisiensi generator secara keseluruhan. Semakin rendah nilai *pinch point*, semakin baik perpindahan panas, yang akan menyebabkan nilai daya total dan efisiensi pembangkit meningkat dan nilai *net plant heat rate* menurun. Sedangkan variasi perubahan *approach point* pada HRSG juga akan memengaruhi penyerapan panas yang terjadi pada modul HRSG di bagian evaporator, yang pada gilirannya dapat menyebabkan perubahan efisiensi mesin pembangkit listrik secara keseluruhan.

Artikel ini hanya mencakup sedikit faktor-faktor yang dapat mempengaruhi kinerja dari *combined cycle*. Kami berharap peneliti selanjutnya lebih baik lagi dalam menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi dari kinerja tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dana dari Kementerian Pendidikan dengan hibah Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT) dengan nomor kontrak 132/E5/PG.02.00.PT/2022

DAFTAR PUSTAKA

- Elian, A. (2017). *Perancangan Termal Heat Recovery Steam Generator Sistem Tekanan Dua Tingkat Dengan Variasi Beban Gas Turbin*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Fajar, K., et al. (2016) *Modifikasi Heat Recovery Steam Generator (HRSG) Subkritik Menjadi Superkritik untuk Meningkatkan Efisiensi Sistem PLTGU di Indonesia*. In *National Symposium on Thermofluids 2016*.
- Hidayat, R., Bambang A.D. (2017). Analisa Pengaruh Variasi Pinch Point dan Approach Point terhadap Performa HRSG Tipe Dual Pressure. *Jurnal Teknik ITS*. 6(1): B137-B141.

- In, J. S., Sang, Y. L. (2008). Optimization of heat recovery steam generator through exergy analysis for combined cycle gas turbine power plants. *International Journal of Energy Research*. 32(9): 859-869.
- Jouhara et al. (2018). Waste heat recovery technologies and applications "Thermal Science and Engineering Progress 6: 268-289
- Mohtaram, S. et al. (2020). Multi-Objective Evolutionary Optimization & 4E analysis of a bulky combined cycle power plant by CO₂/CO/NO_x reduction and cost controlling targets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 128: 109898.
- Mulyani, D., Djoni H. (2018). Pengaruh Efisiensi Energi Listrik Pada Sektor Industri dan Komersial Terhadap Permintaan Listrik di Indonesia. *Jurnal Ekonomi Kuantitatif Terapan*. 11(1), 1-17.
- Muniandy et al. (2022). Study on The Improvement of Heat Recovery Steam Generator Efficiency—A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 94(2), 89-98.
- Nadir, M., Adel G. (2015). Thermodynamic optimization of several (heat recovery steam generator) HRSG configurations for a range of exhaust gas temperatures. *Energy*. 86: 685-695.
- Rakhman, A. (2013). *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*.
- Ramadhan, A.I., et al. (2015) Analisis Pengaruh Pemakaian Bahan Bakar Terhadap Efisiensi Hrsg Ka13E2 Di Muara Tawar Combine Cycle Power Plant. *DINAMIKA Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 7(1).
- Sahlan, S., Abdul. R. (2013). Sistem Pengolahan Air Limbah Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU): Studi Kasus PLTU Muara Karang. *JURNAL POWERPLANT*. 1(1): 61-78.
- Sharma, M., Onkar S. (2016). Exergy analysis of dual pressure HRSG for different dead states and varying steam generation states in gas/steam combined cycle power plant. *Applied Thermal Engineering*. 93: 614-622.
- Suryady, S., Teguh S. (2021). *Sistem Kerja Heat Recovery Steam Generator (HRSG) Terhadap Pembangkit Listrik Tenaga Gas Dan Uap (PLTGU)*. Universitas Gunadarma, Depok.
- UNKRIS. (2020). *Efisiensi Termal*.
- Valdes, M., et al. (2004). Influence of the heat recovery steam generator design parameters on the thermoeconomic performances of combined cycle gas turbine power plants. *International journal of energy research*. 28(14): 1243-1254.
- Xiang, W. and Yingying, C. (2007). Performance improvement of combined cycle power plant based on the optimization of the bottom cycle and heat recuperation. *Journal of Thermal Science*. 16(1): 84-89.
- Zebian, H., Alexander, M. (2014). A split concept for HRSG (heat recovery steam generators) with simultaneous area reduction and performance improvement. *Energy*. 71: 421-431.

PENULIS:

Fayza Yulia

Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Industrial Technology, Universitas
Pertamina, South Jakarta 12220, Indonesia.

Email: fayza.yulia@universitaspertamina.ac.id

Rifat Satrio, Arya Dwi, Rizky Vindra, Daffa
Febriansyah, Wiweko Alfaraby, Fitri Wahyuni

Department of Mechanical Engineering,
Universitas Pembangunan Nasional Veteran
Jakarta, Jakarta, 12450, Indonesia.

Reda Rizal

Department of Industrial Engineering,
Universitas Pembangunan Nasional Veteran
Jakarta, Jakarta, 12450, Indonesia