

Efisiensi Boiler Dan Turbin Uap Untuk PLTU Unit 2 PT. XYZ

Husni Mubarak¹⁾, Mahmuddin²⁾, Sungkono³⁾, Muhammad Arham⁴⁾

^{1), 2), 3)}Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Muslim Indonesia

⁴⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Patria Artha

E-mail: mahmud_umitek@yahoo.co.id

Abstrak

PT. XYZ memiliki kapasitas daya listrik sebesar 70 MW dan mulai beroperasi pada tahun 2014 selama pengoperasiannya telah terjadi penurunan daya dari 35 MW pada saat komisioning menjadi 32 MW. Penting dilakukan penelitian untuk mengetahui kinerja boiler dan turbin. Salah satu metode yang dapat dilakukan adalah dengan menguji kinerja secara langsung menggunakan alat ukur dengan beberapa parameter. Penelitian ini menganalisis dampak perubahan rasio udara dan bahan bakar atau *air fuel ratio* (AFR) terhadap efisiensi boiler, turbin, dan efisiensi termal siklus dalam suatu sistem termal. Variasi *excess O₂* pada gas buang dievaluasi pada tingkat 5.0%, 5.5%, dan 6.0%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi boiler mencapai puncaknya pada *excess O₂* sebesar 5.0% (73.50%), sedangkan peningkatan *excess O₂* atau AFR menyebabkan penurunan efisiensi. Efisiensi turbin tetap relatif stabil (74-76%) meskipun terjadi penurunan dengan peningkatan AFR. Efisiensi termal siklus mencapai maksimum pada AFR 13.61 (45.60%), tetapi menurun pada nilai AFR yang lebih tinggi.

Kata Kunci: AFR, *excess O₂*, efisiensi boiler, efisiensi turbin

Abstract

PT. XYZ has an electrical power capacity of 70 MW and began operating in 2014. During its operation, there has been a decrease in power from 35 MW during commissioning to 32 MW. It is important to conduct research to assess the performance of the boiler and turbine. One method that can be employed is to directly test the performance using measuring instruments with several parameters. This research analyzes the impact of changes in the air-to-fuel ratio (AFR) on the efficiency of the boiler, turbine, and thermal cycle efficiency in a thermal system. Variations in *excess O₂* in the flue gas were evaluated at levels of 5.0%, 5.5%, and 6.0%. The results of the study indicate that the boiler efficiency peaks at an *excess O₂* level of 5.0% (73.50%), while increasing *excess O₂* or AFR leads to a decrease in efficiency. Turbine efficiency remains relatively stable (74-76%) despite a decrease with increasing AFR. The thermal cycle efficiency reaches a maximum at an AFR of 13.61 (45.60%), but decreases at higher AFR values.

Keywords: AFR, *excess O₂*, boiler efficiency, turbine efficiency.

1. PENDAHULUAN

Pada era modern seperti saat ini, listrik merupakan kebutuhan yang sudah termasuk dalam kebutuhan primer yang tidak bisa dinomorduakan lagi. Kebutuhan listrik telah menjangkau semua lapisan masyarakat dari masyarakat kelas bawah, kelas menengah hingga masyarakat kelas atas dengan masing-masing kebutuhan listrik yang berbeda. Kebutuhan akan listrik ini pastinya akan terus meningkat seiring dengan tingkat pertumbuhan masyarakat modern. Dalam hal ini pemerintah sebagai lembaga tertinggi harus memiliki sikap yang tanggap terhadap kebutuhan masyarakat secara luas. Energi listrik kini merupakan landasan bagi kehidupan modern dan ketersediaannya dalam jumlah dan mutu yang cukup menjadi syarat bagi suatu masyarakat yang ingin memiliki taraf kehidupan yang lebih baik dan perkembangan industri yang maju disegala bidang.

Pembangkit listrik tenaga uap sebagai penghasil energi listrik yang paling sering digunakan untuk pemenuhan kebutuhan sumber energi listrik bagi kehidupan masyarakat mengalami banyak evaluasi di dalam proses kerja. Hal tersebut dilakukan untuk meningkatkan performansi pembangkit yang telah ada sehingga dengan pemakaian sejumlah bahan bakar yang sama dapat diperoleh nilai efisiensi sistem pembangkit yang lebih tinggi dan jumlah pasokan listrik ke masyarakat lebih baik. Oleh karena itu kemampuan pembangkit listrik untuk tampil prima merupakan hal yang penting agar ketersediaan listrik di Indonesia tetap terjaga. Segala kerusakan baik besar ataupun kecil harus segera ditanggulangi secara cepat dan tepat.

PLTU adalah suatu pembangkit listrik di mana energi listrik dihasilkan oleh generator yang diputar oleh turbin uap yang memanfaatkan tekanan uap hasil dari penguapan air yang dipanaskan oleh bahan bakar di dalam ruang bakar (boiler). Salah satu jenis PLTU adalah PLTU berbahan bakar batubara. PLTU berbahan bakar batubara sangat vital penggunaannya di Indonesia maupun di dunia. PLTU batubara merupakan sumber utama energi di dunia. Di mana 60 % pasokan listrik dunia masih bertumpu pada PLTU berbahan bakar batubara. PLTU merupakan suatu sistem yang saling terkait antara satu komponen dengan komponen lainnya.

Kurniawan, et al. [1] melakukan penelitian mengenai efisiensi termal dari boiler pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) di Amurang Unit 1. Metode yang digunakan

adalah metode langsung dan tidak langsung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari hasil perhitungan diperoleh efisiensi termal boiler sebesar 91,73 %, dan 92,33 % berturutan. Jika dibandingkan dengan efisiensi termal menurut spesifikasi boiler maka perbedaannya adalah 0.41 % dan 0.19 %. Aziz and Hasan [2], menyatakan bahwa penggunaan jenis batubara LRC dan MRC juga sangat mempengaruhi efisiensi boiler. Apriandi and Mursadin [3] melakukan penelitian mengenai kinerja Turbin PLTU PT. Indocement. Hasil penelitian menunjukkan bahwa telah terjadi penurunan kinerja dari tahun 1998-2018 sebesar 1,8%. Rante and Reska [4] melakukan penelitian mengenai efisiensi boiler Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT. Semen Tonasa. Nilai efisiensi rata-rata boiler sejak tanggal 2 April 2017 hingga 11 Mei 2017 untuk metode langsung sebesar 67,98 %; sedangkan untuk metode tidak langsung sebesar 78,81%. Beberapa penelitian mengenai PLTU juga telah dilakukan, semua berkaitan dengan kinerja baik boiler maupun turbin [5-9].

PT. Semen Tonasa (Persero) merupakan suatu perusahaan yang menggunakan boiler sebagai penghasil uap yang nantinya digunakan untuk menggerakkan turbin untuk menghasilkan listrik. Listrik ini digunakan untuk mendukung pengoperasian pabrik terutama pabrik Semen Tonasa V. PT. Semen Tonasa membangun pembangkit listrik tenaga uap karena ketidaksanggupan PT. PLN memasok energi listrik untuk pengoperasian pabrik Tonasa V, dimana PT. PLN hanya sanggup memasok listrik sebesar 20 MW dari 60 MW yang dibutuhkan pembangkit listrik tenaga uap PT. Semen Tonasa ini memiliki kapasitas daya sebesar 2x35 MW dan mulai beroperasi pada tahun 2014. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari PLTU PT. Semen Tonasa, selama pengoperasiannya telah terjadi penurunan daya mampu dari 35 MW pada saat komisioning menjadi 32 MW pada saat operasi sekarang. Dari sinilah timbul gagasan untuk melakukan analisis kinerja boiler pada pembangkit listrik tenaga uap PT. Semen Tonasa, khususnya pada boiler unit 2. Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk mengetahui performansi keseimbangan energi pada pembangkit listrik tenaga uap unit 2 PT. Semen Tonasa pada kondisi operasi 2013 dengan kondisi tahun 2022, serta untuk mengetahui faktor-faktor penyebab penurunan performansi keseimbangan energi pada pembangkit listrik tenaga uap unit 2 PT. Semen Tonasa.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Alat dan Bahan

Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian adalah :

- a. Termometer, alat ini berfungsi mengukur secara langsung temperature permukaan benda.
- b. Termokopel, alat ini digunakan untuk mengukur temperatur pada sistem *boiler* dan turbin.
- c. Sensor oksigen, merupakan alat untuk mengukur kadar oksigen di dalam gas buang.
- d. Flow meter, sebagai alat ukur debit baik udara *Secondary*, uap panas lanjut, air umpan, hingga batubara pada sistem *boiler*.
- e. APD, merupakan perangkat wajib yang digunakan selama di area PLTU dalam rangka penelitian dan pengecekan alat ukur.

Bahan yang diperlukan selama kegiatan penelitian ini adalah :

- a. Kain majun, berfungsi sebagai kain pembersih bagi peralatan saat digunakan di area PLTU.
- b. Cairan pembersih, merupakan cairan yang digunakan saat pengecekan alat ukur ditemukan dalam kondisi kotor karena akumulasi *ash*.

2.2 Tahapan Penelitian

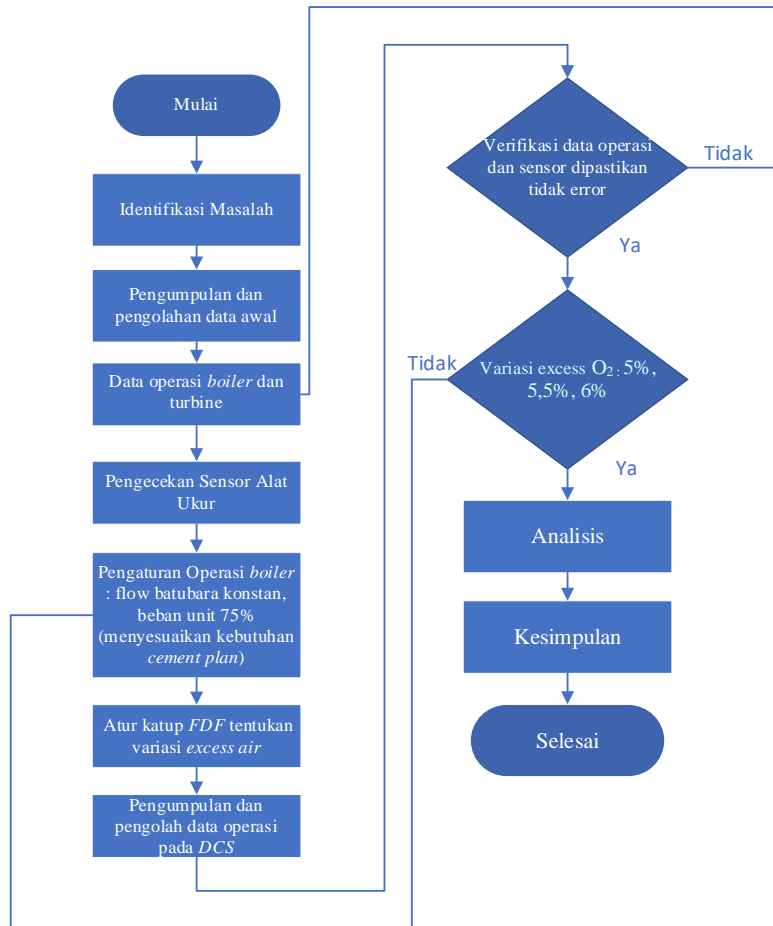
Dalam melakukan penelitian akan dilakukan pengaturan pada sistem operasi PLTU sehingga memenuhi parameter yang akan diuji tingkat efisiensinya dalam berbagai variasi *excess air*. Tahapan proses pengumpulan dirincikan sebagai berikut :

- a. Melakukan pengecekan pada alat ukur yang akan mengukur parameter sebagai berikut :
 - 1) O_2 Content, yaitu indikasi kadar oksigen dalam gas buang.
 - 2) kW dan kWh meter, yaitu alat untuk mengukur besarnya daya dan energi yang dibangkitkan oleh turbin.
 - 3) Coal Flow, yaitu alat menunjukkan debit bahan bakar/batubara yang digunakan.

- 4) PA Flow, menunjukkan debit udara Primary yang digunakan sebagai udara pengering dan pengangkut batubara.
 - 5) SA Flow, menunjukkan debit udara Secondary yang digunakan sebagai udara pembakaran.
 - 6) SA Temperature, menunjukkan temperature udara sekitar yang digunakan sebagai udara pembakaran.
 - 7) Exhaust Temperature, menunjukkan temperature uap setelah melalui turbin.
 - 8) Vacuum Pressure, menunjukkan tekanan ruangan setelah sudu terakhir turbine.
 - 9) Condensate Temperature, menunjukkan temperature air kondensasi setelah melalui kondensor.
 - 10) Main steam pressure (MSP) yaitu tekanan uap utama.
 - 11) Main steam temperature (MST) yaitu temperatur uap utama.
 - 12) Main steam flow (MSF) yaitu aliran uap utama.
 - 13) Feed water pressure (FWP) yaitu tekanan air umpan.
 - 14) Feed water temperature (FWT) yaitu temperatur air umpan.
 - 15) Feed water flow (FWF) yaitu debit air umpan.
- b. Melakukan *setting* operasi sistem PLTU untuk memenuhi parameter pengujian sebagai berikut :
- 1) Beban unit berada pada 75%.
 - 2) Debit batubara diposisikan semi-auto agar debit batubara yang disuplai kedalam ruang bakar dijaga konstan.
 - 3) Melakukan Adjust pada katup FDF agar mencapai tingkat O₂ yaitu : 5% dan 6% pada gas buang, sehingga didapatkan tingkat kebutuhan udara secondary yang akan diuji,
 - 4) Setiap perubahan tingkat O₂ akan dilakukan monitoring kestabilan operasi dan parameter selama 5 menit terlebih dahulu sebelum melakukan pengambilan data.
 - 5) Pengujian tiap tingkat O₂ dilakukan selama 10 menit dengan interval pengambilan data secara otomatis 1 menit.

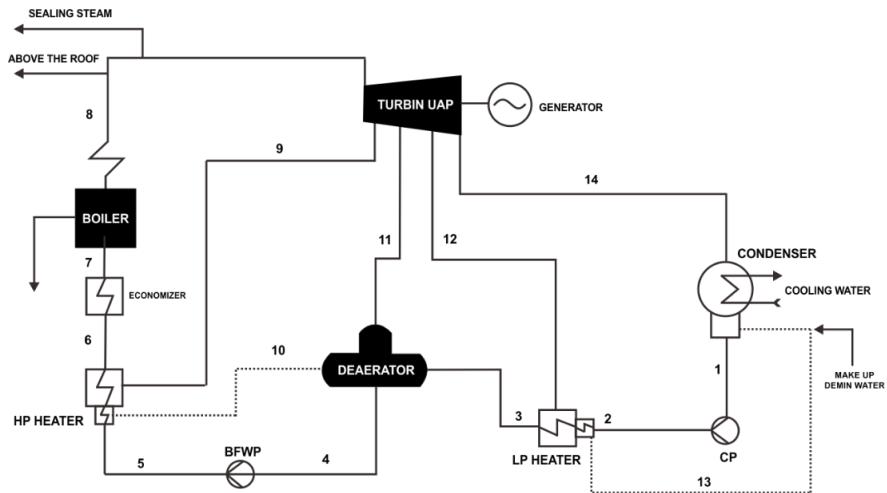
- c. Pengolahan data dan hasil, setelah semua proses pengambilan data dilakukan. Data yang tersimpan di dalam sistem DCS akan dilakukan penarikan data sehingga berbentuk tabel, untuk selanjutnya akan diverifikasi dan dipastikan tidak ada data yang error. Jika ditemukan ketidaksesuaian atau error pada pembacaan alat ukur akan dilakukan pengecekan kembali pada alat ukur tersebut dan dilakukan pengambilan data kembali sesuai tahapan sebelumnya.
- d. Pengolahan dan analisa data pengujian, setelah proses pengujian pada beberapa tingkat kebutuhan udara *secondary* data yang didapatkan dari DCS akan dianalisa secara kualitatif dan juga akan diolah dalam bentuk grafik atau tabel sehingga dapat pula dianalisa secara kuantitatif. Dari beberapa tingkat variasi kebutuhan udara *secondary* akan dibahas tingkat efisiensi *boiler* dan turbin pada masing – masing variasi kebutuhan udara.
- e. Penyusunan Laporan, keseluruhan tahapan yang telah dilakukan dalam penelitian dan hasil dari penilitan yang telah dibahas, akan disusun menjadi laporan yang sistematis.

Dalam melakukan penelitian di PLTU Semen Tonasa, terdapat beberapa tahapan yang digambarkan pada diagram alir penelitian (Gambar 1).



Gambar 1. diagram alir penelitian

2.3 Skema Siklus Kerja PLTU Semen Tonasa



Gambar 2. skema siklus PLTU Semen Tonasa

- a. Keterangan : Terdapat 4 titik yang terdiri atas titik 9, 11, 12, sebagai uap ekstraksi pada turbin yang akan digunakan untuk sumber panas pada *Feed Water Heater (FWH)* dan titik 14 sebagai air kondensasi.
- b. Pompa yang digunakan dalam siklus terdiri atas 2 jenis, yakni pompa feedwater dan pompa kondensat.
- c. Uap campuran yang telah melalui turbin diarahkan ke ruang kondensor yang telah dikondisikan vakum dan didinginkan dengan air laut.
- d. Pada titik 1 - 6, 9, 12, pengukuran kondisi berdasarkan pembacaan sensor temperatur tiap titik dan untuk mengetahui nilai entalpi dikarenakan pada titik tersebut dalam fasa cair jenuh.
- e. Pada titik 7, 8, 10, 11, dan 13 pengukuran kondisi berdasarkan pembacaan sensor temperatur dan tekanan tiap titik untuk mengetahui nilai entalpi dikarenakan pada titik tersebut dalam fase uap panas lanjut dan uap campuran.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Efisiensi boiler terhadap rasio udara dan bahan bakar

Efisiensi boiler merupakan sebuah besaran yang menunjukkan hubungan antara suplai energi masuk ke dalam boiler dengan energi keluaran yang dihasilkan oleh boiler, dalam penelitian ini perbandingan antara jumlah energi panas yang didapatkan oleh batubara terhadap jumlah energi panas yang dikonversi dalam bentuk uap panas lanjut yang akan disuplai ke turbin kemudian dikonversi menjadi energi mekanik yang akan memutar generator sehingga mampu menghasilkan energi listrik.

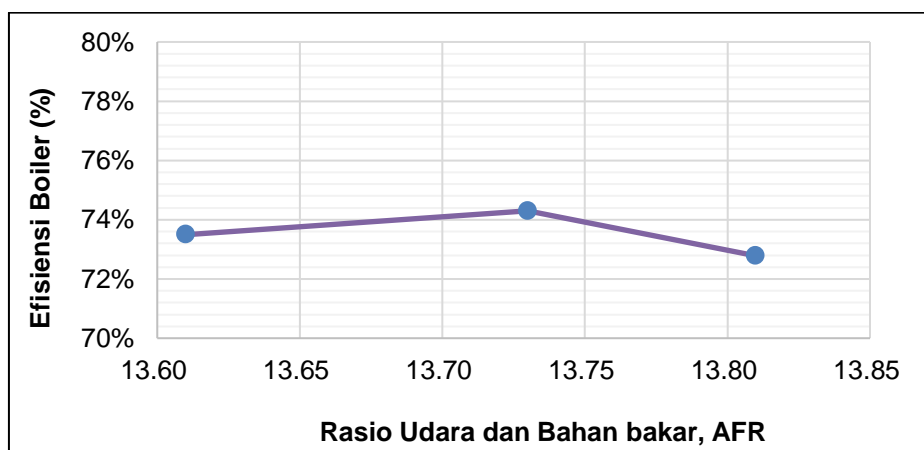
Gambar 3 memperlihatkan bahwa efisiensi boiler berubah beriring dengan bertambahnya rasio udara dan bahan bakar atau air fuel ratio (AFR) yang digunakan, namun penelitian ini tampak berbeda jika dibandingkan penelitian pada umumnya. Hal ini disebabkan karena variasi yang digunakan pada penelitian ini dimulai dari kondisi oksigen berlebih 5% yang mana pada umumnya penelitian dilakukan dimulai dari kondisi tanpa oksigen berlebih. Adapun kebutuhan udara secondary yang ditingkatkan menyebabkan energi panas yang dihasilkan batubara diserap oleh udara yang tidak bereaksi saat proses pembakaran dan akan ikut terbuang bersama gas buang dan menjadi losses terbesar pada peralatan boiler.

Selain itu excess O₂ yang tinggi akan menimbulkan peningkatan kerugian

panas pada boiler yang disebabkan karena adanya uap air, sehingga udara ikut menyerap energi panas yang dihasilkan oleh ruang bakar, jumlah energi yang terbuang akan berbanding lurus terhadap peningkatan udara secondary. Pada akhirnya boiler membutuhkan energi panas yang cukup tinggi untuk menghasilkan jumlah uap yang relevan.

Selain itu excess O₂ yang tinggi akan menimbulkan kerugian yang tinggi pada flue gas yang disebabkan karena besarnya nilai kelembaban pada bahan bakar sehingga mempengaruhi proses pembakaran. Pada akhirnya boiler membutuhkan energi panas yang cukup tinggi untuk menghasilkan jumlah uap yang relevan agar pembakaran terjadi dengan sempurna, hal ini tentu saja mempengaruhi efisiensi pada boiler.

Volume udara dalam jumlah besar di dalam ruang bakar akan meningkatkan nilai resistansi konveksi pada ruang bakar sehingga losses boiler yang dihitung akan semakin meningkat berbanding lurus dengan penurunan nilai efisiensi boiler. Aliran udara yang bertempatur tinggi akan mengalirkan energi kalor yang telah dihasilkan dalam ruang bakar bersama gas buang menuju cerobong. Dalam hal ini efisiensi boiler tertinggi dicapai saat rasio udara dan bahan bakar di angka terendah, kemudian akan turun seiring dengan bertambahnya nilai rasio udara dan bahan bakar (AFR).



Gambar 3. efisiensi boiler (η_{boiler}) dengan rasio udara dan bahan bakar (AFR)

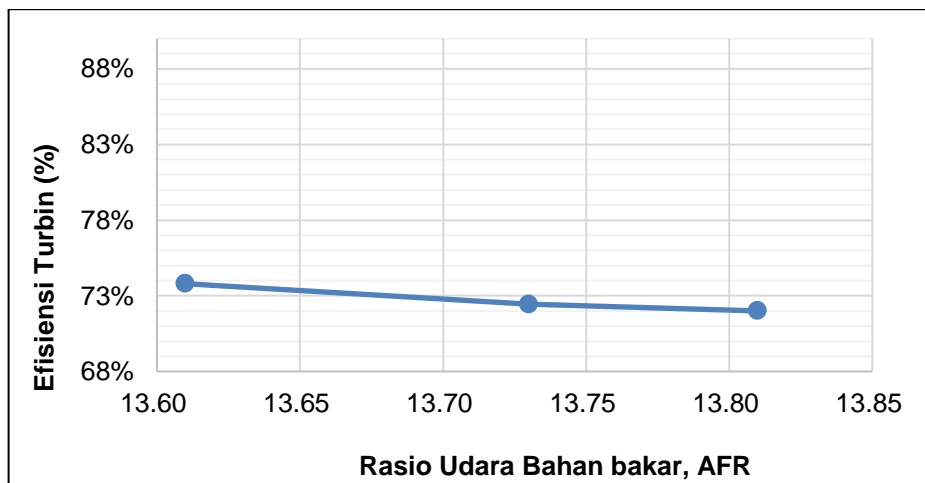
Pada kondisi ini energi panas yang dibawah oleh udara semakin banyak sehingga kebutuhan energi panas untuk menghasilkan jumlah uap yang sama semakin meningkat pula. Dari nilai efisiensi terlihat bahwa efisiensi maksimum terjadi pada saat rasio udara dan bahan bakar diangka 13,61, saat pengoprasian boiler secara

actual kondisi rasio udara dan bahan bakar sebesar 13,61 dapat menghasilkan efisiensi maksimum sebesar 74,30% sedangkan pada pengoprasian *boiler* dikondisi rasio udara dan bahan bakar sebesar 14,25 hanya menghasilkan efisiensi sebesar 76,13%. Kehilangan panas (*heat loss*) atau juga bisa disebut kehilangan energi merupakan salah satu faktor penting yang sangat berpengaruh dalam mengidentifikasi efisiensi pada boiler.

b. Efisiensi turbin terhadap rasio udara dan bahan bakar

Hasil analisis data terkait efisiensi turbin terhadap rasio udara dan bahan bakar dapat diperlihatkan pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa efisiensi turbin cenderung stabil dengan bertambahnya rasio udara dan bahan bakar (AFR) yang digunakan, adanya penambahan udara hanya berimplikasi terhadap penurunan efisiensi *boiler* namun tekanan dan temperatur uap panas lanjut yang disuplai ke turbin tidak mengalami perubahan secara signifikan.

Peningkatan variasi udara *secondary* yang menyebabkan penurunan laju alir uap akan tetapi temperatur dan tekanan uap masih dalam batas standarisasi manufaktur turbin sehingga efisiensi dari turbin, sehingga tidak menimbulkan pengaruh secara signifikan terhadap rasio udara dan bahan bakar yang berdampak pada peningkatan efisiensi. Maka semakin bertambahnya nilai rasio udara dan bahan bakar hanya sedikit mempengaruhi kinerja turbin dan generator dalam menghasilkan daya listrik. Secara teoritis efisiensi turbin merupakan perbandingan antara jumlah energi panas yang dimasukkan ke turbin dalam bentuk uap panas lanjut terhadap energi listrik yang dihasilkan oleh generator.



Gambar 4. efisiensi turbin (η_{turbin}) dengan rasio udara dan bahan bakar (AFR)

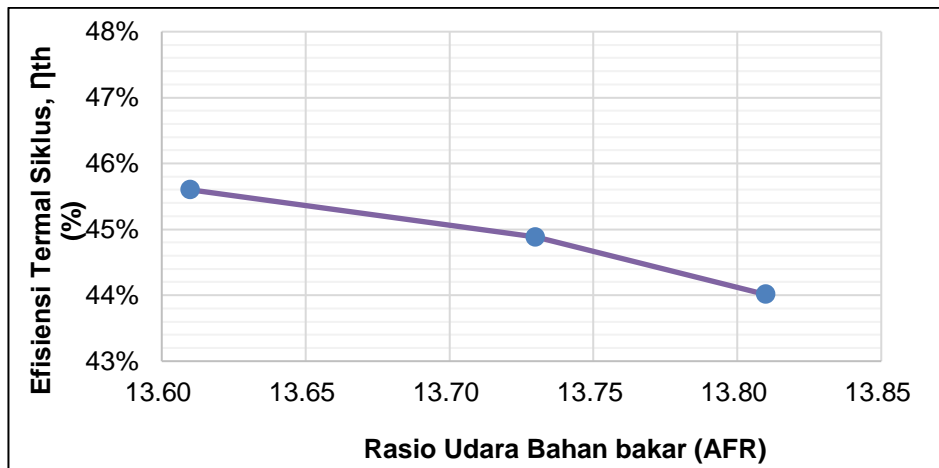
Aliran uap panas yang berasal dari boiler mengalami sedikit penurunan temperatur dan tekanan dikarenakan peningkatan rasio udara dan bahan bakar namun suplai bahan bakar batubara tetap konstan. Dalam hal ini efisiensi turbin cenderung stabil namun terdapat sedikit penurunan ketika rasio udara dan bahan bakar ditingkatkan. Efisiensi turbin yang dicapai saat rasio udara dan bahan bakar di tingkatkan akan terlihat bahwa efisiensi maksimum terjadi pada saat rasio udara dan bahan bakar diangka 13,61.

Pada kondisi rasio udara dan bahan bakar sebesar 13,61 pengoperasian turbin dapat menghasilkan efisiensi maksimum sebesar 74,30% sedangkan pada kondisi rasio udara dan bahan bakar sebesar 14,25 menghasilkan efisiensi turbin sebesar 76,13%. Hal ini disebabkan peningkatan rasio udara dan bahan bakar memerlukan peningkatan penggunaan energi panas pula untuk tetap menghasilkan uap dengan kualitas yang sama.

c. Efisiensi thermal siklus terhadap rasio udara dan bahan bakar

Efisiensi thermal adalah ukuran tanpa dimensi yang menunjukkan performa peralatan termal seperti mesin pembakaran dalam dan sebagainya. Efisiensi termal siklus merupakan perbandingan antara jumlah energi panas yang didapatkan dari bahan bakar batubara terhadap jumlah energi termal yang dihasilkan oleh berbagai peralatan dalam siklus termal PLTU Semen tonasa untuk menghasilkan daya listrik.

Gambar 5 memperlihatkan bahwa efisiensi termal siklus berubah seiring dengan bertambahnya rasio udara dan bahan bakar (AFR) yang digunakan, hal ini disebabkan oleh peningkatan suplai udara pembakaran. Kebutuhan udara pembakaran yang ditingkatkan mempengaruhi kinerja salah satu peralatan termal yakni boiler. Boiler merupakan penyuplai energi panas yang dihasilkan batubara diserap oleh udara yang tidak bereaksi saat proses pembakaran dan akan ikut terbuang bersama gas buang. Semakin banyak energi panas yang ikut terbuang bersama maka udara penurunan efisiensi boiler akan semakin besar.



Gambar 5. efisiensi termal siklus ($\eta_{\text{termal siklus}}$) dengan rasio udara dan bahan bakar (AFR)

Aliran udara dalam jumlah besar ke dalam ruang bakar setelah melalui proses pembakaran akan terbuang bersama gas buang menuju ekshouse. Dalam hal ini efisiensi termal siklus tertinggi dicapai saat rasio udara dan bahan bakar di angka terendah, kemudian akan turun seiring dengan bertambahnya nilai rasio udara dan bahan bakar. Dari nilai efisiensi termal terlihat bahwa efisiensi termal maksimum terjadi pada saat rasio udara dan bahan bakar diangka 13,61. Pada saat rasio udara dan bahan bakar sebesar 13,61 dapat menghasilkan efisiensi termal siklus maksimum sebesar 45,60% sedangkan pada rasio udara dan bahan bakar sebesar 14,25 hanya menghasilkan efisiensi termal sebesar 44,88%. Terlihat terjadi penurunan efisiensi termal pada titik pengujian rasio udara dan bahan bakar sebesar 13,73, hal ini disebabkan lajur alir air blowdown rata - rata pada variasi AFR 13,73 sebesar 3,76 kg/detik dan bila dibandingkan pada variasi AFR 13,81 sebesar 3,73 kg/detik.

Peningkatan air blowdown menyebabkan loss pada siklus semakin meningkat. Penurunan efisiensi termal siklus pada saat AFR ditingkatkan identik dengan hasil penelitian serupa terkait excess air. Efisiensi termal siklus pada excess air dan beban bervariasi yang dikutip dari penelitian tersebut didapatkan nilai efisiensi termal siklus maksimum sebesar 45,60% pada excess air sebesar 5%. Setelah kondisi ini semakin besar nilai excess air akan semakin kecil nilai efisiensi termal siklus.

Kebutuhan udara yang optimal pada proses pembakaran terhadap kinerja boiler dan turbin diukur dengan semakin tingginya efisiensi yang dihasilkan, yang mana kondisi dengan variasi excess O₂ sebesar 3,0% atau setara dengan AFR sebesar 10,24 menghasilkan tingkat efisiensi termal boiler dan turbin paling tinggi sebesar 85,12% dan 89,95%.

Rasio jumlah udara pembakaran untuk udara ideal guna mengoptimalkan proses pembakaran pada boiler yang bertujuan untuk mendapatkan proses pembakaran sempurna. Parameter tersebut sejalan dengan penelitian Syarief, et al. [10] analisa hasil penelitiannya menunjukkan bahwa apabila jumlah flow udara aktual yang dibutuhkan untuk proses pembakaran nilainya semakin mendekati dengan jumlah flow udara idealnya maka secara tidak langsung akan menaikkan nilai efisiensi pembakaran pada boiler, dikarenakan deviasi atau selisih antara jumlah flow udara aktual dengan udara ideal lebih sedikit sehingga hal ini menjadi salah satu pengaruh dalam proses pembakaran yang terjadi pada boiler.

4. SIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan beberapa temuan kunci terkait pengaruh rasio udara dan bahan bakar (AFR) pada efisiensi sistem termal:

- a. Efisiensi boiler tertinggi tercapai pada *excess* O₂ sebesar 5.0%, dengan nilai sebesar 73.50%. Peningkatan *excess* O₂ menyebabkan penurunan efisiensi, misalnya pada *excess* O₂ sebesar 6.0%, efisiensi menurun menjadi 72.78%.
- b. Efisiensi turbin relatif stabil dengan variasi AFR, dengan nilai efisiensi sekitar 74-76%. Peningkatan AFR memiliki dampak minimal terhadap efisiensi turbin.
- c. Efisiensi termal siklus maksimum terjadi pada AFR sebesar 13.61, dengan nilai sebesar 45.60%. Peningkatan AFR menyebabkan penurunan efisiensi termal, contohnya pada AFR 14.25, efisiensi turun menjadi 44.88%.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Y. Kurniawan, H. Gunawan, and B. Maluegha, "Kajian efisiensi termal dari boiler di pembangkit listrik tenaga uap Amurang unit 1," *JURNAL POROS TEKNIK MESIN UNSRAT*, vol. 4, no. 2, pp. 97-103, 2015.
- [2] A. Aziz and A. R. Hasan, "Evaluasi hate rate dan efisiensi suatu PLTU dengan menggunakan batubara yang berbeda dari spesifikasi design," *Jurnal Energi dan Lingkungan*, vol. 11, no. 1, pp. 1-6, 2015.

- [3] R. Apriandi and A. Mursadin, "Analisis Kinerja Turbin Uap Berdasarkan Performance Test PLTU PT. Indocement P-12 Tarjun," *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 1, no. 1, pp. 37-46, 2016.
- [4] R. P. Rante and L. Reska, "Efisiensi Boiler Pada Boiler Turbin Generator (Btg) Unit B Dengan Kapasitas 2x25 MW Di Power Plant PT. Semen Tonasa," *Tugas Akhir, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar*, 2017.
- [5] H. Abbas, J. Jamaluddin, and A. Amiruddin, "Analisa Pembangkit Tenaga Listrik Dengan Tenaga Uap Di PLTU," *ILTEK: Jurnal Teknologi*, vol. 15, no. 02, pp. 103-106, 2020.
- [6] A. Aswan, E. Susilowati, and Juriwon, "Analisis energi boiler pipa air menggunakan bahan bakar solar," *KINETIKA*, vol. 8, no. 2, pp. 7-13, 2017.
- [7] F. M. Pallea, B. Belyamin, and P. Sukusno, "Analisis Eksergi Pada Boiler & Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Uap Subcritical 315 MW," in *Seminar Nasional Teknik Mesin*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 1153-1159.
- [8] N. T. Sahda, J. M. Sentosa, and L. Adhani, "Analisis Efisiensi Boiler menggunakan Metode Langsung di Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Bantargebang," *Journal of Engineering Environmental Energy Science*, vol. 1, no. 1, pp. 39-48, 2022.
- [9] R. Akbar, Mahmuddin, and M. S. Habiba, "Optimasi Pembebanan Independet Power Plant Pembangkit Listrik Tenaga Uap Kendari-3 dengan Metode Economic Dispatch," *Journal of Technology Process*, vol. 2, no. 2, pp. 74-81, 2022.
- [10] A. Syarief, Y. B. Setiambodo, and M. N. Ramadhan, "Analisis Kebutuhan Udara Pembakaran Untuk Mengoptimalkan Proses Pembakaran Boiler Pt. Pln (Persero) Sektor Pembangkitan Asam Asam Unit 3 & Unit 4," *INFO-TEKNIK*, vol. 21, no. 1, pp. 85-102, 2020.