

## **Analisis Performance Turbine Terhadap Peningkatan Kebutuhan $O_2$ Secondary Boiler Pada Power Plan PT. Semen Tonasa Capacity Of 70 MW**

Marten Rombe<sup>1)</sup>, Muhammad Arham<sup>2)</sup>, Husni Mubarak<sup>3)</sup>, Syamsumarlin Taha<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Akademi Maritim Indonesia AIPI, Makassar

<sup>2-4)</sup> Universitas Patria Artha, Makassar

[andiarham413@gmail.com](mailto:andiarham413@gmail.com)

### **Abstrak**

Pengoperasian boiler di PLTU PT. Semen Tonasa memiliki kapasitas produksi daya listrik sebesar 70 MW terdapat rentang presentase  $O_2$  dalam gas buang boiler yang disarankan oleh manual book peralatan termal tersebut, sehingga perlu dilakukan analisa secara signifikan untuk mengoptimisasi jumlah udara secondary yang disuplai kedalam ruang bakar. Pengambilan data dilakukan melalui DCS (Data Collection System) yang telah terhubung dengan sensor dan alat ukur yang telah terpasang pada sistem boiler dan turbin saat beban unit 80% kemudian dilakukan pengaturan FDF (Forced Draft Fan) sehingga presentase  $O_2$  dalam gas buang boiler dapat bervariasi dari 3%, 4%, 5% dan 6%. Hasil Analisa menunjukkan bahwa perubahan kebutuhan udara secondary mempengaruhi kinerja efisiensi dari boiler secara masif dan hanya sedikit mempengaruhi efisiensi turbin pada PLTU. Penggunaan kebutuhan udara pada proses pembakaran dengan variasi excess  $O_2$  pada gas buang sebesar 3 %, 4%, 5% dan 6%, menghasilkan tingkat SFC sebesar 0.540 kg/kWh, 0.542 kg/kWh, 0.550 kg/kWh, dan 0.554 kg/kWh. Sehingga berdasarkan tingkat SFC terendah, dengan excess  $O_2$  sebesar 3% merupakan tingkat kebutuhan udara yang optimal dan mampu menghasilkan efisiensi boiler sebesar 84,13%, efisiensi termal 31,12% dan turbin sebesar 88,91%.

**Kata Kunci:** *excess  $O_2$ , efisiensi termal, efisiensi boiler, efisiensi turbin*

### **Abstract**

*The operation of the boiler at the PT. Semen Tonasa PLTU has a power production capacity of 70 MW. There is a range of  $O_2$  percentages in the boiler exhaust gas recommended by the thermal equipment manual book, so a significant analysis is needed to optimize the amount of secondary air supplied into the combustion chamber. Data retrieval is carried out through the DCS (Data Collection System) which has been connected to sensors and measuring instruments that have been installed on the boiler and turbine system when the unit load is 80% then the FDF (Forced Draft Fan) is adjusted so that the  $O_2$  percentage in the boiler exhaust gas can vary from 3%, 4%, 5% and 6%. The results of the analysis show that changes in secondary air requirements massively affect the efficiency performance of the boiler and only slightly affect the efficiency of the turbine at the PLTU. The use of air requirements in the combustion process with variations in excess  $O_2$  in the exhaust gas of 3%, 4%, 5% and 6%, produces SFC levels of 0.540 kg/kWh, 0.542 kg/kWh, 0.550 kg/kWh, and 0.554 kg/kWh. So based on the lowest SFC level, with excess  $O_2$  of 3% is the optimal level of air requirements and is able to produce boiler efficiency of 84.13%, thermal efficiency of 31.12% and turbine of 88.91%.*

**Keywords:** *excess  $O_2$ , thermal efficiency, boiler efficiency, turbine efficiency*

### **Pendahuluan**

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 pastinya akan terus meningkat

seiring dengan tingkat pertumbuhan masyarakat modern. 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. Dalam hal ini pemerintah sebagai lembaga tertinggi harus memiliki sikap yang tanggap terhadap kebutuhan masyarakat secara luas. Ketersediaan energi listrik Indonesia cukup memadai melihat dari data rasio elektrifikasi per tahun 2018 sebesar 98,30%. Berdasarkan data statistik ketenagalistrikan jumlah kapasitas terpasang pertahun 2018 sebesar 64.924,80 MW dimana Pembangkit Listrik Tenaga Uap atau disingkat PLTU memiliki persentase tertinggi dibandingkan pembangkit lainnya, yakni 42,34%.(Statistik, 2019). PLTU merupakan suatu pembangkit listrik dimana 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*). PLTU berbahan bakar fosil yakni batubara sangat vital penggunaannya di Indonesia maupun di dunia. PLTU berbahan bakar fosil merupakan sumber utama energi di dunia dengan persentase 60% pasokan listrik dunia dan masih bergantung bahan bakar batubara.

PT. Semen Tonasa memiliki kapasitas produksi daya Listrik sebesar 70 MW merupakan suatu perusahaan yang menggunakan boiler sebagai penghasil steam yang nantinya digunakan untuk menggerakkan turbin untuk menghasilkan listrik kemudian digunakan untuk mendukung oprasional pabrik. Inisiasi PT. Semen Tonasa membangun pembangkit listrik tenaga uap karena kebutuhan energi listrik untuk pengoperasian pabrik tersebut cukup besar, dimana PT. PLN hanya sanggup memasok listrik sebesar 20 MW sedangkan energi listrik yang dibutuhkan oleh pabrik sebesar 60 MW. Kini PT. Semen Tonasa telah memiliki kapasitas daya sebesar 70 MW dan mulai beroperasi pada tahun 2014. Setelah dilakukan observasi berdasar pada data yang telah diperoleh dari PLTU PT. Semen Tonasa selama beroperasi, saat ini PLTU PT. Semen Tonasa telah terjadi penurunan daya saat komisioning hanya mampu memproduksi 32 MW dari 35 MW.

Pembahasan sebelumnya terkait hasil observasi maka didapatkan hipotesa sehingga pihak management perusahaan perlu dilakukan analisis lebih lanjut terkait kinerja boiler terutama Mengevaluasi perhitungan efesiensi energi panas dihasilkan pembakaran kerugian panas mayor maupun minor pada pembangkit listrik tenaga uap PT. Semen Tonasa, khususnya pada boiler penghasil steam.

## 1. Prinsip Pembakaran Batubara

Pada proses pembakaran diperlukan adanya bahan bakar dan oksigen yang terkandung dalam udara pembakaran. Proses pembakaran akan menciptakan panas bersamaan dengan terbentuknya hasil pembakaran. Elemen reaktan dalam proses pembakaran adalah carbon dan hydrogen. Pembakaran dapat kita sebut sempurna bila semua carbon yang terkandung dalam bahan bakar habis terbakar dan berubah menjadi karbon dioksida, dan semua hidrogen terbakar menjadi uap air.

Warnatz, (2006) mengemukakan bahwa proses pembakaran batubara terbagi menjadi 3 tahap, yaitu : pyrolisis batubara, pembakaran volatile dan pembakaran coke. Pada tahap pyrolisis, adalah tahap terpisah komposisi *volatile* dan komposisi bagian yang kaya karbon yang disebut *coke*. Tahap ini terjadi diatas temperatur 600 K. Kemudian pada tahap pembakaran *volatile*, komposisi *volatile* akan terbakar dalam bentuk fase gas. *Volatile* sendiri tersusun dari senyawa  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $HCN$  dan lain-lain

## 2. Efisiensi Boiler

Secara umum, efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara output terhadap input dalam suatu proses. Efisiensi merupakan salah satu persamaan yang penting dalam termodinamika untuk mengetahui seberapa baik konversi energi atau proses transfer energi yang terjadi.

Penelitian yang relevan dilakukan oleh Melvin E.S (2019) Penelitiannya terkait pengaruh variasi excess air terhadap kinerja PLTU kapasitas 12,5 MW yang menggunakan bahan bakar batubara kalori rendah. Menggunakan software CycleTempo versi 5.0. untuk mengetahui perubahan kondisi termodinamika yang terjadi. Variasi excess air yang digunakan adalah 0%, 1.0%, 2.0%, 3.0%, 4.0% dan 5.0% dari beban desain. Hasil simulasi menunjukkan efisiensi siklus yang paling tinggi adalah pada excess air sebesar 20%. Efisiensi tertinggi untuk beban turbin 70%, 80%, 90% dan 100% diperoleh masing masing sebesar 27,62%; 27,86%; 28,05% dan 28,2%. Konsumsi bahan bakar masing masing sebesar 1,823; 2,07; 2,32 dan 2,56 kg/s dan konsumsi bahan bakar spesifik masing masing sebesar 0,722; 0,726; 0,730 dan 0,735 kg/kWh. Setelah melewati kondisi optimum, parameter NPHR, temperatur gas buang, konsumsi bahan bakar dan konsumsi bahan bakar spesifik akan meningkat seiring peningkatan excess air, sedangkan efisiensi siklus akan menurun. Kebutuhan udara dan boiler rating akan selalu meningkat seiring peningkatan excess air. Panas yang dilepas di kondensor dan daya pompa selalu

konstan atau tidak dipengaruhi oleh excess air untuk setiap variasi beban turbin.

Christian T.K,dkk (2012) melakukan studi analisa guna mengetahui besarnya penurunan dan penyebab turunnya kinerja boiler Unit 1 PLTU PT. Semen Tonasa. Analisa perhitungan boiler dengan menggunakan metode kehilangan panas (heat loss). Data yang digunakan berupa data input dan ouput serta data spesifikasi desain peralatan boiler. Dari hasil analisa dan pembahasan diperoleh efisiensi boiler unit 1 PLTU PT. Semen Tonasa turun sebesar 6,04%, yaitu pada saat kondisi operasi tahun 1997 efisiensi boiler sebesar 91%, sedangkan pada kondisi operasi sekarang sebesar 84,96%. Faktor kehilangan panas terbesar diakibatkan oleh gas buang kering, dimana pada operasi tahun 2004 sebesar 5,59% dan pada operasi sekarang sebesar 5,79%, atau meningkat sebesar 0,20%.

Prawira, dkk (2020), *Boiler-Furnace* merupakan bagian terpenting dalam suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga generator dapat menghasilkan energi listrik. Sebagian listrik yang dihasilkan digunakan untuk menjalankan unit peralatan proses di PT. PJB UBJ O&M PLTU Paiton 9 dan sebagian lagi diinterkoneksi dengan SUTET milik PT. PLN untuk digunakan di Pulau Jawa dan Bali. Kebutuhan oksigen saat terjadinya reaksi pembakaran di furnace untuk membakar batu bara untuk memanaskan air di *boiler* sehingga menghasilkan steam yang digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga generator dapat menghasilkan energi listrik harus dihitung secara teoritis agar dapat diketahui kebutuhan oksigennya secara stoikiometri reaksinya agar reaksi yang terjadi dapat berjalan optimal dan agar diketahui berapa jumlah udara yang harus ditambahkan secara berlebih.

### Metode

Jenis penelitian yang digunakan adalah metode penelitian secara eksperimental terdapat beberapa tahapan yang gambarkan pada diagram alir penelitian, penjabaran tahapan tersebut sebagai berikut :

#### 1. Studi Kasus.

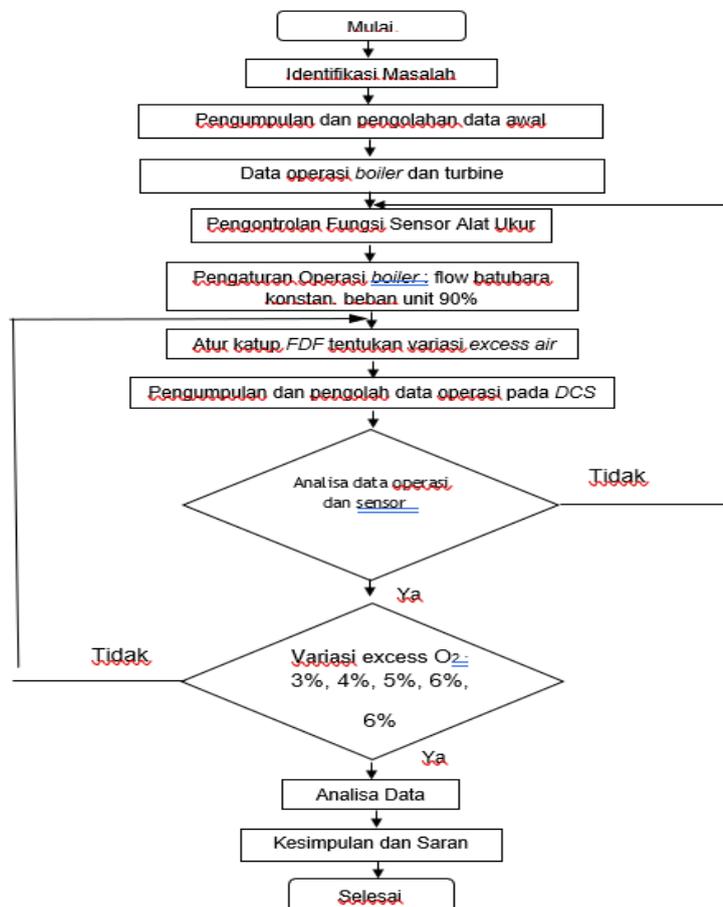
Desain *boiler* PLTU PT. Semen Tonasa berdasarkan buku panduan operasi rentang pengaturan O<sub>2</sub> pada gas buang cukup besar, yaitu 3% – 7%. Sehingga saat pembakaran batubara dalam jumlah tinggi rentang pengaturan *excess air* cukup besar yaitu dalam rentang 27-38 ton udara/jam, tentunya titik optimal dalam rentang ini perlu dikaji agar efisiensi dari PLTU PT. Semen Tonasa dapat ditingkatkan.

## 2. Studi Literatur.

Untuk memahami lebih dalam mengenai permasalahan yang akan dibahas, dilakukan studi literatur berkaitan proses pengoperasian *boiler* dan turbin maupun pembakaran dalam *boiler*. Studi literatur ini didapatkan dari *journal*, *e-book*, dan penelitian terdahulu.

## 3. Pengolahan Data Aktual.

Dalam melakukan penelitian akan dilakukan pengaturan pada sistem operasi PLTU PT. Semen Tonas sehingga memenuhi parameter yang akan diuji tingkat efisiensinya dalam berbagai variasi *excess air*.



Gambar 1. Flow chart penelitian

## 4. Persamaan pembakaran

- a. Konsep mol, setiap elemen di dunia memiliki nomor atom spesifik atau biasa disebut massa mol, dimana nilai ini berdasarkan jumlah proton dan neutron dalam suatu atom. Unsur yang umum pada batubara yaitu karbon memiliki massa mol 12 dan oksigen 16

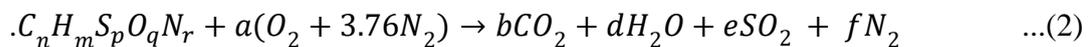
sehingga karbon dioksida memiliki massa mol 44. Massa suatu zat dalam satuan kilogram setara dengan massa mol yang disebut kilogram-mol.

- b. Komposisi udara, udara atmosphere terdiri atas 78% nitrogen, 21% oksigen dan 1% argon, karbon dioksida, uap air dan gas lainnya. Untuk perhitungan argon dan nitrogen disamakan sebagai “*nitrogen atmosphere*” menjadi 79%. Sehingga ratio nitrogen terhadap oksigen adalah 3.76 (Chaplin, 2015). Maka berat mol dari udara adalah :

$$M_{air} = \sum_{i=1}^n y_i M_i = y_{O_2} \cdot M_{O_2} + y_{N_2} \cdot M_{N_2} \text{ kJ/kg} \quad \dots(1)$$

Dengan:  $M_{air}$  = Mol udara,  $y_i$  = persentase komposisi zat,  $M_i$  = Berat mol zat

- c. Pembakaran kondisi stoikiometri, merupakan kondisi pembakaran dimana seluruh unsur dalam bahan bakar bereaksi sempurna dengan udara. Untuk reaksi sempurna bahan bakar hydrocarbon dengan udara, dapat dituliskan sebagai berikut :



Untuk menyeimbangkan reaksi maka :

$$C \text{ balance: } (C_n) = b \cdot (C_n) \rightarrow b = 1$$

$$H \text{ balance: } (H_m) = d \cdot (H_2) \rightarrow m \cdot x = 2d \rightarrow d = m/2$$

$$S \text{ balance: } (S_p) = e \cdot (S_1) \rightarrow p = e$$

$$O \text{ balance: } O_q + a \cdot O_2 = b \cdot (O_2) + d \cdot (O_1) + e \cdot (O_2)$$

$$q + 2 \cdot a = 2 \cdot 1 + m/2 \cdot 1 + p \cdot 2$$

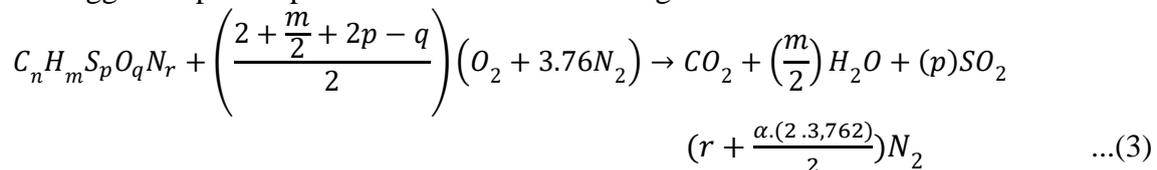
$$2 \cdot a = 2 + m/2 + 2p - q$$

$$a = (2 + m/2 + 2p - q)/2$$

$$N \text{ balance: } N_r + a \cdot (2 \cdot 3,762) = f \cdot (N_2) \rightarrow r + a \cdot (7,524) = f \cdot (2)$$

$$f = (r + a \cdot (7,524))/2$$

Sehingga didapatkan persamaan stoikiometri sebagai berikut :



Dengan :  $\alpha$  = Koefisien *excess air*

Pembakaran stoikiometri dianggap sebagai kondisi ideal dan dalam prakteknya sangat sulit terjadi, hal ini dikarenakan tingkat homogen sempurna antara udara dan bahan bakar sulit tercapai bahkan dalam kondisi turbulensi pun masih terdapat beberapa bahan bakar yang belum sempat beraksi dengan oksigen dan meninggalkan ruang bakar.

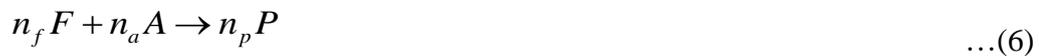
Metode yang umum digunakan dalam mengukur udara berlebih dalam pembakaran di ruang bakar *boiler* adalah mengukur kadar  $O_2$  pada gas buang hasil pembakaran. Nilai 21% berdasarkan kadar oksigen dalam udara bebas, sehingga persentase *excess air* dapat dihitung berdasarkan nilai kadar  $O_2$  yang terukur pada gas buang:

$$\%Excess\ air = (100 * 21\%)/(21\% - O_2\%) - 100\% \quad \dots(4)$$

Adapun persamaan 7 digunakan dalam menghitung *AFR* pada pembakaran stoikiometri adalah :

$$AFR_{Aktual} = \left[ \frac{\alpha (BM_{O_2} + 3,762 BM_{N_2})}{BM_C + BM_H . m + BM_S . p + BM_O . q + BM_N . r} \right] x BM_{udara} \quad \dots(5)$$

d. Entalpi pembakaran, pada kondisi konstan proses,  $n_f$  jumlah mol bahan bakar bereaksi dengan  $n_a$  jumlah mol udara akan menghasilkan  $n_p$  jumlah mol produk :



Sehingga persamaan untuk entalpi pembakaran pada sistem dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\sum_R n_i h_i = \sum_P n_i h_i + Q \quad \dots(7)$$

$$(n_{CH_{0,703}S_{0,001}} * h_{CH_{0,703}S_{0,001}}) + n_{O_2} * h_{O_2}) = (n_{CO_2} * h_{CO_2}) + (n_{H_2O} * h_{H_2O}) \\ + (n_{SO_2} * h_{SO_2}) + Q \quad \dots(8)$$

Dengan:  $n_c$  = Jumlah mol Hydrokarbon,  $h_c$  = Entalpi spesifik Hydrocarbon,  $n_{O_2}$  = Jumlah mol oksigen,  $h_{O_2}$  = Entalpi spesifik oksigen,  $n_{CO_2}$  = Jumlah mol karbon dioksida,  $h_{CO_2}$  = Entalpi spesifik karbon dioksida,  $n_{H_2}$  = Jumlah mol energy,  $h_{H_2}$  = Entalpi spesifik energy,  $n_{H_2O}$  = Jumlah mol air,  $h_{H_2O}$  = Entalpi spesifik air,  $n_s$  = Jumlah mol sulfur,  $h_s$  = Entalpi spesifik sulfur,  $n_{SO_2}$  = Jumlah mol sulfur dioksida,  $h_{SO_2}$  = Entalpi spesifik sulfur dioksida.

Adapun dalam proses menentukan nilai entalpi atau  $h$  pada tiap titik proses termodinamika tersebut digunakan air untuk berbagai fasa, yaitu : cair jenuh, uap jenuh, uap campuran dan uap panas lanjut.

##### 5. Efisiensi *Boiler*

Efisiensi merupakan salah satu persamaan yang penting dalam termodinamika untuk mengetahui seberapa baik konversi energi atau proses transfer energi yang terjadi.

Berikut merupakan skema proses kerja dari *boiler* di PLTU :

Menghitung efisiensi pada *boiler* PLTU digunakan persamaan berikut untuk :

$$\eta_b = \frac{\text{Jumlah Kalor yang diserap air}}{\text{Jumlah kalor yang dihasilkan pembakaran}} \times 100\% \quad \dots(9)$$

$$= \frac{(\dot{m}_{10} * (h_{10} - h_9) + (\dot{m}_{bd} * (h_{bd} - h_9))}{\dot{m}_f * GCV_{AR}} \times 100\% \quad \dots(10)$$

Dengan:  $\eta_b$  = Efisiensi boiler,  $\dot{M}_{10}$  = Jumlah steam yang dihasilkan perjam (kg/h),  $H_{10}$  = Entalpi uap panas lanjut (kcal/kg),  $\dot{M}_9$  = Jumlah air umpan yang dimasukkan ke boiler (kg/h),  $H_9$  = Entalpi air umpan (kcal/kg),  $\dot{m}_{bd}$  = Jumlah boiler blowdown (kg/h),  $h_{bd}$  = Entalpi boiler blowdown (kcal/kg),  $\dot{m}_f$  = Jumlah bahan bakar yang digunakan perjam (kg/h),  $GCV_{(AR)}$  = Gross Calorific Value At Receive (kcal/kg).

## 6. Efisiensi Turbin

Pada boiler PLTU digunakan persamaan 13 berikut untuk menghitung efisiensi :

$$\eta_T = \frac{\text{Output energi turbin}}{\text{Input energi turbin}} \times 100\% \quad \dots(11)$$

$$\eta_T = \frac{\left(\frac{P_{gross}}{\eta_G}\right)}{(E_{10} - (E_{11} + E_{13} + E_{15} + E_{16} + E_{18} + E_{20} + E_{22}))} \times 100\% \quad \dots(12)$$

Dengan:  $\eta_T$  = Efisiensi turbin (%),  $\eta_G$  = Efisiensi generator = 98,2% (manual book),  $P_{gross}$  = Daya yang dihasilkan generator (kcal/h),  $E_{10}$  = Energi yang masuk ke turbin (kcal/kg),  $\dot{m}_{10}$  = Laju alir uap yang masuk ke turbin (kg/h),  $h_{10}$  = Entalpi uap panas lanjut sebelum turbin (kcal/kg),  $E_{11,13,15,16,18,20}$  = Energi pada uap ekstraksi 1,2,3,4,5,6 turbin (kcal/kg),  $\dot{m}_{11,13,15,16,18,20}$  = Laju aliran uap ekstraksi 1,2,3,4,5,6 turbin (kg/h),  $h_{11,13,15,16,18,20}$  = Entalpi uap ekstraksi 1,2,3,4,5,6 turbin (kcal/kg),  $\dot{m}_{22}$  = Laju aliran uap exhaust turbin (kg/h),  $h_{22}$  = Entalpi uap exhaust turbin (kcal/kg).

Adapun menghitung jumlah debit uap tiap ekstraksi menggunakan persamaan berikut, maka laju alir uap ekstraksi 1 turbin dapat dihitung sebagai berikut :

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_8 \frac{(h_{(f)9} - h_{(f)8})}{(h_{11} - h_{(f)12})} ; \quad \dots(13)$$

Dimana:  $\dot{m}_{11}$  = Laju alir uap ekstraksi 1,  $\dot{m}_8$  = Laju alir air umpan melewati FWH1,  $h_{8,9}$  = Entalpi air umpan keluar dan masuk FWH1,  $h_{11,12}$  = Entalpi air buangan dan uap masuk FWH1

Menghitung laju alir uap ekstraksi 2 turbin digunakan persamaan berikut :

$$\dot{m}_{13} = \frac{\dot{m}_7 * (h_{(f)8} - h_{(f)7}) - \dot{m}_{11} * (h_{(f)12} - h_{(f)14})}{(h_{13} - h_{(f)14})} \quad \dots(14)$$

Dimana:  $\dot{m}_{13}$  = Laju alir uap ekstraksi 2,  $\dot{m}_7$  = Laju alir air umpan melewati FWH2,  $h_{8,7}$  = Entalpi air umpan keluar dan masuk FWH2,  $h_{13,14}$  = Entalpi uap masuk dan air buangan

FWH2.

Menghitung laju alir uap ekstraksi 3 turbin digunakan persamaan berikut :

$$\dot{m}_{15} = \frac{\dot{m}_7 * h_{(f)7} - \dot{m}_5 * h_{(f)5} - (\dot{m}_{12} + \dot{m}_{14}) * h_{(f)14}}{h_{15}} \quad \dots(15)$$

Dimana:  $\dot{m}_{15}$  = Laju alir uap ekstraksi 3,  $\dot{m}_6$  = Laju alir air umpan setelah deaerator,  $h_6$  = Entalpi air umpan setelah deaerator,  $\dot{m}_5$  = Laju alir air condensate ke deaerator,  $h_5$  = Entalpi air condensate ke deaerator,  $\dot{m}_{12, 14}$  = Laju alir air drain atau uap masuk FWH 1 & 2,  $h_{15}$  = Entalpi uap masuk ke deaerator.

Menghitung laju alir uap ekstraksi 4 turbin digunakan persamaan berikut :

$$\dot{m}_{16} = \dot{m}_4 \frac{(h_{(f)5} - h_{(f)4})}{(h_{16} - h_{(f)17})}; \quad \dots(16)$$

Dimana:  $\dot{m}_{16}$  = Laju alir uap ekstraksi 4,  $\dot{m}_4$  = Laju alir air umpan melewati FWH4,  $h_{5,4}$  = Entalpi air umpan keluar dan masuk FWH4,  $h_{17, 16}$  = Entalpi air buangan dan uap masuk FWH4

Menghitung laju alir uap ekstraksi 5 turbin digunakan persamaan berikut :

$$\dot{m}_{18} = \frac{\dot{m}_3 * (h_{(f)4} - h_{(f)3}) - \dot{m}_{16} * (h_{(f)17} - h_{(f)15})}{(h_{18} - h_{(f)19})}. \quad \dots(17)$$

Dimana:  $\dot{m}_{18}$  = Laju alir uap ekstraksi 5,  $\dot{m}_3$  = Laju alir air umpan melewati FWH5,  $h_{4,3}$  = Entalpi air umpan keluar dan masuk FWH5,  $h_{18, 19}$  = Entalpi uap masuk dan air buangan FWH5.

Menghitung laju alir uap ekstraksi 6 turbin digunakan persamaan berikut :

$$\dot{m}_{20} = \frac{\dot{m}_2 * (h_{(f)3} - h_{(f)2}) - \dot{m}_{20} * (h_{(f)19} - h_{(f)21})}{(h_{20} - h_{(f)21})} \quad \dots(18)$$

Dimana:  $\dot{m}_{20}$  = Laju alir uap ekstraksi 6,  $\dot{m}_2$  = Laju alir air umpan melewati FWH6,  $h_{3, 2}$  = Entalpi air umpan keluar dan masuk FWH6,  $h_{20, 21}$  = Entalpi uap masuk dan air buangan FWH6.

Menghitung laju alir uap ke kondensor turbin digunakan persamaan berikut :

$$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{13} - \dot{m}_{15} - \dot{m}_{16} - \dot{m}_{18} - \dot{m}_{20} \quad \dots(19)$$

Dimana:  $\dot{m}_{22}$  = Laju alir uap exhaust turbin,  $\dot{m}_{10}$  = Laju alir main steam yang masuk ke turbin,  $\dot{m}_{11,13,15,16,18,20}$  = Laju alir uap ekstraksi 1 – 6.

## 7. Perhitungan Daya Turbin Teoritis

Daya turbin yang dibangkitkan suatu PLTU dapat dihitung secara teoritis dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$P_T = (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11}) \cdot W_{T1} + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{13}) \cdot W_{T2} + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{13} - \dot{m}_{15}) \cdot W_{T3} + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{13} - \dot{m}_{15} - \dot{m}_{16}) \cdot W_{T4} + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{13} - \dot{m}_{15} - \dot{m}_{16} - \dot{m}_{18}) \cdot W_{T5} + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{13} - \dot{m}_{15} - \dot{m}_{16} - \dot{m}_{18} - \dot{m}_{20}) \cdot W_{T6} + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{13} - \dot{m}_{15} - \dot{m}_{16} - \dot{m}_{18} - \dot{m}_{20} - \dot{m}_{22}) \cdot W_{T7} \dots (20)$$

#### 8. Efisiensi Thermal siklus

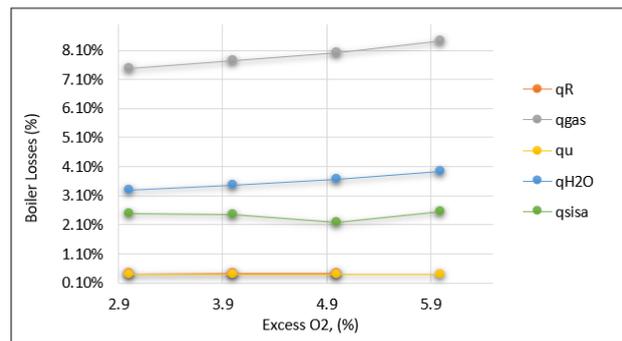
Efisiensi thermal siklus menunjukkan performa dari peralatan thermal seperti *boiler*, turbin, pompa dan kondensor. Perhitungan efisiensi termal dapat dihitung dengan berikut:

$$\eta_{th} = \frac{P_{net}}{Q_{in}} ;$$

$$\eta_{th} = \frac{P_{net} (kW)}{(m_{10} \cdot h_{10}) - (m_9 \cdot h_9)} \dots (21)$$

### Hasil dan Pembahasan

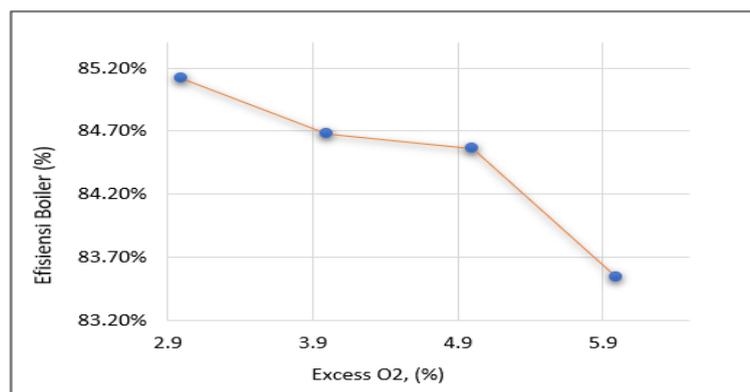
Pengaruh peningkatan udara *secondary* terhadap parameter efisiensi *boiler*, efisiensi turbin dan efisiensi termal mengalami perubahan. Pada penelitian ini proses pengujian dilakukan pada 4 tingkat *persentase excess O<sub>2</sub>* dalam gas buang yang terbaca pada alat ukur di *boiler* yaitu 3%, 4%, 5% dan 6%. Variasi *excess O<sub>2</sub>* sebesar 3% didapatkan nilai efisiensi *boiler* sebesar 84,13%, efisiensi turbin sebesar 88,91% dan efisiensi termal siklus 31,12%. Variasi *excess O<sub>2</sub>* ditambahkan menjadi 4% terjadi penurunan pada efisiensi *boiler*, turbin dan termal siklus yang terhitung sebesar 82,77%, 88,74% dan 30,65%. Variasi *excess O<sub>2</sub>* sebesar 5%, pada efisiensi *boiler* terjadi penurunan menjadi 83,46%. Namun pada efisiensi turbin dan termal siklus mengalami sedikit peningkatan yang dihitung sebesar 88,72% dan 31,20%. Pengujian variasi 6% nilai *excess O<sub>2</sub>* didapatkan nilai efisiensi *boiler*, turbin dan termal siklus mengalami penurunan pada titik terendahnya sebesar 82,34%, 88,43%, 30,18%. Kondisi paling optimal berdasarkan titik tertinggi efisiensi pada *boiler*, turbin dan termal siklus terdapat pada variasi *excess O<sub>2</sub>* sebesar 3,0 %. Sebagaimana terlihat pada Gambar 2 berikut :



Gambar 2. Pengaruh perubahan *excess O<sub>2</sub>* terhadap nilai  $\eta_{boiler}$ ,  $\eta_{turbine}$ ,  $\eta_{thermal}$

### 1) Pengaruh peningkatan *excess O<sub>2</sub>* terhadap $\eta_{boiler}$

Pada Gambar 3. Kurva hubungan antara efisiensi *boiler* dengan *excess O<sub>2</sub>* pada gas buang dimana semakin tinggi *excess O<sub>2</sub>* pada gas buang maka nilai efisiensi *boiler* semakin kecil hal ini disebabkan karena semakin banyak energi kalor yang dihasilkan pada ruang bakar ikut terbuang dan kalor yang terkandung didalam gas asap sebagai *losses* terbesar pada peralatan boiler.

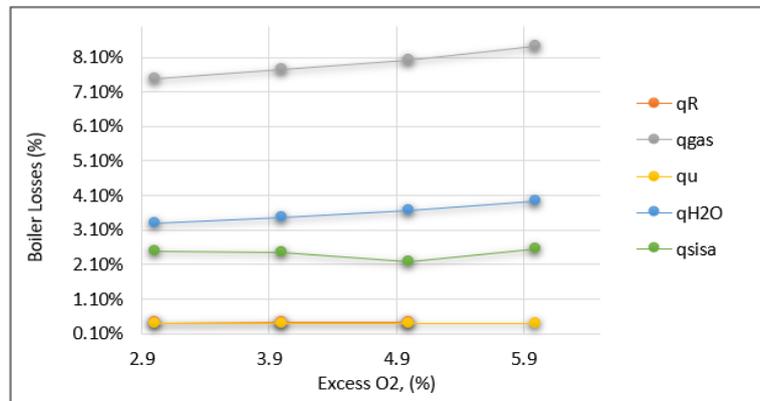


Gambar 3.  $\eta_{boiler}$  dengan *excess O<sub>2</sub>*

Penambahan *Excess O<sub>2</sub>* sebesar 4% terjadi penurunan nilai efisiensi *boiler* bila dibandingkan kondisi sebelumnya saat *excess O<sub>2</sub>* sebesar 3%. Saat *excess O<sub>2</sub>* sebesar 5% didapatkan nilai efisiensi *boiler* sebesar 83,54%, sedangkan pada saat *excess O<sub>2</sub>* 3% didapatkan efisiensi *boiler* sebesar 85,12%. Venomena tersebut disebabkan udara *secondary* yang semakin ditingkatkan menyebabkan tahanan termal konveksi pada ruang bakar dan aliran diluar pipa air pada ruang bakar semakin meningkat, sehingga dibutuhkan energi yang lebih dalam menghasilkan uap. Hal ini didasari hasil perhitungan kalor yang terkandung di dalam gas asap yang akan semakin meningkat seiring bertambahnya debit udara yang digunakan.

## 2) Pengaruh peningkatan *excess O<sub>2</sub>* terhadap *boiler losses*

Gambar 4 menggambarkan hubungan antara *boiler losses* terhadap *excess O<sub>2</sub>* pada gas buang terlihat pada kurva dimana semakin tinggi *excess O<sub>2</sub>* pada gas buang maka nilai dari *boiler losses* semakin tinggi. Hasil analisa perhitungan parameter kerugian perpindahan panas radiasi, konveksi dan radiasi ( $q_R$ ) mengalami peningkatan untuk *excess O<sub>2</sub>* sebesar 3% hingga 5% nilai  $q_R$  meningkat dari 0,332% ke 0,337% dan parameter kerugian kalor yang terkandung di dalam uap air ( $q_{H_2O}$ ) mengalami peningkatan dari 2,29% menjadi 2,93%. Selain itu kerugian kalor yang terkandung dalam gas buang ( $q_{gas}$ ) *boiler losses* terbesar terjadi peningkatan signifikan setiap peningkatan variasi *excess O<sub>2</sub>*, pada variasi 3% nilai  $q_{gas}$  sebesar 6,49% dan pada tingkat variasi terakhir 6% nilai  $q_{gas}$  sebesar 7,43%. Parameter kerugian kalor yang terkandung di dalam bahan bakar yang tidak terbakar ( $q_U$ ) terlihat stabil selama pengujian, nilai  $q_U$  sebesar 0,31%. Parameter terakhir kerugian kalor atau kalor sisa ( $q_{sisa}$ ) mengalami fluktuasi pada tiap tingkat variasi *excess O<sub>2</sub>* yang diuji, nilai  $q_{sisa}$  terendah berada pada variasi 4% dengan nilai sebesar 1,17% dan tertinggi pada variasi 6% dengan nilai sebesar 1,56%. Perbedaan kurva terlihat pada Gambar 4 berikut :

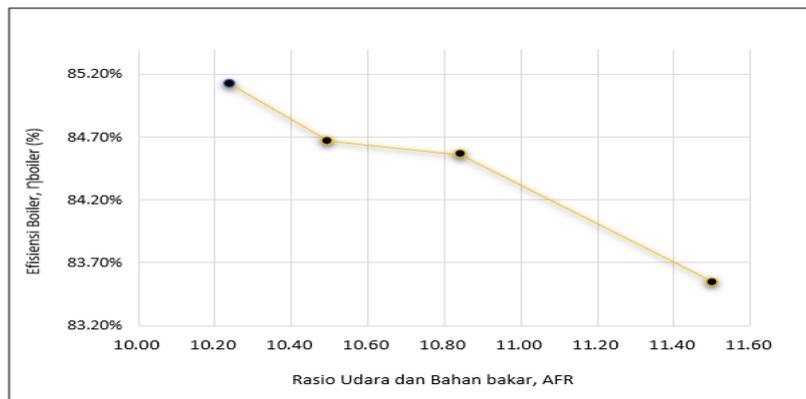


Gambar 4. Grafik antara *excess O<sub>2</sub>* dan *boiler losses*

## 3) Efisiensi *boiler* terhadap rasio udara dan bahan bakar

Efisiensi *boiler* merupakan rasio jumlah energi termal dari batubara terhadap jumlah energi termal yang dihasilkan menjadi uap panas lanjut kemudian disuplai ke turbin untuk dikonversi menjadi energi mekanik yang dikopel ke generator sehingga mampu menghasilkan energi listrik. Kurva pada gambar 5 menggambarkan bahwa efisiensi *boiler* berubah seiring dengan bertambahnya AFR (*Air Fuel Ratio*). Adapun kebutuhan udara *secondary* yang ditingkatkan menyebabkan energi panas yang dihasilkan batubara

diserap oleh udara yang tidak bereaksi saat proses pembakaran dan akan ikut terbang bersama gas buang dan menjadi *losses* terbesar *boiler*. *Excess O<sub>2</sub>* yang tinggi akan menyebabkan kerugian pada boiler karena, adanya uap air pada udara ikut menyerap energi panas yang dihasilkan dalam ruang bakar, jumlah energi yang terbang akan berbanding lurus terhadap peningkatan udara *secondary*. Aliran udara dalam jumlah besar di dalam ruang bakar akan meningkatkan nilai tahanan konveksi pada ruang bakar sehingga *losses boiler* yang dihitung akan semakin meningkat pula bersama dengan menurunnya nilai efisiensi *boiler*.

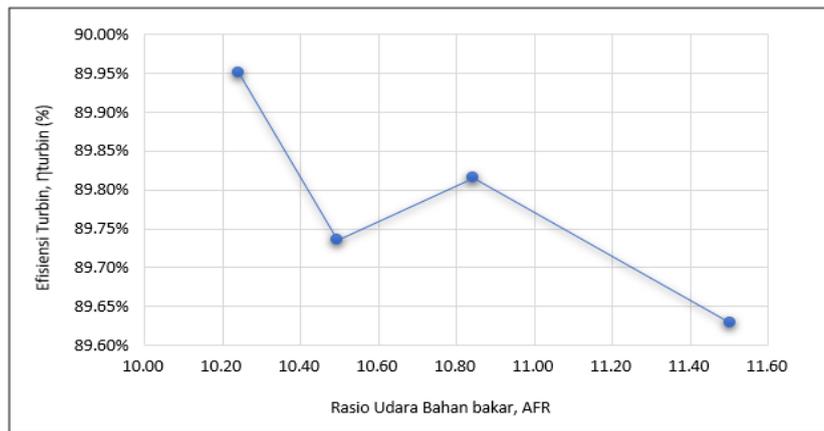


Gambar 5. Grafik efisiensi *boiler* ( $\eta_{boiler}$ ) dengan rasio udara dan bahan bakar (AFR)

Nilai efisiensi terlihat bahwa efisiensi maksimum terjadi pada saat rasio udara dan bahan bakar diangka 9,24. Pada saat pengoprasian *boiler* dikondisi rasio udara dan bahan bakar sebesar 9,24 dapat menghasilkan efisiensi maksimum sebesar 84,13% sedangkan pada pengoprasian *boiler* dikondisi rasio udara dan bahan bakar sebesar 10,50 hanya menghasilkan efisiensi sebesar 82,34%. Penurunan efisiensi disebabkan suplai udara *secondary* yang berlebih dari kebutuhan pembakaran kondisi stoikiometrik telah menyerap energi yang dihasilkan pada proses pembakaran batubara dalam ruang bakar dan terbang bersama gas buang.

#### 4) Efisiensi turbin terhadap rasio udara dan bahan bakar

Efisiensi turbin merupakan rasio jumlah energi termal yang diinjeksikan ke turbin berupa steam panas lanjut terhadap output energi yang dihasilkan oleh generator. Gambar 6 memperlihatkan bahwa efisiensi turbin cenderung stabil dengan bertambahnya rasio udara dan bahan bakar (AFR) yang digunakan. Kebutuhan udara *secondary* yang ditingkatkan menyebabkan penurunan laju alir uap namun temperatur dan tekanan uap masih dalam batas standar manufaktur turbin sesuai dengan data pada manual book, sehingga efisiensi dari turbin tidak terjadi penurunan.

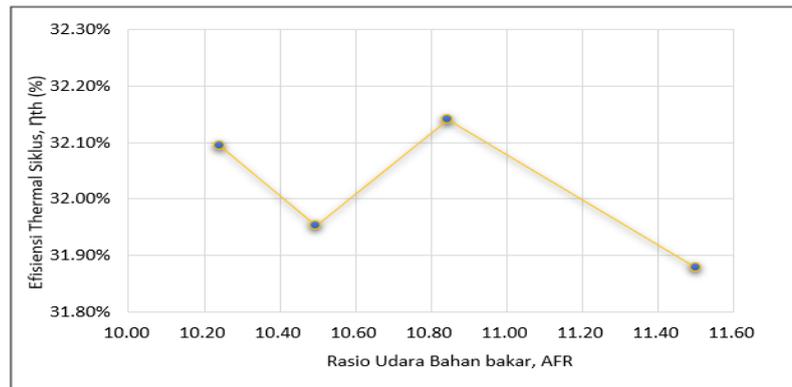


Gambar 6. Grafik efisiensi turbin ( $\eta_{\text{turbin}}$ ) dengan (AFR)

Steam output *boiler* sedikit mengalami penurunan temperatur dan tekanan dikarenakan peningkatan AFR namun suplai bahan bakar batubara tetap konstan, sehingga efisiensi turbin cenderung stabil. Efisiensi turbin yang dicapai saat AFR di meningkat akan terlihat bahwa efisiensi maksimum terjadi pada saat nilai AFR diangka 9,24. Pada kondisi AFR sebesar 9,24 pengoperasian turbin dapat menghasilkan efisiensi maksimum sebesar 88,91% sedangkan pada kondisi AFR sebesar 10,50 menghasilkan efisiensi turbin sebesar 88,43%. Hal ini disebabkan peningkatan AFR memerlukan peningkatan penggunaan energi termal untuk tetap menghasilkan uap dengan kualitas yang sama, sehingga temperatur dan tekanan steam yang dimanfaatkan turbin tidak mengalami penurunan.

##### 5) Efisiensi thermal siklus terhadap rasio udara dan bahan bakar

Efisiensi termal siklus merupakan rasio jumlah energi panas yang didapatkan dari batubara terhadap jumlah energi termal yang dihasilkan oleh berbagai peralatan dalam siklus termal PLTU PT.Semen Tonasa untuk menghasilkan daya listrik. Gambar 7. Kurva gravik menggambarkan efisiensi termal siklus berubah seiring dengan meningkatnya AFR. Kebutuhan udara pembakaran yang ditingkatkan mempengaruhi kinerja *boiler*. Pada *boiler* 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 udara penurunan efisiensi *boiler* akan semakin besar.



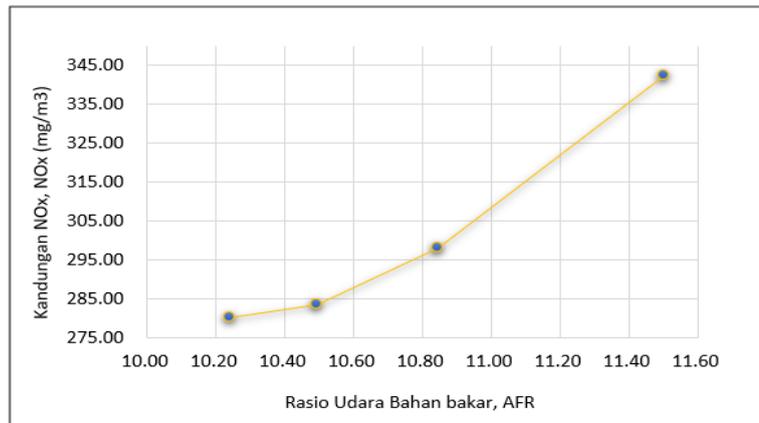
Gambar 7. Grafik efisiensi termal siklus ( $\eta_{\text{termal siklus}}$ ) dengan (AFR)

Efisiensi termal siklus tertinggi saat AFR di angka terendah, kemudian akan turun seiring dengan bertambahnya nilai AFR. Efisiensi termal maksimum pada AFR diangka 9,84. Pada saat rasio udara dan bahan bakar sebesar 9,84 dapat menghasilkan efisiensi termal siklus maksimum sebesar 31,20% sedangkan pada AFR sebesar 10,50 hanya menghasilkan efisiensi termal sebesar 30,69%. Penurunan efisiensi termal pada titik pengujian AFR sebesar 9,50, hal ini disebabkan lajur alir air *blowdown* rata - rata pada variasi AFR 9,50 sebesar 2,23 kg/detik dan bila dibandingkan pada variasi AFR 9,24 sebesar 2,19 kg/detik. Penurunan efisiensi termal ini disebabkan suplai udara pembakaran yang berlebih dari kebutuhan pembakaran, kondisi stikiometrik telah menyerap energi yang dihasilkan pada proses pembakaran batubara dalam ruang bakar dan terbuang bersama gas buang, sehingga seiring bertambahnya AFR pada ruang bakar akan menyebabkan efisiensi *boiler* semakin menurun.

#### 6) Kandungan $\text{NO}_x$ pada gas buang

Kandungan  $\text{NO}_x$  merupakan nilai yang menunjukkan besarnya gas  $\text{NO}_x$  yang terbentuk pada proses pembakaran di dalam ruang bakar yang diukur secara kontinyu. Kadar  $\text{NO}_x$  untuk pembangkit listrik termal telah diberikan ambang batas maksimal 550  $\text{mg}/\text{m}^3$ , sehingga kadar  $\text{NO}_x$  yang semakin rendah sangat diharapkan dalam pengoperasian PLTU. (Permen, 2019). Gambar 8. Grafik perbandingan antara jumlah kadar  $\text{NO}_x$  dalam gas buang yang semakin tinggi seiringan dengan meningkatnya AFR, hal ini disebabkan meningkatnya suplai udara yang memiliki kadar nitrogen tinggi yakni sebesar 79% sehingga potensi  $\text{NO}_x$  terbentuk selama pembakaran semakin tinggi. Peningkatan suplai udara *secondary* pada ruang bakar seiringan dengan peningkatan suplai gas nitrogen ke dalam ruang bakar, sehingga gas buang yang mengandung  $\text{NO}_x$

akan semakin meningkat.



Gambar 8. Kadar NOx dengan AFR

Kadar NOx terendah dicapai saat AFR diangka terendahnya, kemudian akan naik berbanding lurus terhadap peningkatan nilai AFR. Udara dalam jumlah besar dan disuplai ke dalam ruang bakar yang memiliki temperatur tinggi menjadi faktor potensi terbentuknya NOx pada gas buang semakin tinggi. Dari kadar NOx pada gas buang terlihat bahwa nilai terendah terjadi pada saat AFR diangka 9,24 kadar NOx yang terukur pada gas buang diangka minimum sebesar 258,86 mg/m<sup>3</sup> sedangkan pada kondisi AFR sebesar 9,50 menghasilkan kadar NOx sebesar 320,31 mg/m<sup>3</sup>. Hal tersebut disebabkan meningkatnya AFR yang berbanding lurus dengan peningkatan suplai gas nitrogen yang terkandung dalam udara, sehingga pada ruang pembakaran gas nitrogen meningkat secara signifikan dan membentuk gas NOx yang terbuang melalui exhaust boiler.

### Simpulan dan Saran

Berdasarkan hasil analisa data yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Variasi *excess O<sub>2</sub>* pada gas buang sebesar 3%, 4%, 5%, dan 6% atau setara dengan AFR 9.24, 9.50, 9.84, dan 10.50 menghasilkan tingkat efisiensi boiler sebesar 84,13%, 82,77%, 83,46%, dan 82,34% dan efisiensi turbin 88,91%, 88,74%, 88,72%, dan 88,43%. Kebutuhan udara optimal pada proses pembakaran terhadap kinerja *boiler* dan turbine terukur dengan peningkatan efisiensi yang dihasilkan. Variasi *excess O<sub>2</sub>* sebesar 3,0% sama dengan AFR sebesar 9,24 menghasilkan efisiensi termal boiler dan turbin tertinggi yakni 85,12% dan 89,95%.

2. Excess  $O_2$  optimal dengan AFR sebesar 9,24 menghasilkan efisiensi maksimum energi termal pada boiler sebesar 84,13% dan efisiensi maksimum pada turbin sebesar 88,91% serta efisiensi termal siklus sebesar 31,12%.

Saran yang dapat diberikan meliputi:

1. Aplikasi operator boiler di PLTU PT.Semen Tonasa disarankan menggunakan pengaturan excess  $O_2$  sebesar 3.0% karena dapat mengoptimisasi kinerja boiler dan turbin
2. Untuk pengukuran efisiensi turbin dan boiler kedepannya dapat menggunakan teknik pengukuran yang sama dan formula yang telah tersedia
3. Untuk bahan pengembangan penelitian berikutnya disarankan melakukan eksperimen nilai excess  $O_2$  sebesar 2.5, 3.5, 4.5, dan 5.5 % agar mendapatkan titik pengaturan excess  $O_2$  yang ideal.

#### Daftar Pustaka

- Abidin, Mahmuddin, Sungkono. 2022. Analisis Peningkatan Kebutuhan Udara Secondary Terhadap Kinerja Boiler Dan Turbin Pada PLTU Moramo. *Universitas Muslim Indonesia*.
- Aris, & Romy. 2019. Analisis Energi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Dual Fuel Line 3 PT. Riau Andalan PULP and Paper Pangkalan Kerinci. *Universitas Riau*.
- Christian Tallu Karaeng, Iswandi. 2012. Analisis Kinerja Boiler Pada PLTU Unit 1 PT. Semen Tonasa. Jurusan Teknik Mesin. Politeknik Negeri Ujung Pandang. Makassar.
- Donald R. Pitts, Ph.D., Leighton E. Sissom, Ph.D., P.E. 1998. Theory and Problem Of Heat Transfer, Second Edition. The University of Tennessee. New York.
- Ferianto, Belyamin, Paulus. (2019) Analisis Eksergi Pada Boiler & Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Uap Subcritical 315 MW. ISSN 2085-2762. *Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta*.
- Freddy, Aris, & Romy. 2019. Analisis Energi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Dual Fuel Line 3 PT. Riau Andalan Pulp and Paper Pangkalan Kerinci. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Riau.
- Hammada A, Jamaluddin, M. Arif, & Amiruddin. Analisa Pembangkit Tenaga Listrik dengan Tenaga Uap di PLTU. ILTEK : Jurnal Teknologi. *Universitas Islam Makassar*. Volume 15, Nomor 02 (2020)
- Holman, J. P. (1993). *Perpindahan Kalor Edisi VI Cetakan III*. Erlangga: Jakarta.
- J.P. Holman, 1986. Heat Transfer. Mc Graw Hill Book Co. Singapore.
- Mandila Pallea, Feriyanto, Belyamin, & Paulus Sucusno. 2019. Analisis Eksergi Pada Boiler & Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Uap Subcritical 315 MW. Program Studi Pembangkit Tenaga Listrik. Jurusan Teknik Mesin

- Melvin E. S.(2019). Pengaruh Excess Air Terhadap Kinerja Pltu Berkapasitas 12,5 Mw Dengan Beban Bervariasi: Sebuah Simulasi Termodinamika Menggunakan Software Cycletempo Versi 5.0. Jurnal Rekayasa Mesin.Vol.10.No.3. eISSN 2477-6041.
- Prawira, Safitri, dkk (2020), Perhitungan Teoritis Kebutuhan Oksigen, Udara Berlebih Pada Reaksi Pembakaran Batu Bara Dan Neraca Massa Total Pada Furnace Di Pt Pjb Ubj O&M Pltu Paiton 9. Jurnal Distilat Vol. 6, No. 2316-320 p-ISSN : 1978-8789, e-ISSN : 2714-7649
- Suroso, Rosita. 2015. Tinjauan Termodinamika untuk Optimalisasi dalam Perencanaan PLTU Batubara 50 MW. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknologi Industri. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.