

ANALISIS PENURUNAN KAPASITAS *BOILER SUSPENSION PREHEATER* PADA WASTE HEAT RECOVERY POWER GENERATION (WHRPG)

Mochammad Farid¹, Margianto², Nur Robbi³

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik.

^{2,3}Dosen Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Islam Malang.

Jl.M.T Haryono 193 Dinoyo – Lowokwaru – Malang.

21921052122@unisma.ac.id

nurrobby@unisma.ac.id

Abstrak

Boiler adalah suatu bejana tertutup yang berfungsi untuk memanaskan fluida berbentuk air sehingga menghasilkan uap atau air panas. Uap atau air panas dibawah tekanan kemudian dapat digunakan untuk mentransfer panas ke suatu proses. Salah satu *boiler* yang digunakan di pabrik semen PT. Semen Indonesia adalah boiler pipa air yang panasnya didapat dari sisa panas hasil pengolahan semen. Produksi *steam boiler suspension* pada quarter pertama menunjukkan bahwa totalizer *steam* hanya mencapai 51% dari targetnya. Tujuan perhitungan ini adalah untuk menganalisa penurunan kapasitas *boiler suspension*.

Metode perhitungan ini menggunakan metode perhitungan neraca panas pada masing masing ruang konveksi *boiler* dengan menggabungkan perhitungan yang disediakan oleh manufaktur. Permasalahan dalam analisa penurunan kapasitas *boiler suspension preheater* ini adalah tidak adanya metering gas panas yang masuk kedalam boiler dan pada perhitungan yang disediakan oleh manufaktur *boiler* adalah perhitungan gas panas yang masuk dihitung secara teoritis dan laju gas panas yang masuk adalah gas panas total yang masuk kedalam *boiler suspension preheater*.

Dari hasil perhitungan yang dilakukan, telah ditemukan bahwa Pada boiler ILC terdapat penurunan laju gas panas sebesar 72% (80.342,75 Nm³/hr) dan boiler SLC sebesar 52,3% (137.849,95 Nm³/hr) sehingga menyebabkan penurunan laju kapasitas uap (*Steam Flow*) menjadi 21.793 Kg/hr dari kapasitas design sebesar 29.800 Kg/hr.

Kata kunci: *Boiler, Suspension preheater, Neraca panas, Laju gas panas.*

PENDAHULUAN

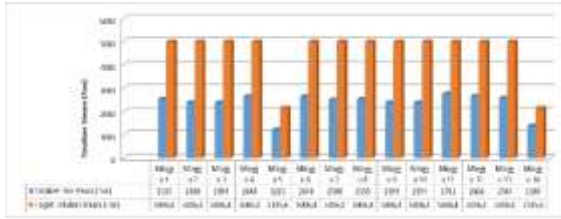
Tenaga listrik saat ini memiliki hubungan yang sangat erat di dalam perkembangan bidang industri. Listrik menjadi kebutuhan utama yang sangat penting. Listrik menjadi hal yang harus diperhatikan secara serius oleh semua pihak, hal ini dilakukan agar dalam proses produksi listrik menjadi aman dan efisien. Hal inilah yang menjadikan listrik sebagai energi vital dan strategis.

Untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan energi dibidang produksi listrik adalah memanfaatkan sisa gas buang hasil pengelolaan semen dimana *boiler* yang digunakan adalah *Waste Heat Recovery Boiler* (WHRB). *Boiler* ini memanfaatkan sisa gas buang dari hasil *Suspension PreHeater* (SP) dan *Air Quencing Cooler* (AQC) untuk memanfaatkan energi panas dari uap yang digunakan untuk memutar turbin sehingga dapat membangkitkan energi listrik melalui generator.

Keuntungan menggunakan WHRB yang paling prinsip dibandingkan *boiler* umum (*Fired Boiler* atau *boiler* yang menggunakan

pembakaran) adalah peningkatan efisiensi karena memanfaatkan gas buang dari proses semen sebagai sumber kalor sehingga tidak memerlukan bahan bakar sebagai pemanas. Berdasarkan dari metode sirkulasi *feedwater*, WHRB tipe *vertical* untuk *boiler* SP dan *horizontal* untuk *boiler* AQC. Sirkulasi ini dapat mempertahankan aliran pipa-pipa pemanas pada saat start maupun beban penuh.

Permasalahan pada salah satu kasus *boiler* di pabrik Semen Tuban milik PT. Semen Indonesia Group, Tbk. khususnya pada *boiler Suspension Preheater* (SP) pada unit Tuban 1 tidak dapat menghasilkan laju steam sesuai desainnya. Berdasarkan laporan mingguan produksi sesuai dalam gambar 1. totalizer produksi steam selama 3 bulan terakhir menunjukkan tidak bisa memenuhi target totalizer steam per bulannya. Dari data tersebut totalizer steam selama quarter 1 hanya mencapai 51% dari targetnya.



Gambar 1. Grafik Pencapaian Totalizer Steam SP1 Periode Q1 2021

(Sumber: PT. Semen Indonesia, Tbk)

Klarifikasi Boiler

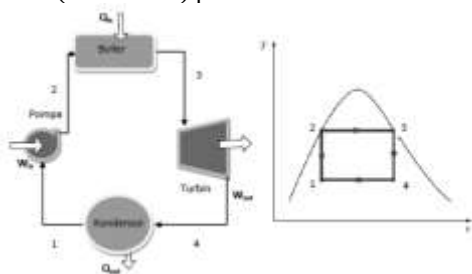
Berikut adalah beberapa macam klasifikasi Boiler:

- Ketel pipa api (*fire tube boiler*)
Ketel pipa digunakan untuk kapasitas steam yang cenderung kecil dengan tekanan steam yang rendah dan sedang. Disinilah gas panas akan melewati pipa-pipa dan air umpan ketel yang ada di dalam shell untuk dirubah menjadi steam.
- Ketel pipa air (*water tube boiler*)
Pada Ketel pipa ini air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakaran membentuk steam pada daerah uap dalam drum. Ketel ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan steam sangat tinggi seperti pada kasus ketel untuk pembangkit tenaga listrik.

Siklus Uap Carnot

Siklus Carnot adalah siklus yang dapat beroperasi diantara dua batas temperatur dengan efisien. Penggunaan siklus Carnot dalam hubungan diagram T -s dan sistem tenaga uap terdapat pada gambar 2. Proses dari siklus tenaga uap Carnot antara lain:

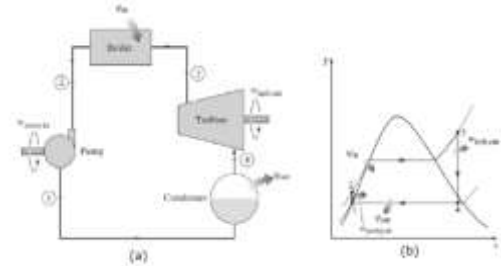
- 1-2: Kompresi secara isentropik ($s=\text{konstan}$) pada pompa
- 2-3: Pemasukan kalor secara isothermis ($T=\text{konstan}$) pada boiler.
- 3-4: Ekspansi secara isentropik ($s=\text{konstan}$) pada turbin
- 4-1: Proses pembuangan kalor secara isothermis ($T=\text{konstan}$) pada kondensor.



Gambar 2. Skema dan T-s Diagram Siklus Carnot

Siklus Rankine

Siklus Rankine merupakan siklus teoritis paling sederhana yang menggunakan uap sebagai medium kerja sebagaimana digunakan pada sebuah PLTU. Dikatakan siklus teoritis paling sederhana, karena merupakan modifikasi dari siklus Carnot, dimana proses pemanasan dan pendinginan pada siklus ini terjadi pada tekanan yang tetap. Pada siklus Rankine, komponen-komponen utama yang bekerja dapat dilihat seperti gambar 3.



Gambar 3. Skema dan T-s Diagram Siklus Rankine

Gambar 3. adalah gambar dari siklus Rankine. Dalam proses kerja siklus Rankine terdapat 4 prinsip yang mana setiap siklus mengubah keadaan fluida (tekanan dan atau wujud), yaitu:

Proses 1 - 2:

Air dipompa dari tekanan P_2 menjadi P_1 . Langkah ini merupakan langkah kompresi isentropis, dan proses ini terjadi pada pompa air pengisi.

Proses 2 - 3:

Proses selanjutnya adalah air yang telah memiliki tekanan akan dinaikkan temperaturnya sehingga mencapai titik cair jenuh yang kemudian air berubah wujud menjadi uap jenuh, setelah itu uap dipanaskan lebih lanjut hingga uap mencapai temperatur kerjanya menjadi uap panas lanjut.

Proses 3 - 4:

Uap yang bekerja akan menurunkan tekanan dan temperatur. Proses ini terjadi di dalam turbin. Langkah ini disebut sebagai ekspansi isentropis

Proses 4 - 1:

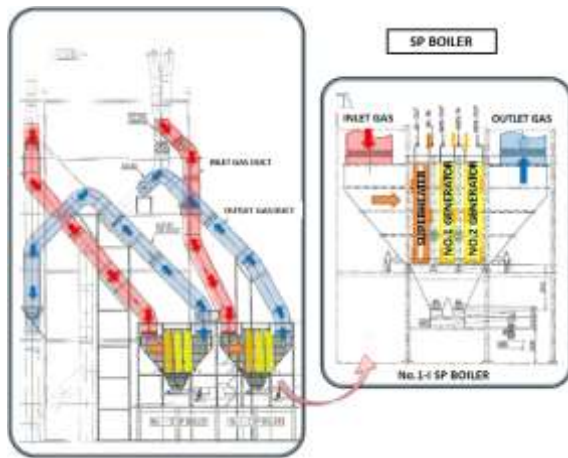
Proses pembuangan panas laten uap yang berubah menjadi air kondensat disebut sebagai langkah isobar isothermis. Yang mana proses ini terjadi di dalam kondensor.

Ketika mencapai titik cair jenuh air akan berubah wujud menjadi uap jenuh, yang kemudian uap akan dipanaskan lebih lanjut dan mencapai temperatur kerja serta menjadi uap panas lanjut.

Boiler WHRPG

Boiler Waste Heat Recovery Power Generator merupakan komponen utama dalam siklus Rankine dan memanfaatkan panas dari gas buang suspension preheater dari proses pembakaran tungku putar kiln pada proses manufacturing klinker semen. Secara umum, *Boiler WHRPG* memiliki komponen utama yaitu generator, dan superheater.

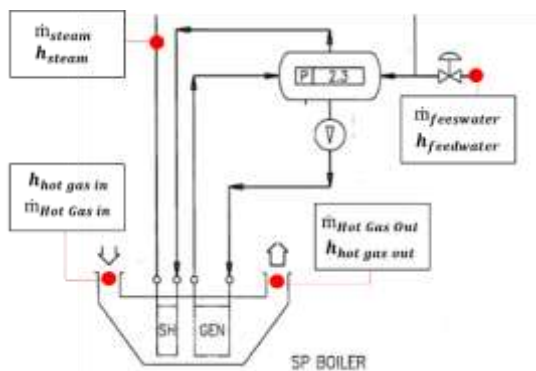
Sedangkan economizer berada pada AQC *boiler* dimana air yang sudah melewati pompa yang memiliki tekanan tinggi akan melewati preheating di economizer terlebih dahulu saat memasuki sistem WHRPG.



Gambar 4. Flow Gas SP Boiler
(Sumber: JFE Engineering, 2014)

Heat Mass Balance

Pada proses di *boiler* di pabrik Semen Tuban, PT. Semen Indonesia, neraca keseimbangan massa sebagai berikut:



Gambar 5. Kestimbangan panas boiler SP
(Sumber: JFE Engineering, 2014)

$$\begin{aligned} m_{\text{steam}} \cdot (h_{\text{steam}} - h_{\text{feedwater}}) = \\ m_{\text{Hot Gas}} \cdot (h_{\text{hot gas in}} - h_{\text{hot gas out}}) \end{aligned}$$

Dimana :

$\dot{m}_{\text{steam}}$	: Laju aliran steam	(kg/h)
$\dot{m}_{\text{hot gas}}$	: Laju aliran gas panas	(Nm ³ /h)
h_{steam}	: Enthalpy steam	(kJ/kg)
$h_{\text{feedwater}}$	: Enthalpy feedwater	(kJ/kg)
$h_{\text{gas in}}$	: Enthalpy gas masuk boiler	(kJ/Nm ³)
$h_{\text{gas out}}$	: Enthalpy gas keluar boiler	(kJ/Nm ³)

Persamaan Gas Ideal

Persamaan gas ideal dicetuskan oleh Emile Clapeyron (1834) yang menjelaskan persamaan gas ideal merupakan persamaan keadaan suatu gas ideal. Persamaan ini merupakan perpaduan antara hukum Boyle dan Hukum Charles. Persamaan ini umumnya ditulis sebagai berikut,
 $PV = nRT$

dimana P adalah tekanan gas, V adalah Volume, n adalah jumlah partikel gas, T adalah temperatur dalam satuan kelvin dan R adalah konstanta gas ideal (0,08205 L atm/mol K).

Sedangkan pada hukum Boyle-Gay Lussac adalah “hasil kali antara tekanan dan volume dibagi suhu pada sejumlah partikel mol gas adalah tetap”. Secara matematis, dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Perhitungan Heat Release

Perhitungan *heat release* pada boiler menggunakan formulasi perhitungan yang disediakan manufacturing dengan rumus sebagai berikut:

$$Q_r = A \cdot q$$

$$Q_r = \text{Heat release} \quad (\text{kJ/h})$$

$$q = \alpha \cdot (t_s - t_a) \quad (\text{kJ/m}^2\text{h})$$

$$A = \text{Surface area} \quad (\text{m}^2)$$

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_c \quad (\text{kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C})$$

$$t_s = \text{Surface temperature} \quad (^\circ\text{C})$$

$$t_a = \text{Ambient temperature} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\alpha_r = 2.48 \left[\frac{(t_s + 273)}{100} \right]^4 - \left[\frac{(t_a + 273)}{100} \right]^4 / (t_s - t_a)$$

* 2.48 is the surface coefficient.

$$\alpha_c = a + b \cdot W^n$$

$$= 5.32 + 3.51 \cdot W \quad (W < 5 \text{ m/s})$$

$$= 6.52 + W^{0.78} \quad (5 \leq W < 30 \text{ m/s})$$

$$W = \text{Wind velocity} \quad (\text{m/s})$$

Formula Perhitungan Gas Flow dari Manufaktur Boiler

Pada prosedur manufaktur boiler, untuk mencari total volume gas panas yang masuk kedalam boiler sebagai berikut:

$$Vg = \frac{Gs.(hss-hfs)+Gbs.(hds-hfs)+Qrs}{Jg1-Jg2}$$

$$Gs = Gfs - Gbs$$

Dimana:

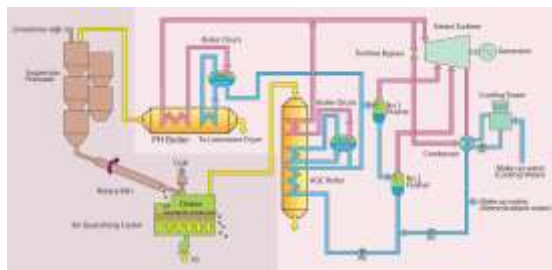
Vg : Total flow gas masuk boiler (Nm³/h)
 Gs : Rata – rata evaporasi SP Boiler (kg/h)
 hss : Enthalpy steam keluar (kJ/kg)
 hfs : Enthalphy air masuk boiler (kJ/kg)
 Gbs : Flow continuous blowdown (kg/h)
 Jg1 : Enthalpy gas masuk boiler (kJ/ Nm³)
 Jg2 : Enthalpy gas keluar boiler (kJ/ Nm³)
 Gfs : Flow air masuk boiler (kg/h)
 Qrs : Heat release permukaan casing boiler (kJ/h)

METODOLOGI

Model Pembangkit yang digunakan adalah pembangkit listrik tenaga uap di pabrik semen Tuban PT. Semen Indonesia, Tbk dengan gross output 30 MW.

Model pembangkit ini menggunakan 8 boiler, 1 turbine di-couple dengan generator, air cooled condenser dan terdapat 2 flasher tank. Boiler yang digunakan adalah waste heat recovery boiler dimana panas yang digunakan untuk menghasilkan uap berasal dari gas buang suspension preheater dan clinker cooler pada masing-masing cement plant.

Di pabrik semen Tuban mempunyai 4 cement plant yaitu Tuban 1 sampai dengan Tuban 4 dan proses alirnya seperti pada gambar 3.1 dibawah.



Gambar 6. Proses flow waste heat recovery steam generator

Adapun pada boiler suspension preheater dan air quenching cooler mempunyai spesifikasi seperti tabel dibawah ini:

Tabel 1. Spesifikasi Boiler

(Sumber: JFE Engineering, 2014)

SP Boiler	
Type Boiler	Force circulation type water tube boiler
Steam Pressure (MPa) (at outlet of superheater)	2.25
Steam production (kg/h)	29800
Quantity (Units)	4 Sets 2 String (gas-flows)/set
Steam temperature (degC) (at outlet of superheater)	370
Feedwater temperature at drum inlet (degC)	205
Gas Flow(Nm3/h)	576000 (288000 x 2)
Boiler inlet gas temperature (degC)	400
Boiler outlet gas temperature (degC)	330

AQC Boiler	
Type Boiler	Force circulation type water tube boiler
Steam Pressure (MPa) (at outlet of superheater)	2.25
Steam production (kg/h)	10640
Quantity (Units)	4 Sets
Steam temperature (degC) (at outlet of superheater)	284
Feedwater temperature at drum inlet (degC)	208
Gas Flow(Nm3/h)	245000
Boiler inlet gas temperature (degC)	325
Boiler outlet gas temperature (degC)	130

HASIL

Langkah pertama dalam menganalisa penurunan kapasitas produksi uap boiler SP1 adalah mengumpulkan data seperti heat balance dan boiler spesifikasi.

Untuk lebih detail, pada heat balance akan dibuat tabel dimana boiler SP1 beroperasi dengan kapasitas maximum pada tabel dibawah ini :

Input		
Feed Water		
Tekanan	50	Bar
Temperature feedwater	205	degC
Laju aliran feed water	30100	kg/h
Gas Inlet ILC		
Temperature gas inlet	400	degC
Laju aliran gas	288000	Nm ³ /h

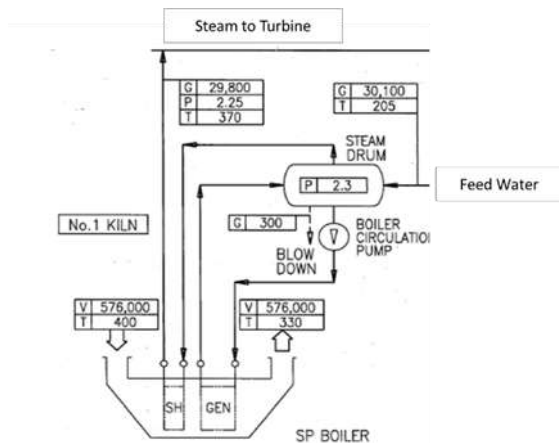
Gas Inlet SLC		
Temperature gas inlet	400	degC
Laju aliran gas	28000	Nm ³ /h

Output

Uap (Steam)		
Tekanan uap	22,5	Bar
Temperature uap superheat	370	degC
Laju aliran uap superheat	29800	Kg/h

Gas Inlet ILC		
Temperature gas inlet	330	degC
Laju aliran gas	288000	Nm ³ /h

Gas Inlet SLC		
Temperature gas inlet	330	degC
Laju aliran gas	28000	Nm ³ /h



Gambar 7. Heat balance diagram boiler SP
(Sumber: JFE Engineering, 2014)

Tabel 2. Hasil pengukuran gas Velocity boiler ILC

No.	m/s	No.	m/s	No.	m/s	No.	m/s
1	5,7	7	4	13	4,7	19	6,1
2	4,6	8	5,1	14	4,9	20	5,4
3	5,3	9	3,9	15	4	21	4,5
4	4,8	10	5,4	16	4,5	22	4,9
5	4,9	11	4,3	17	4	23	4
6	4,7	12	5,3	18	4,6	24	4,6

Rata – rata gas velocity pada boiler ILC adalah 4,7 m/s

Tabel 3. Hasil pengukuran gas Velocity boiler SLC

No.	m/s	No.	m/s	No.	m/s	No.	m/s
1	8,4	7	8,5	13	7,9	19	8,6
2	8	8	8,4	14	8,4	20	8,2
3	7,7	9	9	15	8,5	21	9,1
4	8	10	8,3	16	8,7	22	9
5	8,6	11	8,2	17	8,6	23	8,9
6	8,3	12	8,3	18	8,3	24	8,5

Rata – rata gas velocity pada boiler SLC adalah 8,5 m/s

Data CCR pada Boiler ILC dan SLC

Rata – rata yang terukur pada boiler ILC dan SLC sebagai berikut:

	ILC Boiler				SLC Boiler			
	P gas In	P gas Out	T gas In	T gas Out	P gas In	P gas Out	T gas In	T gas Out
	kPa	kPa	°C	°C	kPa	kPa	°C	°C
Avg	-6,2	-6,2	401,1	291,6	-7,0	-6,9	417,3	287,5

Mainsteam			Feedwater			Steam Drum	Blowdown
Flow	Temp	Press	Flow	Temp	Press	Press	Press
T/h	°C	MPa	T/h	°C	MPa	MPa	MPa
18,9	382,6	2,2	20	247,7	5,0	2,2	420

Perhitungan Volumetric Flow

Diketahui dari rata-rata kecepatan gas inlet pada masing-masing string sebagai berikut:

ILC : 4,7 m/s

SLC : 8,5 m/s

Diameter ducting boiler ILC dan SLC adalah 3800 mm.

Maka luas area ducting 11,34 m².

Maka laju aliran volumetric ILC adalah

$$\dot{V} = v \cdot A$$

$$\dot{V} = 4,7 \times 11,34$$

$$\dot{V} = 53,76 \text{ m}^3/\text{s} = 193.536 \text{ m}^3/\text{h}$$

Untuk laju aliran volumetric SLC adalah

$$\dot{V} = 8,4 \times 11,34$$

$$\dot{V} = 95,26 \text{ m}^3/\text{s} = 342.924,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

Laju aliran pada tekanan normal (atmosfer)

Laju aliran gas volumetric di atas di ambil pada tekanan dibawah atmosfer dan temperature melebihi temperature ruangan normal. Maka laju aliran volumetric pada boiler ILC dan SLC adalah

SLC Boiler:

$$P1 = 101,3 \text{ kPa}$$

$$P2 = -7,0 \text{ kPa}_{(g)}$$

$$= -7,0 \text{ kPa}_{(g)} + 101,3 \text{ kPa}_{(atm)}$$

$$= 94,3 \text{ kPa}_{(abs)}$$

$$V2 = 342924,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T1 = 25 \text{ °C} + 273,15$$

$$= 298,15 \text{ °K}$$

$$T2 = 417,3 \text{ °C} + 273,15$$

$$= 690,45 \text{ °K}$$

$$\frac{P1 \cdot V1}{T1} = \frac{P2 \cdot V2}{T2}$$

$$\frac{101,3 \cdot V1}{298,15} = \frac{94,3 \cdot 342924,6}{690,45}$$

$$\frac{101,3 \cdot V1}{298,15} = \frac{32234912,4}{690,45}$$

$$V1 = 137849,95$$

$$V_{SLC} = 137849,95 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

ILC Boiler:

$$P1 = 101,3 \text{ kPa}$$

$$P2 = -6,2 \text{ kPa}_{(g)}$$

$$= -6,2 \text{ kPa}_{(g)} + 101,3 \text{ kPa}_{(atm)}$$

$$= 95,1 \text{ kPa}_{(abs)}$$

$$V2 = 193.536 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T1 = 25 \text{ }^\circ\text{C} + 273,15$$

$$= 298,15 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T2 = 401,1 \text{ }^\circ\text{C} + 273,15$$

$$= 674,25 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$\frac{P1 \cdot V1}{T1} = \frac{P2 \cdot V2}{T2}$$

$$\frac{101,3 \cdot V1}{298,15} = \frac{95,1 \cdot 193536}{674,25}$$

$$\frac{101,3 \cdot V1}{298,15} = \frac{18211737,6}{674,25}$$

$$V1 = 80342,75$$

$$V_{ILC} = 80342,75 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Enthalpy Gas Panas

Tabel properties enthalpy gas panasterhadap nilai temperatur telah disediakan oleh desain *manufacture*, melalui cara interpolasi pada table maka enthalpy gas panas pada temperature 401,1 °C dapat kita peroleh. Untuk mempermudah perhitungan interpolasi nilai temperature gas panas yang diambil adalah nilai yang tepat berpotongan.



Gambar 8. Ploting untuk interpolasi gas enthalpy

Temp.	Enthalpy
°C	kJ/Nm ³
385	630
401,1	Gas Enthalpy Inlet ILC
405	665

$$\frac{401 - 385}{405 - 385} = \frac{h_{gas \text{ in}} - 630}{665 - 630}$$

$$\frac{16,1}{20} = \frac{h_{gas \text{ in}} - 630}{35}$$

$$563,5 = 20 \cdot h_{gas \text{ in}} - 12600$$

$$13163,5 = 20 \cdot h_{gas \text{ in}}$$

$$658,175 = h_{gas \text{ in}}$$

Maka, enthalpy gas pada inlet dan outlet pada masing masing sisi boiler adalah sebagai berikut

ILC			SLC		
T gas in	401,1	C	T gas in	417,3	C
h gas in	658,18	Kj/Nm3	h gas in	687,12	Kj/Nm3
T gas out	291,6	C	T gas out	287,5	C
h gas out	466,55	Kj/Nm3	h gas out	459,38	Kj/Nm3

Enthalpy Feedwater, Continuos Blowdown dan Superheat Steam

Langkah selanjutnya adalah mencari enthalpy dari feedwater, continuous blowdown dan superheat steam. Dari sini dibutuhkan *steam table* untuk mencari enthalpy dari feedwater, continuous blowdown dan superheat steam.

a. Enthalpy feedwater

Diketahui untuk Pressure dan temperature *feedwater* adalah sebagai berikut:

$$P_{fs} = 5 \text{ MPa}$$

$$T_{fs} = 247,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Dari data diatas, maka fluida pada *feedwater* masih berupa air (*subcooled*) maka enthalpy air sesuai table properties *h_{fs}* adalah 1071,78 kJ/kg

b. Enthalpy Continous Blowdown

Pressure pada steam drum adalah 2,2 MPa. Enthalpy dari continuous blowdown (*h_{bd}*) adalah 930,87 kJ/kg

c. Enthalpy Superheat Steam

Pada fase ini enthalpy yang digunakan adalah dari fase uap kering (*superheat*), diketahui

$$P_{ss} = 2,2 \text{ Mpa}$$

$$T_{ss} = 382,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Maka enthalpy Superheat Steam sesuai table properties *h_{ss}* adalah 3206,4 kJ/kg

Heat Release

Perhitungan *heat release* pada *boiler* setelah dilakukan pengambilan data dan perhitungan sesuai formulasi dari *desain manufacture* pada masing masing point diketahui total *heat release actual* pada *boiler* yaitu 1.105.346 kJ/h sedangkan data *heat release* pada saat *commissioning* awal sebesar 567.962 kJ/h.

Neraca Panas Boiler

Hasil perhitungan neraca panas seperti sebagai berikut:

ILC BOILER Heat Balance				
		T	Enthalphy (h)	Energy (KJ/Hr)
Hot Gas In Flow	80.342,75 Nm ³ /hr	401,1	658,2	52.879.991
Water In Flow	7.288 Kg/hr	247,7	9371,78	7.810.871
INPUT				60.690.862
Hot Gas Out Flow	80.342,75 Nm ³ /hr	291,6	470,50	37.801.264
Steam Out	7.078 Kg/hr	382,6	3206,40	22.894.115
Blowdown	210 Kg/hr	Saturated	930,87	195.483
OUTPUT				60.690.862
BALANCE				-

SLC BOILER Heat Balance				
		T	Enthalphy (h)	Energy (KJ/Hr)
Hot Gas In Flow	137.849,95 Nm ³ /hr	417,3	687,1	94.719.458
Water In Flow	14.925 Kg/hr	247,7	1071	15.985.158
INPUT				110.704.616
Hot Gas Out Flow	137.849,95 Nm ³ /hr	287,5	459,38	63.325.510
Steam Out	14.715 Kg/hr	382,6	3206,40	47.383.623
Blowdown	210 Kg/hr	Saturated	930,87	195.483
OUTPUT				110.704.616
BALANCE				-

Dari perhitungan diatas, diketahui bahwa steam yang dihasilkan pada boiler ILC adalah **7.078 kg/h** dan untuk boiler SLC adalah **14.715 kg/h** dengan total laju aliran uap yang dihasilkan boiler SP adalah **21.793 kg/h**. Dalam perhitungan neraca panas diatas diasumsikan untuk total laju aliran continuous blowdown pada masing-masing boiler adalah total continuous blowdown dibagi dua.

Desain Manufaktur

Dalam perhitungan manufaktur, semua data yang diambil hanya data dari CCR dan beberapa data dari pengukuran di local area boiler. Karena pada aktualnya, pembacaan metering flow gas tidak ada. Sehingga pada perhitungan mencari laju aliran gas masuk seperti berikut ini:

Feedwater Flow (Gfs)	20000 kg/h
CBD Flow (Gbs)	420 kg/h
Steam Flow (Gs)	19580 kg/h
Press Mainsteam (Pss)	22 Bar
Temp Mainsteam (tss)	382,6 degC
Enthalpy Mainsteam (hss)	3206,4 kJ/kg
Press Feedwater (Pfs)	50 Bar
Temp Feedwater (tfs)	247,7 degC
Enthalpy Feedwater (hfs)	1071,78 kJ/kg
Press Steam Drum (Pds)	22 Bar
t sat	217,3 degC
Enthalpy (hds)	931,225 kJ/kg

Heat Release (Qrs) 1105346 kJ/h

Temp Gas In ILC (tg1(I)) 401,1 degC
 Temp Gas In SLC (tg1(II)) 417,3 degC
 tg1 (mean) 409,2 degC
 Enthalpy Gas Inlet (Jg1) 672,56 kJ/Nm³

Temp Gas Out ILC (tg2(I)) 291,6 degC
 Temp Gas Out SLC (tg2(II)) 287,5 degC
 tg2 (mean) 289,55 degC
 Enthalpy Gas Outlet (Jg2) 462,96 kJ/Nm³

Maka flow gas panas yang masuk ke dalam boiler secara total adalah:

$$Vg = \frac{Gs. (hss - hfs) + Gbs. (hds - hfs) + Qrs}{Jg1 - Jg2}$$

$$Vg = \frac{19580 \cdot (3206,4 - 1071,78) + 420 \cdot (930,87 - 1071,78) + 1105346}{672,56 - 462,96}$$

$$Vg = \frac{41795859,6 - 59182,2 + 1105346}{209,6}$$

$$Vg = 204.398,97 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

KESIMPULAN

Berdasarkan serangkaian analisa perhitungan dan pengambilan data yang telah dilakukan, terdapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Gas panas yang masuk pada boiler ILC sebesar **80.342,75 Nm³/h** dan pada boiler SLC sebesar **137.849,95 Nm³/h**.
2. Hasil perhitungan teoritis berdasar formulasi yang telah disediakan oleh manufaktur, didapatkan total kapasitas gas panas yang masuk pada boiler SP1 sebesar **204.398,97 Nm³/h**.
3. Kapasitas pada boiler ILC terdapat penurunan laju gas panas sebesar **72%** dan boiler SLC sebesar **52,3%**.

SARAN

1. Sisa gas panas pada proses *Kiln* di PT. Semen Indonesia pabrik Tuban tidak hanya dimanfaatkan untuk boiler WHRPG saja melainkan juga digunakan untuk memanaskan material umpan *Coal Mill* dan *Raw Mill*. Maka diperlukan analisa menyeluruh mengenai neraca panas pada semua proses peralatan tersebut, sehingga dapat diketahui *heat balance* jumlah panas yang dibutuhkan pada masing-masing peralatan yang selanjutnya dapat dilakukan optimasi gas panas saat operasional.

2. Perlu dilakukan check list inspeksi dan penanganan perbaikan kebocoran ducting, juga dipastikan manhole dan checkhole tertutup sempurna serta sealant dalam kondisi baik untuk me-minimalisir udara luar masuk kedalam system (*False Air*) yang dapat menurunkan temperature gas panas.
3. Perlu dilakukan perbaikan pada isolasi boiler yang mengalami kerusakan untuk mengurangi *Heat Release* pada boiler.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbassi, A., Alem Rajabi, A. A., and Winterton, R. H. S. (1989) Effect of confined geometry on pool boiling at high temperature, *Experimental Thermal and Fluid Science*
- Nave, R. 2021. *What is volume flow rate*. URL: <https://www.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-volume-flow-rate>. Diakses pada tanggal 10 November 2021
- Smart sensor comate, *Compressed air flow rate, How to calculating and measuring compressed air flow rate*. URL: <https://comateflowmeter.com/calculating-and-measuring-compressed-air-flow-rate/>. Diakses pada tanggal 10 November 2021
- JFE, 2015. Performance Guarantee Test Procedure.
- Nag, P. K. 2002. *Power Plant Engineering*, second edition. New York: Mc Graw Hill Company.
- Incropera, Frank. P and David P. Dewit. 1981. *Fundamentals of Heat Transfer and Mass Transfer*, second edition. New York: John Wiley and sons
- Moran, Michael J. and Howard N. Shapiro. 2006. *Fundamental Of Engineering Thermodynamics*, Ed. 5. England: John Wiley & Sons Ltd