

PEMANFAATAN PANAS GAS BUANG MENJADI ENERGI LISTRIK

Iriandi Ilyas¹, Nizar Rosyidi AS²

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Sains Dan Teknologi Nasional

Jl. Moh. Kahfi II Jagakarsa – Jakarta Selatan

E-mail : iriandi@istn.ac.id, nizarrosyidias@yahoo.co.id

ABSTRAK

Penelitian ini membahas bagaimana memanfaatkan panas yang terbuang dari mesin *Suspension Preheater* dan mesin pendinginan klinker (*clinker cooler*). Mesin *Waste Heat Power Generation* (WHPG) merupakan pembangkit listrik tenaga uap yang memanfaatkan panas yang terbuang dari mesin *Suspension Preheater* dan mesin pendinginan klinker (*clinker cooler*) untuk memanaskan fluida pada tungku uap (*boiler*). Hasil uap dengan tekanan dan temperatur tertentu yang konstan digunakan untuk memutar turbin pembangkit listrik. PT.X berencana menambahkan fasilitas WHPG pada lokasi pabrik dan diharapkan akan menghasilkan energi ± 7 MW. Pembangunan fasilitas ini merupakan salah satu langkah penggunaan kembali energi yang terbuang menjadi energi terbarukan.

Kata Kunci : Pembangkit, Energi Terbarukan

ABSTRACT

This research discusses how to utilize the waste heat from the Suspension Preheater and the clinker cooler. The Waste Heat Power Generation (WHPG) is a steam power plant that utilizes heat that is wasted from the Suspension Preheater and a clinker cooler to heat the fluid in the boiler. Steam results with a certain pressure and a constant temperature used to turn a turbine generating electricity. PT X plans to add a WHPG facility at the plant site and is expected to produce ± 7 MW of energy. The construction of this facility is one step in reusing energy that is wasted into renewable energy.

Key Word : Power Plan, Renewable Energy

1. PENDAHULUAN

Mesin Kiln adalah salah satu mesin pada pabrik semen yang menghasilkan *Klinker*. *Klinker* dibuat dengan bahan baku utama batu kapur (limestone sekitar 70% - 90%), tanah liat (clay sekitar 10% - 30%), dan sisanya adalah bahan koreksi (0 - 10%). Untuk memproduksi *Klinker* semen, bahan baku (*raw meal*) harus dipanaskan didalam mesin Kiln sampai ± 1400 °C sehingga terjadi proses klinkerisasi. Gas buang dari mesin Kiln dialirkan ke mesin *Suspension Preheater* digunakan untuk mengeringkan bahan baku. Panas gas buang yang keluar dari *Suspension Preheater* juga masih cukup tinggi yaitu sekitar ± 370 °C sehingga masih dapat dimanfaatkan. Selain mesin *Suspension Preheater* mesin dengan panas gas

buang yang cukup tinggi adalah *Clinker Cooler* yang mencapai sekitar ± 340 °C.

Saat ini PT X akan melakukan perubahan dan penambahan kegiatan dengan membangun fasilitas tambahan dari rencana pembangunan sebelumnya, salah satunya yaitu pembangunan *Waste Heat Power Generation*, yang digunakan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Uap, dengan memanfaatkan panas yang terbuang dari mesin *Suspension Preheater* dan mesin pendinginan *Klinker* yaitu *Clinker Cooler*. Kegiatan ini berada di dalam lokasi pabrik dan terintegrasi dengan sistem proses produksi yang sudah direncanakan.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) adalah pembangkit listrik yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Uap merupakan sumber energi sekunder di dalam sistem PLTU, sedangkan bahan bakar yang digunakan untuk memproduksi uap merupakan sumber energi primer.

Bagian utama yang terdapat pada suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap yaitu:

- Boiler
- Turbin Uap
- Kondensor
- Pompa
- Generator

2.2. Distribusi Tenaga Listrik

Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah:

- pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan
- merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringandistribusi.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik kemudian disalurkan melalui saluran transmisi.

3. METODE PERENCANAAN WASTE HEAT POWER GENERATION

3.1. Metode Waste Heat Power Generation (WHPG)

Waste Heat Power Generation (WHPG) merupakan teknologi mesin yang menggunakan panas gas buang dari mesin yang ada pada pabrik semen menjadi energi listrik. Pemanfaatan panas buang dari sisa produksi semen dilakukan dengan menggunakan siklus Rankine.

Siklus Rankine adalah siklus termodinamika yang mengubah panas menjadi kerja. Panas disuplai secara eksternal pada aliran tertutup, yang biasanya menggunakan air sebagai fluida yang bergerak. Penggunaan jenis fluida tertentu akan mengurangi suplai panas yang dibutuhkan karena rendahnya titik didih dari kedua jenis fluida tersebut sehingga energi matahari sudah cukup untuk mengubah fase fluida tersebut.

3.2. Mesin-mesin Pada Waste Heat Power Generation

Ada enam komponen dasar pada WHPG yang akan dianalisa yakni turbin uap, Kondensor, pompa, *flasher*, boiler serta generator. Secara singkat, di dalam boiler akan terjadi proses masuknya energi panas dari luar — panas sisa mesin — ke dalam sistem (siklus air – uap – air). Sedangkan di dalam Kondensor akan terjadi proses pembuangan kalor laten dari uap air jenuh ke media pendingin. Pada turbin uap, akan terjadi konversi energi panas menjadi gerak. *Flasher* memisahkan fluida kerja antara uap dengan cair. Pompa, terjadi proses transfer energi gerak dari pompa menjadi tekanan. Generator yang disambungkan dengan turbin uap akan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.

Mesin-mesin pada WHPG adalah:

1. Turbin Uap
2. Kondensor
3. Pompa Boiler
4. *Flasher*
5. AQC Boiler & SP Bolier
6. *Steam Drum*
7. *Demineralizer*
8. *Cooling Tower*
9. *Electrostatic Precipitator*
10. Generator

3.3. Proses Pembangkit Listrik WHPG

Secara sederhana proses pembangkit listrik WHPG sebagai berikut:

1. Air yang ada di collecting tank dipompakan ke *sand filter* untuk disaring kemudian dimasukkan ke *raw water tank* (*raw water*).
2. *Raw water* diproses untuk mengurangi kandungan mineral seperti calcium, magnesium, kadar oksigen dan conductivity sehingga memenuhi standart air boiler. Proses ini dinamakan determinalisasi kemudian air tersebut disimpan ke dalam tangki demin untuk seterusnya digunakan sebagai air pengisi yang dipompakan menuju *vakum condenser*.
3. Di *vakum condenser*, air demin bercampur dengan *condensate* yang telah bersikulasi dan kemudian dipompakan oleh *condesat pump* ke *flasher*. Air dari *vakum condenser* yang bertemperatur 45^o C

bercampur dengan air dari *flasher* yang bertemperatur 125°C sehingga temperatur air akan menjadi 85°C . Air ini kemudian dipompakan lagi oleh *boiler feed pump* (BFP) menuju *economizer* untuk meningkatkan temperature dari 85°C – 195°C kemudian masuk ke *drum boiler*. Air yang ada di *steam drum* disirkulasikan dengan *boiler circulating pump* melalui generator bank yang dilewati gas panas dari *kiln*. Sehingga air tadi mengalami perubahan temperature dari 190°C hingga 300°C . Uap yang terbentuk di *steam drum* dialirkan ke *superheater* yang mengubah steam jenuh menjadi steam kering, steam kering ini lah yang digunakan untuk memutar turbin.

4. Steam masuk ke turbin melalui *nozlel* dan sudu tetap. Sudu pengarah kemudian diarahkan menuju sudu reaksi dan menghasilkan daya putar. Poros turbin terhubung dengan generator sehingga saat turbin mulai berputar, otomatis generator akan ikut berputar. Generator inilah yang menghasilkan energi listrik.
5. Steam yang digunakan untuk memutar turbin melalui beberapa *stage* sehingga mengalami penurunan tekanan dan kecepatan yang kemudian masuk ke *vakum condesator* akibat proses vacuum. Pada *vacuum condesantor* ini terjadi perubahan fluida dari fase uap menjadi *condesat* dan penurunan temperature oleh air pendingin dari *cooling tower*.
6. Air pendingin dari *cooling tower* disirkulasikan untuk pendingin *condesat* di *vacuum, oil cooler* dan *air cooler*.

Sedangkan gas buang dari boiler di isap oleh kipas pengisap agar melewati *electrostatic precipitator* untuk mengurangi polusi dan kemudian gas yang sudah disaring akan dibuang melalui cerobong.

3.4. Gardu WHPG

Gardu WHPG ini merupakan salah satu komponen dari suatu sistem distribusi pada WHPG yang berfungsi untuk menghubungkan jaringan tegangan menengah ke jaringan tegangan rendah. Konstruksi bangunan gardu ini terbuat dari beton/tembok yang memiliki tiga ruangan terpisah yang memisahkan antara panel-panel incoming tegangan menengah, transformator distribusi dan panel-panel distribusi tegangan rendah. Gardu ini

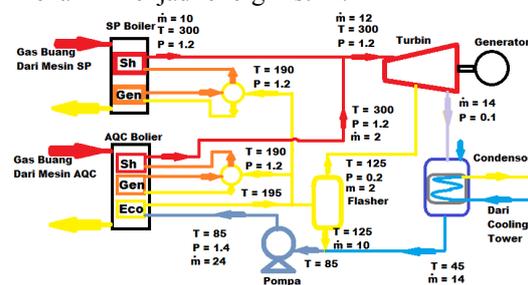
merupakan Gardu *Closed Type* (*Gardu Kubikel*). Dimana peralatan hubung untuk incoming ditempatkan dalam suatu lemari khusus yang tertutup sehingga bekerjanya pisau-pisau peralatan hubung tidak dapat dilihat yang disebut kubikel.

Pada gardu ini terdapat dua transformator untuk menurunkan tegangan dimana kedua transformator ini disambungkan secara paralel. Masing-masing transformator memiliki beban yang berbeda dimana transformator pertama juga akan melayani kebutuhan sendiri gardu.

4. ANALISA DAN PERHITUNGAN PERENCANAAN WHPG

4.1. Analisa dan Perhitungan Sistem WHPG

Ada enam komponen dasar pada WHPG yang akan dianalisa yakni turbin uap, Kondensor, pompa, *flasher*, boiler serta generator. Di dalam AQC Boiler dan SP Boiler akan terjadi proses masuknya energi panas dari luar — panas gas buang mesin — ke dalam sistem (siklus air – uap – air). Sedangkan pada Kondensor akan terjadi proses pembuangan kalor laten dari uap air jenuh ke media pendingin. Pada turbin uap, akan terjadi konversi energi panas menjadi gerak. *Flasher* memisahkan fluida kerja antara uap dengan cair, produk uap akan alirkan ke turbin uap (LT) sedangkan yang cair dialirkan ke pompa untuk dialirkan kembali ke AQC Boiler (*economizer*). Pada pompa, terjadi proses transfer energi gerak dari pompa menjadi tekanan. Generator yang disambungkan ke turbin uap akan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.



Gambar 4.1 Sistem Sederhana WHPG

4.2. Analisa Perhitungan Rencana Turbin Uap

Turbin uap yang akan digunakan dengan tipe multistage (*high pressure* dan *low pressure*) akan mengkonversi energi panas dari uap air dengan spesifikasi tekanan 1.2 MPa, temperatur 300°C untuk *high pressure* (HT) dengan laju alir massa 12 kg/s dan untuk *low pressure* (LT) dengan

tekanan 0.2 MPa, temperatur 125°C dengan debit sebesar 2 kg/s. Uap yang keluar dari turbin akan bertekanan 100 kPa dengan kualitas uap adalah 90% ($x = 0,9$). Diasumsikan selama uap air melewati sudu-sudu turbin, tidak terjadi kerugian panas yang keluar maupun masuk sistem (adiabatik), serta fluida tidak mengalami perubahan energi kinetik maupun potensial.

Tabel 4.1 Properti – Tekanan Uap Super Panas 1.2 MPa

Temp deg C	volume v(m ³ /kg)	energy u(kJ/kg)	enthalpy h(kJ/kg)	entropy s(kJ/kg.K)
Sat.(188)	0.1633	2587.8	2783.7	6.522
200	0.1693	2612.9	2816.1	6.591
250	0.1924	2704.7	2935.6	6.831
300	0.2139	2789.7	3046.3	7.034
350	0.2346	2872.7	3154.2	7.214
400	0.2548	2955.5	3261.3	7.379
450	0.2748	3038.9	3368.7	7.533
500	0.2946	3123.4	3476.9	7.678
600	0.3339	3296.3	3697.0	7.946
700	0.3730	3475.3	3922.9	8.190
800	0.4118	3661.0	4155.2	8.418
900	0.4506	3853.3	4394.0	8.630
1000	0.4893	4052.2	4639.4	8.831

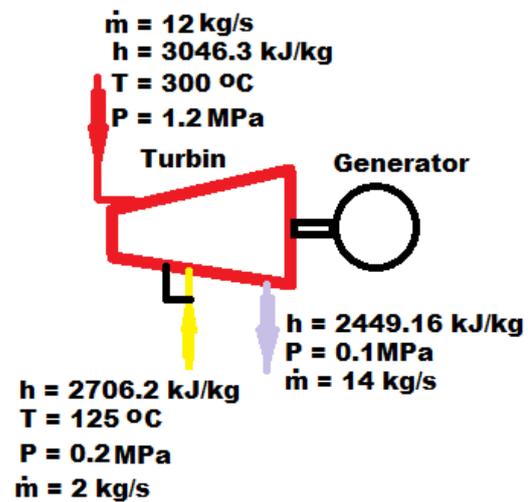
Sumber: NISC Chemistry WebBook, (January 2008)

Tabel 4.2 Properti – Tekanan Uap Super Panas 0.2 MPa

Temp deg C	volume v(m ³ /kg)	energy u(kJ/kg)	enthalpy h(kJ/kg)	entropy s(kJ/kg.K)
Sat.(120)	0.886	2529.1	2706.2	7.127
150	0.960	2577.1	2769.1	7.281
200	1.081	2654.6	2870.7	7.508
250	1.199	2731.4	2971.2	7.710
300	1.316	2808.8	3072.1	7.894
350	1.433	2887.3	3173.9	8.064
400	1.549	2967.1	3277.0	8.224
450	1.666	3048.5	3381.6	8.373
500	1.781	3131.4	3487.7	8.515
600	2.013	3302.2	3704.8	8.779
700	2.244	3479.9	3928.8	9.022
800	2.476	3664.7	4159.8	9.248
900	2.707	3856.3	4397.6	9.460
1000	2.938	4054.8	4642.3	9.660

Sumber: NISC Chemistry WebBook, (January 2008)

Dengan menggunakan tabel 4.2 diketahui berapa nilai kalor (entalpi) uap masuk (*inlet*) turbin, di kolom temperatur pada tabel dengan tekanan 1.2 MPa untuk *high pressure* (HT) dan 0.2 MPa untuk *low pressure* (LT). Maka didapatkan nilai entalpi (h_{in}) uap masuk (*inlet*) turbin sebesar 3046.3 kJ/kg untuk *high pressure* (HT) dan 2706.2 kJ/kg untuk *low pressure* (LT).



Gambar 4.2 Pencanaan Turbin Uap

- $P_{in\ HT} = 1.2\ MPa$
- $T_{in\ HT} = 300^\circ C$
- $h_{in\ HT} = 3046.3\ kJ/kg$
- $P_{in\ LT} = 0.2\ MPa$
- $T_{in\ LT} = 125^\circ C$
- $h_{in\ LT} = 2706.2\ kJ/kg$

Tabel 4.3 Properti – Tekanan Kejenuhan untuk Steam (1 kPa – 1 MPa)

Pressure MPa	Temp °C	volume (m ³ /kg)		enthalpy (kJ/kg)		
		vf	vg	hf	hfg	hg
0.001	6.97	0.001	129.18	29.3	2484.4	2513.7
0.0012	9.65	0.001	108.67	40.6	2478	2518.6
0.0014	11.97	0.001	93.9	50.3	2472.5	2522.8
0.0016	14.01	0.001	82.74	58.8	2467.7	2526.5
0.0018	15.84	0.001	74.01	66.5	2463.4	2529.9
0.002	17.5	0.001	66.99	73.4	2459.5	2532.9
0.003	24.08	0.001	45.65	101	2443.8	2544.8
0.004	28.96	0.001	34.79	121.4	2432.3	2553.7
0.006	36.16	0.00101	23.73	151.5	2415.1	2566.6
0.008	41.51	0.00101	18.1	173.8	2402.4	2576.2
0.01	45.81	0.00101	14.67	191.8	2392.1	2583.9
0.012	49.42	0.00101	12.36	206.9	2383.4	2590.3

0.014	52.55	0.00101	10.69	220	2375.8	2595.8
0.016	55.31	0.00102	9.431	231.6	2369	2600.6
0.018	57.8	0.00102	8.443	242	2363	2605
0.02	60.06	0.00102	7.648	251.4	2357.5	2608.9
0.03	69.1	0.00102	5.228	289.3	2335.2	2624.5
0.04	75.86	0.00103	3.993	317.6	2318.5	2636.1
0.06	85.93	0.00103	2.732	359.9	2293	2652.9
0.08	93.49	0.00104	2.087	391.7	2273.5	2665.2
0.1	99.61	0.00104	1.694	417.5	2257.4	2674.9
0.12	104.78	0.00105	1.428	439.4	2243.7	2683.1
0.14	109.29	0.00105	1.2366	458.4	2231.6	2690
0.16	113.3	0.00105	1.0914	475.4	2220.6	2696
0.18	116.91	0.00106	0.9775	490.7	2210.7	2701.4
0.2	120.21	0.00106	0.8857	504.7	2201.5	2706.2
0.3	133.52	0.00107	0.6058	561.4	2163.5	2724.9
0.4	143.61	0.00108	0.4624	604.7	2133.4	2738.1
0.6	158.83	0.0011	0.3156	670.4	2085.7	2756.1
0.8	170.41	0.00112	0.2403	720.9	2047.4	2768.3
1	179.88	0.00113	0.1944	762.5	2014.6	2777.1

Sumber: NISC Chemistry WebBook, (January 2008)

Dari penggunaan tabel 4.3 Properti – Tekanan Kejenuhan Untuk Steam (1 kPa – 1 MPa) dapat diketahui nilai entalpi uap keluar (*outlet*) turbin. Pada kolom tekanan 0.2 MPa (200 kPa) untuk keluaran Turbin Tekanan Tinggi (HT) dan kolom tekanan 0.1 MPa (100 kPa) untuk keluaran Turbin Tekanan Rendah (LT) dengan nilai entalpi fluida (h_f) sebesar 504.7 kJ/kg dan 417.5 kJ/kg, serta nilai entalpi campuran fluida-gas (h_{fg}) sebesar 2201.5 kJ/kg dan 2257.4 kJ/kg. Dari persamaan $h = hf + (x \cdot h_{fg})$ maka akan mendapatkan nilai entalpi uap keluar dari turbin:

$$h_{out\ HT} = 504.7 \text{ kJ/kg} + (0.9 \times 2201.5 \text{ kJ/kg})$$

$$h_{out\ HT} = 2486.05 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{out\ LT} = 417.5 \text{ kJ/kg} + (0.9 \times 2257.4 \text{ kJ/kg})$$

$$h_{out\ LT} = 2449.16 \text{ kJ/kg}$$

Dengan menggunakan persamaan

$W_{turbin} = \dot{m} (h_{inturbin} - h_{outturbin})$, maka dapat menghitung berapa besar daya spesifik yang dihasilkan oleh turbin uap yaitu sebesar:

$$w_{HT} = 3046.3 \text{ kJ/kg} - 2486.05 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{HT} = 560.25 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{LT} = 2706.2 \text{ kJ/kg} - 2449.16 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{LT} = 257.04 \text{ kJ/kg}$$

Selanjutnya menghitung daya turbin tekanan tinggi dan tekanan rendah dengan persamaan $W_{turbin} = \dot{m} \cdot w_{turbin}$, sehingga;

$$W_{HT} = 12 \text{ kg/s} \times 560.25 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{HT} = 6723 \text{ kW}$$

$$W_{LT} = 14 \text{ kg/s} \times 257.04 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{LT} = 3598.56 \text{ kW}$$

Dari persamaan $W_{TT} = W_{HT} + W_{LT}$, maka total daya turbin adalah 10321,56 kW

Dengan nilai efisiensi efektif relatif (η_{re}) turbin sebesar 0.85 maka dengan persamaan $W_{re} = \eta_{re} \cdot W_{TT}$, maka didapatkan daya relative efektif turbin:

$$W_{re} = 0.85 \times 10321,56 \text{ kW} = 8773.32 \text{ kW}$$

4.3. Analisa Perhitungan Rencana Kondensor

Tekanan uap air masuk ke Kondensor diasumsikan sama dengan air keluaran Kondensor yaitu 0.1 MPa (100 kPa). Temperatur keluaran (*outlet*) Kondensor diminta agar bisa sebesar 45°C. Untuk kebutuhan desain material Kondensor, maka nantinya diharapkan hanya ada perubahan temperatur air pendingin sebesar 10°C saja. Dengan data-data tersebut, dapat menghitung kebutuhan debit air pendingin.

Untuk menghitung kapasitas Kondensor, harus tahu nilai dari entalpi di keluaran Kondensor ($h_{out\ con}$). Karena keluaran Kondensor fluida berwujud air, maka menggunakan tabel 4.3 Properti – Temperatur Kejenuhan Air. Mencari nilai entalpi (h_f) air pada temperatur 45°C, dan didapatkan nilai $h_{out\ con}$ yakni 188.43 kJ/kg. Dengan diketahuinya nilai entalpi ini maka sudah bisa menghitung jumlah energi panas yang dibuang oleh Kondensor menggunakan persamaan $q_{Kondensor} = h_{out\ kon} - h_{in\ kon}$,

$$q_{Kondensor} = 188.43 \text{ kJ/kg} - 2449.16 \text{ kJ/kg} = -2260.73 \text{ kJ/kg}$$

Nilai negatif (-) pada hasil perhitungan di atas berarti fluida membuang panas keluar sistem. Selanjutnya dapat menghitung kinerja Kondensor menggunakan rumus yang serupa dengan $Q_{Kondensor} = \dot{m} \cdot q_{Kondensor}$, sehingga didapatkan ;

$$Q_{Kondensor} = 14 \text{ kg/s} \cdot (-2260.73 \text{ kJ/kg})$$

$$Q_{Kondensor} = -31650.22 \text{ kJ/s}$$

Jika mengabaikan semua kerugian perpindahan panas pada Kondensor maka $Q_{Kondensor} = -Q_{water} = 31650.22 \text{ kJ/s}$

Dengan C_{water} adalah kapasitas kalor spesifik air yang bernilai 4.18 kJ/kg.K. Maka laju alir massa air pendingin pada Kondensor adalah sebanyak:

$$\dot{m} = (31650.22 \text{ kJ/s}) / (4.18 \text{ kJ/kg.K} \cdot 10 \text{ K}) = 757.182 \text{ kg/s}$$

Table 4.4 Properti – Temperatur Kejenuan Air

Temp degC	volume (m ³ /kg)		enthalpy (kJ/kg)		
	vf	vg	hf	hfg	hg
0.01	0.001000	205.99	0.00	2500.9	2500.9
5	0.001000	147.01	21.02	2489.1	2510.1
10	0.001000	106.30	42.02	2477.2	2519.2
15	0.001001	77.88	62.98	2465.3	2528.3
20	0.001002	57.76	83.91	2453.5	2537.4
25	0.001003	43.34	104.83	2441.7	2546.5
30	0.001004	32.88	125.73	2429.8	2555.5
35	0.001006	25.21	146.63	2417.9	2564.5
40	0.001008	19.52	167.53	2406.0	2573.5
45	0.001010	15.25	188.43	2394.0	2582.4
50	0.001012	12.03	209.34	2382.0	2591.3
55	0.001015	9.564	230.26	2369.8	2600.1
60	0.001017	7.667	251.18	2357.6	2608.8
65	0.001020	6.194	272.12	2345.4	2617.5
70	0.001023	5.040	293.07	2333.0	2626.1
75	0.001026	4.129	314.03	2320.6	2634.6
80	0.001029	3.405	335.01	2308.0	2643.0
85	0.001032	2.826	356.01	2295.3	2651.3
90	0.001036	2.359	377.04	2282.5	2659.5
95	0.001040	1.981	398.09	2269.5	2667.6
100	0.001044	1.672	419.17	2256.4	2675.6
110	0.001052	1.209	461.42	2229.7	2691.1
120	0.001060	0.8912	503.81	2202.1	2705.9
130	0.001070	0.6680	546.38	2173.7	2720.1
140	0.001080	0.5085	589.16	2144.2	2733.4
150	0.001091	0.3925	632.18	2113.7	2745.9
160	0.001102	0.3068	675.47	2081.9	2757.4
170	0.001114	0.2426	719.08	2048.8	2767.9
180	0.001127	0.1938	763.05	2014.2	2777.2
190	0.001142	0.1564	807.43	1977.9	2785.3
200	0.001157	0.1272	852.27	1939.7	2792.0
210	0.001173	0.1043	897.63	1899.7	2797.3
220	0.001190	0.08609	943.58	1857.3	2800.9
230	0.001209	0.07150	990.19	1812.7	2802.9
240	0.001230	0.05971	1037.60	1765.4	2803.0
250	0.001252	0.05008	1085.80	1715.1	2800.9
260	0.001276	0.04217	1135.00	1661.6	2796.6
270	0.001303	0.03562	1185.30	1604.4	2789.7
280	0.001333	0.03015	1236.90	1543.0	2779.9
290	0.001366	0.02556	1290.00	1476.7	2766.7
300	0.001404	0.02166	1345.00	1404.6	2749.6
310	0.001448	0.01834	1402.20	1325.7	2727.9
320	0.001499	0.01547	1462.20	1238.4	2700.6
330	0.001561	0.01298	1525.90	1140.1	2666.0
340	0.001638	0.01078	1594.50	1027.3	2621.8
350	0.001740	0.008802	1670.90	892.7	2563.6

Sumber: NISC Chemistry WebBook, (January 2008)

4.4. Analisa Perhitungan Rencana Pompa Boiler

Laju aliran massa air dari *Flasher* sebesar 10 kg/s akan bercampur dengan air keluran kondensor sebesar 14 kg/s sehingga laju aliran massa air yang masuk ke pompa sebesar 24 kg/s dengan tekanan 100 kPa (0.1 MPa) dan temperatur 85°C. Keluar pompa, air akan bertekanan 1.4 MPa dengan temperatur konstan 85°C (adiabatik). Dengan spesifikasi tersebut, serta dengan menggunakan tabel 4.4 Properti – Temperatur Kejenuan Air, pada temperatur 85°C akan mendapatkan nilai volume spesifik air (*v*) yakni sebesar 0.001032 m³/kg. Selanjutnya karena disumsikan tidak terjadi perubahan energi kinetik dan potensial fluida pada pompa, dengan persamaan (3.17) daya spesifik pompa adalah:

$$-w_{pompa} = 0.001032 \text{ m}^3/\text{kg} \cdot (1400 - 100) \text{ kPa}$$

$$w_{pompa} = -1.3416 \text{ kJ/kg}$$

Dengan persamaan (3.18) daya pompa yang dibutuhkan adalah sebesar:

$$W_{pompa} = 24 \text{ kg/s} \cdot -1.3416 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{pompa} = -32.1984 \text{ kW}$$

4.5. Analisa Perhitungan Rencana AQC Boiler (Economizer)

Air yang masuk AQC Boiler (*economizer*) dengan tekanan 1.4 MPa bertemperature 85°C. Dengan menggunakan tabel 4.4, pada temperatur tersebut diketahui nilai entalpi air bernilai 356 kJ/kg. Uap keluaran AQC Boiler (*economizer*) padat mencapai temperatur 195°C dengan tekanan konstan. Melalui tabel 4.5 Properti – Tekanan Uap Super Panas 1.4 MPa, didapatkan nilai entalpi sebesar 2788.8 kJ/kg. Dengan menggunakan persamaan (3.19), energi panas spesifik yang dibutuhkan oleh AQC Boiler (*economizer*) adalah:

$$q_{AQC \text{ eco}} = 2788.8 \text{ kJ/kg} - 356 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{AQC \text{ eco}} = 2432.8 \text{ kJ/kg}$$

Dengan persamaan (3.20) energi kalor AQC Boiler (*economizer*) adalah:

$$Q_{AQC \text{ eco}} = 24 \text{ kg/s} \cdot 2432.8 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{AQC \text{ eco}} = 58387.2 \text{ kJ/s}$$

Tabel 4.5 Properti – Tekanan Uap Super Panas 1.4 MPa

Temp deg C	volume v(m ³ /kg)	energy u(kJ/kg)	enthalpy h(kJ/kg)	entropy s(kJ/kg.K)
Sat.(195)	0.1408	2591.8	2788.8	6.468
200	0.1430	2602.7	2803.0	6.498
250	0.1636	2698.9	2927.9	6.749
300	0.1823	2785.7	3040.9	6.955
350	0.2003	2869.7	3150.1	7.138
400	0.2178	2953.1	3258.1	7.305
450	0.2351	3037.0	3366.1	7.459
500	0.2522	3121.8	3474.8	7.605
600	0.2860	3295.1	3695.4	7.873
700	0.3195	3474.4	3921.7	8.118
800	0.3529	3660.2	4154.3	8.346
900	0.3861	3852.7	4393.3	8.559
1000	0.4193	4051.7	4638.8	8.759

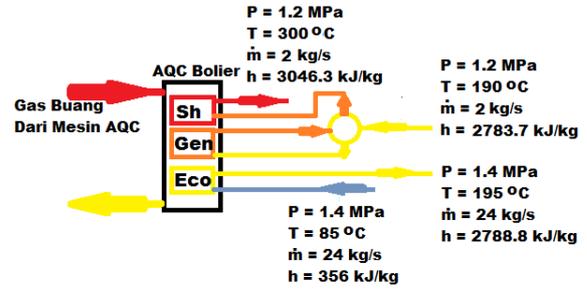
Sumber: NISC Chemistry WebBook, (January 2008)

4.6. Analisa Rencana Flasher

Fluida uap yang keluar dari Flasher, bertemperatur 125°C dengan laju alir massa 2 kg/s dialirkan ke Turbin Tekanan Rendah atau Low Pressure Turbin (LT). Sedangkan fluida cair bertemperatur 125°C dengan debit 10 kg/s akan bercampur dengan air dari kondensor dan dipompakan kembali ke AQC boiler (economizer).

4.7. Analisa Perhitungan Rencana AQC Boiler (Superheater)

AQC Boiler (superheater) akan memanaskan 2 kg/s uap sehingga uap tersebut berubah fase menjadi uap air kering (superheated). Uap masuk AQC Boiler (superheater) memiliki tekanan 1.2 MPa dengan temperature 190°C. Dengan menggunakan tabel 4.1 pada temperatur tersebut diketahui nilai entalpi uap bernilai 2783.7 kJ/kg. Uap kering keluaran AQC Boiler (superheater) diminta untuk bisa mencapai temperatur 300°C dengan tekanan konstan. Melalui tabel 4.1, didapatkan nilai entalpi sebesar 3046.3 kJ/kg.



Gambar 4.3 Spesifikasi AQC Boiler

Dengan menggunakan persamaan (3.21), energi panas spesifik yang dibutuhkan oleh AQC Boiler (superheater) adalah:

$$q_{boiler\ Sh} = 3046.3 \text{ kJ/kg} - 2783.7 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{boiler\ Sh} = 262.6 \text{ kJ/kg}$$

Dengan persamaan (3.22) energi kalor AQC Boiler (superheater) adalah:

$$Q_{AQC\ Sh} = 2 \text{ kg/s} \cdot 262.6 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{AQC\ Sh} = 525.2 \text{ kJ/s}$$

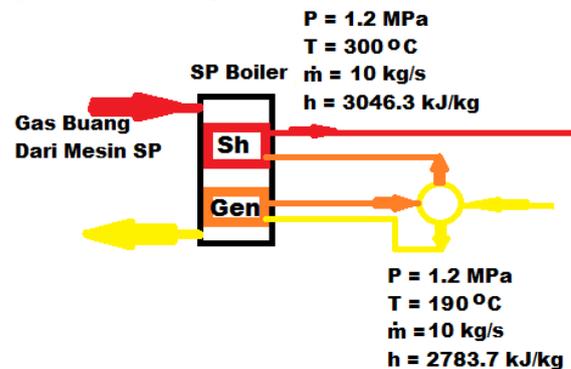
4.8. Analisa Perhitungan Rencana SP Boiler

SP Boiler akan memanaskan 10 kg/s, uap masuk SP Boiler memiliki tekanan 1.2 MPa dengan temperature 190°C. Dengan menggunakan tabel 4.1 pada temperatur tersebut diketahui nilai entalpi uap bernilai 2783.7 kJ/kg. Uap kering keluaran SP Boiler diminta untuk bisa mencapai temperatur 300°C dengan tekanan konstan. Melalui tabel 4.1, didapatkan nilai entalpi sebesar 3046.3 kJ/kg.

Dengan menggunakan persamaan $q_{SPboiler} = h_{outSP} - h_{inSP}$, maka dapat dihitung energy panas spesifik yang dibutuhkan oleh SP Boiler:

$$q_{boiler} = 3046.3 \text{ kJ/kg} - 2783.7 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{boiler} = 262.6 \text{ kJ/kg}$$



Gambar 4.4 Spesifikasi SP Boiler

Dengan menggunakan persamaan $Q_{SPboiler} = \dot{m} \cdot q_{SPboiler}$, maka energy kalao SP Boiler adalah :

$$Q_{SP\ boiler} = 10\ kg/s \cdot 262.6\ kJ/kg$$

$$Q_{SP\ boiler} = 2626\ kJ/s$$

4.9. Analisa Perencanaan Generator

Didapatkan daya relatif efektif turbin sebesar 8773.326 kW yang akan dikonversi pada sebuah generator sinkron menjadi daya keluaran generator diasumsikan nilai efisiensi generator (η_{gen}) sebesar 0.9. Dengan persamaan $P_{out} = W_{re} \times \eta_{gen}$, maka daya keluaran generator adalah:

$$P_{out} = 8773.32\ kW \times 0.9 = 7895.993\ kW$$

$$P_{out} = 7.89\ MW$$

5. KESIMPULAN

Dari hasil analisa dan perhitungan pada bab 4 maka dapat dibuat kesimpulan:

- Total daya turbin adalah 10321.56 kW. Dengan diasumsikan bahwa nilai efisiensi efektif relatif (η_{re}) turbin sebesar 0.85 maka daya efektif relatif turbin (W_{re}) adalah 8773.32 kW.
- Daya relatif efektif turbin sebesar 8773.32 kW yang akan dikonversikan dengan sebuah generator sinkron yang diasumsikan efisiensi generator (η_{gen}) sebesar 0.9. Maka daya keluaran generator adalah 7895.99 kW atau sebesar 7.89 MW

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Marsudi, Djiteng (2011). *Pembangkit Energi Listrik, Edisi Kedua*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- [2] Shlyakhin, P. (1993). *Turbin Uap Teori dan Rancangan*. Terjemahan Zulkifli Harahap, Jakarta: Penerbit Erlangga
- [3] Moran, Michael J, Shapiro, Howard N. (2004). *Termodinamika Teknik*, jilid 1 dan 2, alih bahasa Yulianto Sulistiyo M.Sc, Ph.D, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [4] Moran, Michael J, Shapiro, Howard N. (2014). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, (8th Ed) United States of America: Wiley.
- [5] DR. A. Arismunandar dan DR.S. Kuwahara. (1972). *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik*. Jakarta : PT Percetakan Penebar Swadaya
- [6] Chapman, Stephen J. 2012. *Elektrik Machinery Fundamentals. (4th Ed)* Singapore : MC,Graw Hill
- [7] Zuhul. (1995). *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- [8] Yansuri, DS. (2018). *Perencanaan Sistem Waste Heat Recovery Power Generation (WHRPG) Pabrik Semen*. *Jurnal Teknik Elektro*. 8(2)
- [9] Harahap, M Awaluddin. (2018). *“Desain Siklus Waste Heat Recovery Power Generation (WHRPG) dan Siklus Rankine Organik pada Industri Semen dengan Menggunakan Perangkat Lunak Aspen Plus V.10 dan Perhitungan LCOE (Levelized Cost of Electricity)”*. Medan (ID): Universitas Sumatera Utara.
- [10] Nurmalita. (2012). *“Analisis Efisiensi Energi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT. Energi Alamraya Semesta di Kabupaten Nagan Raya, Nanggroe Aceh Darussalam”*. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor
- [11] Gunawan, Dirham Karel. (2007). *“Turbin Curtis 2 Tingkat Kecepatan Dengan Daya 600 kW”*. Yogyakarta (ID): Universitas Sanata Dharma
- [12] Makanngiras, Ofriandi. (2016). *“Pemeliharaan Gardu Distribusi”*. Manado (ID): Politeknik Negeri Manado
- [13] OHIO University. (2008, Januari). *Thermodynamic Properties of Water (Steam Tables)*. https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property_tables/H2O/index.html
- [14] PT. Semen Lebak. (2015, Juni 5). *Adendum Amdal RKL & RPL*.
- [15] Strauss, W., 1975. *“Industrial Gas Cleaning: the principles and practice of the control of gaseous and particulate emissions”*, 2nd ed, International series in chemical engineering. Pergamon Press, Oxford.
- [15] Perkins, H.C., 1974. *“Air Pollution”*. McGraw-Hill, New York.
- [16] Mizuno,A.,2000. *“Electrostatic Precipitation”*. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 7, 615–624. doi:10.1109/94.879357
- [17] Crawford, M., 1976. *“Air Pollution Control Theory”*. McGraw-Hill, New York Düsselddorf.