

Optimasi Pemanfaatan Energi Panas Gas Buang Turbin Gas 2 X 7.500 kW pada *Tri-Generation Plant* untuk Meningkatkan Efisiensi *Thermal System*

Dorsangkap Sigiro^{1*}, Prawoto¹

¹Teknik Mesin, Universitas Pancasila, Jakarta, Indonesia

*Email Corresponding Author: sigiro.dorsangkap@yahoo.com

ABSTRAK

Dalam usaha meningkatkan kinerja dan produktivitas suatu perusahaan maka sangat diperlukan adanya perencanaan yang baik dan tepat pada sisi operational dan perawatan suatu pembangkit listrik dan sumber energi yang lainnya. Seperti diketahui bahwa sistem gas buang dengan temperatur 527 °C masih mempunyai energi *thermal* yang sangat tinggi, sehingga dapat dimanfaatkan kembali untuk meningkatkan efisiensi *thermal* nya yaitu dengan cara penggabungan siklus turbin gas pada *Tri-Generation Plant*. Dengan menggunakan data dan parameter dari pabrikan turbin gas dan *tri-generation plant* telah dilakukan simulasi dan perhitungan untuk sistem turbin gas, komponen *Tri-Generation Plant* maupun sistem gabungan secara keseluruhan. Dari hasil perhitungan di dapatkan efisiensi rata-rata untuk masing-masing turbin gas sebesar 31,4 %, TOH pada saat normal load sebesar 29,7 %, *evaporator* sebesar 24,9 %, HWE sebesar 20,4 % dan CPH sebesar 1,32 %. Dengan demikian maka untuk daya masukan bahan bakar sebesar 23.777 kW menghasilkan daya listrik sebesar 7.495 kW, daya *thermal oil heater* sebesar 6.105 kW (5,25 Gkal/jam), daya *thermal uap* sebesar 4.390 kW, daya *hot water* untuk *Chiler* sebesar 2.708 kW dan daya *condensate pre heater* sebesar 167,7 kW. Dengan memperhitungkan daya yang digunakan untuk sistem pendukung pada gas turbin dan *tri-generation plant* sebesar 1.500 kW maka total efisiensi *thermal* rata-rata sistem adalah sebesar 81,89 % pada *normal load thermal oil heater*. Tanpa memperhitungkan panas hilang ke lingkungan sekitar, efisiensi *thermal* hasil perhitungan 10,23 % lebih besar dibandingkan hasil pengujian. Dengan daya masukan bahan bakar sebesar 25.800 kW menghasilkan daya listrik sebesar 7.558 kW, daya *thermal oil heater* sebesar 5.031(5,25 Gkal/jam), daya *thermal uap* sebesar 4.549 kW, daya *hot water untuk Chiler* sebesar 2.300 kW dan daya *condensate pre heater* sebesar 167,7 kW. Dan setelah dihitung efisiensi *thermal* total sistem pada saat pengujian sebesar 71,66 % pada *normal load thermal oil heater*.

Kata kunci: *Tri-Generation Plant*, Gas Turbin, Efisiensi *Thermal*

ABSTRACT

In an effort to improve the performance and productivity of a company, it is very necessary to have good and precise planning on the operational and maintenance side of a power plant and other energy sources. As it is known that the exhaust gas system with a temperature of 527°C still has very high thermal energy, so it can be reused to increase its thermal efficiency by combining the gas turbine cycle in the Tri-Generation Plant. By using data and parameters from gas turbine manufacturers and tri-generation plants, simulations and calculations have been carried out for gas turbine systems, Tri-Generation Plant components and the combined system as a whole. From the calculation results, the average efficiency for each gas turbine is 31.4%, TOH at normal load is 29.7%, evaporator is 24.9%, HWE is 20.4% and CPH is 1.32%. Thus, for a fuel input power of 23,777 kW it produces an electric power of 7,495 kW, a thermal oil heater power of 6,105 kW (5.25 Gcal/hour), a steam thermal power of 4,390 kW, a hot water power for the Chiller of 2,708 kW and condensate pre heater power of 167.7 kW. Taking into account the power used for the supporting system in the gas turbine and tri-generation plant of 1,500 kW, the average total thermal efficiency of the system is 81.89% at normal load thermal oil heater. Without taking into account heat lost to the surrounding environment, the calculated thermal efficiency is 10.23% greater than the test results. With a fuel input power of 25,800 kW, it produces 7,558 kW of electrical power, 5,031 thermal oil heater power (5.25 Gcal/hour), 4,549 kW steam thermal power, 2,300 kW hot water power for chillers and 2,300 kW condensate pre heater power. of 167.7 kW. And after calculating during tested, the total thermal efficiency the average system is 71.66% at normal load thermal oil heater.

Keywords: *Tri-Generation Plant*, Turbine Gas, Thermal Efficiency

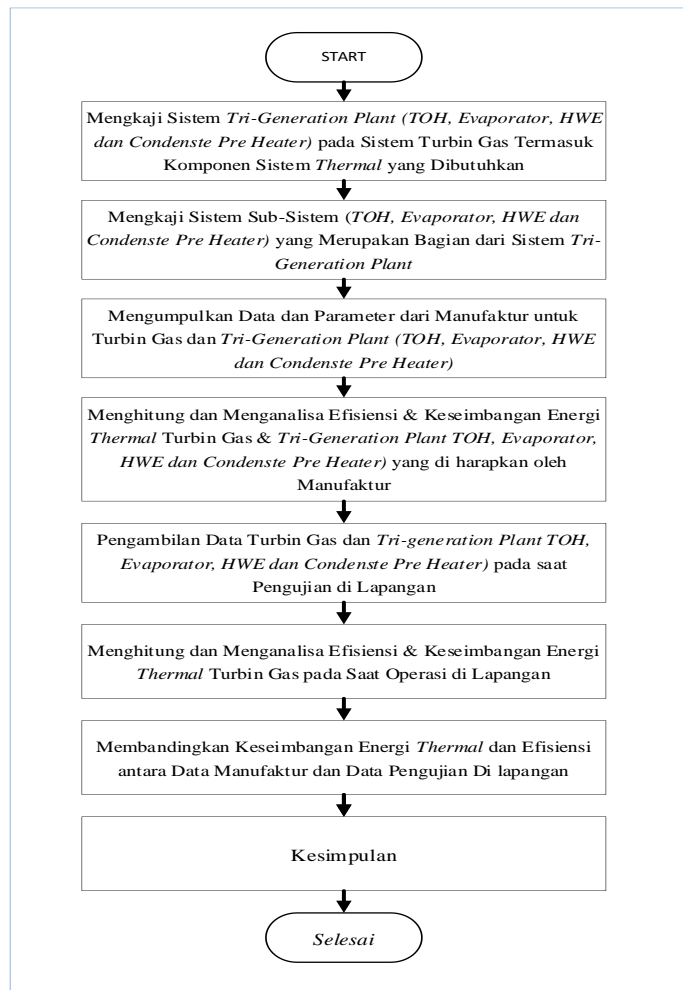
PENDAHULUAN

Salah satu perusahaan yang memproduksi bahan baku untuk pembuatan botol, lembaran, serat dan filamen, yang mana dalam proses produksi memerlukan beberapa sumber energi seperti energi listrik, energi *thermal* dan energi lainnya. Untuk keperluan tersebut dilakukan dengan mengoptimasi energi panas gas buang dari *gas engine* yang telah ada untuk di konversi menjadi energi *thermal* berupa uap panas, *thermal oil* dan *air panas* untuk memproduksi *chilled water* [1], Kapasitas energi listrik terpasang dan terinterkoneksi dengan jaringan listrik sebesar 14.444 kW [2], sedangkan daya listrik terpasang pada *gas engine* sebesar 7.354 kW [3]. Perusahaan memutuskan untuk membangun pembangkit listrik, *thermal oil heater* dan unit yang baru yang interkoneksi dengan unit yang telah ada dan diharapkan mempunyai efisiensi yang lebih tinggi sehingga konservasi energi dapat diterapkan. Pembangkit dan unit baru yang sudah dioperasikan adalah turbin gas berbahan bakar gas alam dengan kapasitas 2 x 7.550 kW.

Menurut Novi Gusnita [4] untuk optimasi energi *thermal* dari gas buang turbin gas bahwa gas buang hanya dimanfaatkan pada *Hot Recovery Steam Generator* yang mana temperatur dari gas buang tersebut masih tinggi untuk di buang ke atmosfer dan ini sebaiknya masih dapat di manfaatkan. Efisiensi *thermal* dari siklus *combine cycle* tersebut masih di sekitar 52,41 %, kemudian penelitian yang juga dilakukan oleh Tekad Sitepu dan Sahala Putra Silaban di Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap) Belawan [5] bahwa energi panas gas buang turbin gas hanya dipakai untuk memproduksi uap di *Hot recovery Steam Generation* sehingga temperatur gas buang masih terlalu tinggi dan efisiensi *thermal* sistem masih di angka 42,76 %. Menurut Joan Carles Bruno [6] melakukan penelitian mengenai optimasi energi gas buang dari *Micro Gas Turbine* di Spanyol yang mana energi gas buang tersebut dioptimasi untuk memanaskan *hot water* yang akan dipakai di *absorption chiller*. Pada penelitian A. LPolyzakis [7] bahwa optimasi energi *thermal* dapat dilakukan untuk memanaskan air di *hot recovery steam generator* untuk mensuplai uap ke turbin uap dan dapat meningkatkan efisiensi *thermal* siklus gabungan turbin gas dan turbin uap dari 50 % menjadi 66 %, begitu pula dengan Manuel Valdes [8] dengan memanfaatkan energi *thermal* turbin gas pada *combined cycle power plant* untuk menghasilkan uap dan dimanfaatkan pada turbin uap dan di hasilkan efisiensi *thermal economizer* 40,3 %, efisiensi *evaporator* 49,9 %, efisiensi *superheater* 9,8 % dan *cycle* efisiensi 49,86 %.

Dari penjelasan di atas dan beberapa referensi lain yang berkaitan dengan pemanfaatan energi *thermal* turbin gas maka belum ada penelitian yang berkaitan dengan *Tri Generation Plant* yang memanfaatkan energi *thermal* gas buang turbin gas untuk memproduksi *thermal uap*, *thermal oil* dan pemanasan air panas untuk *absorbtion chiller*[9]. Dengan penambahan *tri-generation plant* maka pada penelitian ini yang akan di teliti adalah memanfaatkan energi *thermal* gas buang untuk meningkatkan efisiensi *thermal* sistem dan mengurangi panas gas buang ke atmosfer yang bertujuan untuk mengkaji sistem *Tri-Generation Plant* pada sistem turbin gas termasuk komponen sistem *thermal* yang di butuhkan, sehingga di peroleh peningkatan efisiensi *thermal* total system, mengkaji sub sistem yang merupakan bagian dari sistem *Tri-Generation Plant*, menghitung keseimbangan energi tiap-tiap komponen untuk sistem *Tri-Generation Plant* yang optimal dan juga melakukan pengujian sistem *Tri-Generation Plant* untuk memvalidasi hasil perhitungan, sehingga bermanfaat untuk memperoleh informasi penting mengenai cara merancang *Tri-Generation Plant* pada sistem pembangkit turbin gas, memperoleh informasi cara memilih komponen atau sub sistem yang sesuai dengan rancangan sistem *Tri-Generation Plant*, memperoleh informasi tentang optimasi pemanfaatan energi panas gas buang pada pembangkit tenaga gas, dan memperoleh informasi mengenai proses, kondisi proses, cara pemantauan dan pembuktian unjuk kerja sistem *Tri-Generation Plant*.

METODE PENELITIAN



Gambar 1. Alur Penelitian

Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian di lapangan untuk turbin gas dan *tri-generation plant* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Unjuk Kerja Turbin Gas

NO.	PARAMETER	UNIT	14-Oct-22									
			11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
1	GTGI Gas flow Totalizer	Nm ³	11226391	11229626	11231166	11233090	11235067	11237415	11240140	11241457	11243686	11245364
2	Gas Calorific Value	kJ/m ³	36900	37000	36900	37030	37010	36960	36950	36950	36930	36930
3	GT Power Output	k/w	7547	7556	7549	7567	7555	7562	7571	7546	7561	7548
	Gross Power Output	k/WH	36613080	36628501	36629880	36636640	36643590	36651040	36661410	36666040	36673870	36681880
4	Flue gas Temperatures EGT ave	°C	518.00	519.00	520.00	521.00	521.00	521.00	521.00	520.00	520.00	520.00
5	FG Temp at GTGI outlet (Average)	°C	529.80	530.00	531.47	530.87	530.69	531.11	530.69	529.91	529.97	530.81
6	Ambient temperature	°C	33.0	35.0	35.0	35.0	33.0	32.0	31.0	30.0	29.0	28.0
7	Fuel Gas Flow	Nm ³ /Jam	3235	1540	1924	1977	2348	2725	1317	2229	2278	2141
9	Fuel Gas Flow	Nm ³ /s	0.899	0.428	0.534	0.549	0.652	0.757	0.366	0.619	0.633	0.595
10	Energi input kalor	(kW)	33.159	15.828	19.721	20.336	24.139	27.977	13.518	22.878	23.368	21.963
11	Efisiensi	(%)	22,8%	47,7%	38,3%	37,2%	31,3%	27,0%	56,0%	33,0%	32,4%	34,4%

Pengambilan data *thermal oil heater* dilakukan pada 14 Oktober 2022 dan dilakukan setiap satu jam. Dengan menggunakan parameter di dalam Tabel 2. maka dapat ditentukan keseimbangan energi *thermal* yang di serap oleh *thermal oil*, energi *thermal* yang tersisa di gas buang dan efisiensi dari *thermal oil*.

Tabel 2 Unjuk Kerja Thermal Oil Heater (TOH)

NO.	PARAMETER	UNIT	14-Oct-22									
			11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
1	Duct burner firing cummlative gas flow	Nm3	162214	162349	162509	162628	162758	162912	163100	163193	163351	163512
2	Gas Calorific Value	kJ/m3	36.900	37.000	36.900	37.030	37.010	36.960	36.950	36.950	36.930	36.930
3	TOH1 flowrate (Average)	m3/hr	656,45	655,39	661,57	662,45	650,57	664,62	660,92	662,4	656,27	658,51
		mmH2O	1,698	1,672	1,705	1,711	1,655	1,720	1,699	1,709	1,676	1,704
4	TOH1 Flow Totalizer	m3/hr	3616878	3617854	3618325	3618914	3619519	3620236	3621067	3621469	3622149	3622845
5	TOH1 inlet temp	°C	304,15	304	303,8	303,75	303,75	303,85	303,85	303,85	303,85	303,85
6	TOH1 outlet temp	°C	324	324,55	324,5	324,35	324,55	324,4	324,85	324,55	324,75	324,8
7	Flue gas Temperatures EGT ave	°C	518,00	519,00	520,00	521,00	521,00	521,00	521,00	520,00	520,00	520,00
8	FG Temp at GTG1 outlet (Average)	°C	529,80	530,00	531,47	530,87	530,69	531,11	530,69	529,91	529,97	530,81
9	FG Temp at Furnace (Average)	°C	543,30	554,50	557,30	557,70	557,10	556,80	560,00	559,80	559,70	561,10
10	FG Temp at TOH outlet (Average)	°C	304,5	304,8	304,6	304,6	304,6	304,6	304,8	304,57	304,69	304,81

Pengambilan data dan parameter *evaporator* dilakukan pada 14 Oktober 2022 pada Tabel 3. Dengan menggunakan parameter tersebut maka dapat ditentukan berapa energi *thermal* dan efisiensi *evaporator*, dan juga dapat ditentukan energi *thermal* yang tersisa di gas buang keluar dari *evaporator*.

Tabel 3 Unjuk Kerja Evaporator

Date :		14-Oct-22										
GTG No :		1										
NO.	PARAMETER	UNIT	14-Oct-22									
			11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
1	Steam flow (totalizer)	t/h	5.13	5.08	5.06	5.08	5.01	5.06	5.05	5.06	5.11	5.12
		ton	19.039	19.046	19.050	19.054	19.059	19.065	19.071	19.074	19.079	19.085
2	Average steam pressure	barg	12.39	12.40	12.35	12.43	12.22	12.32	12.39	12.45	12.32	12.33
3	Feed water flow FI 1201	m3/h	6.19	4.90	6.27	4.99	4.17	5.75	6.82	5.68	6.79	5.61
	Feed water flow (dari totalizer) FQ 1202	m3/h	22.334.00	22.342.00	22.346.00	22.351.00	22.356.00	22.362.00	22.369.00	22.373.00	22.379.00	22.385.00
4	Average feed water temp	°C	99.42	99.40	99.42	99.32	99.40	99.30	99.34	99.34	99.42	99.40
5	FG Temp at TOH outlet (Average)	°C	304.90	304.80	304.60	304.60	304.60	304.60	304.80	304.57	304.69	304.81
6	FG Temp at Evaporator outlet (Average)	°C	194.30	194.20	194.10	194.10	193.50	194.00	194.20	194.30	194.00	194.00
7	FG Temp at Economizer outlet (Average)	°C	176.80	179.70	172.53	177.30	171.10	171.50	176.40	170.60	175.68	169.68

Pengambilan data dan parameter *hot water economizer* dilakukan pada 14 Oktober 2022 pada Tabel 4, dengan menggunakan parameter tersebut maka dapat ditentukan berapa energi *thermal* dan efisiensi *hot water economizer*, dan juga dapat ditentukan energi *thermal* yang tersisa di gas buang keluar dari dari *economizer*.

Tabel 4 Unjuk Kerja Hot Water Economizer

Date :		14-Oct-22										
GTG No :		1										
NO.	PARAMETER	UNIT	14-Oct-22									
			11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
1	Hot water flow (from totalizer)	m3/h	217.26	216.20	217.56	215.34	217.89	217.71	217.62	217.74	216.21	215.76
		m3	636.989	637.305	637.460	637.652	637.851	638.087	636.361	638.495	636.718	638.946
2	Hot water In (Average) temp	°C	80.64	79.40	78.46	78.50	80.40	80.66	80.58	80.57	80.58	60.10
3	Hot water Out (average) temp	°C	69.18	88.50	87.95	87.99	89.28	89.07	89.67	90.02	89.90	90.56
4	FG Temp at Economizer outlet (Average)	°C	176.80	179.70	172.53	177.30	171.10	171.50	176.40	170.60	175.68	169.68
5	FG Temp at H.W.Economizer outlet (Average)	°C	164.00	156.30	151.56	154.60	138.00	150.40	153.90	148.90	153.24	134.76
6	H.W.C. Chilled water Flow rate	m3/h	225.60	225.70	239.13	234.21	229.60	216.70	215.70	215.30	214.35	235.23
7	H.W.C. Chilled water Flow rate Totalizer	m3	700.614	700.953	701.119	701.331	701.543	701.785	702.057	702.190	702.410	702.652
8	H.W.C. Chilled water Supply temp (Outlet)	°C	8.80	9.1	9.50	9.90	9.40	9.10	8.90	8.90	8.90	9.20
9	H.W.C. Chilled water Return temp (Inlet)	°C	15.10	15.2	15.40	16.00	15.70	15.60	15.40	15.30	15.40	15.40

Pengambilan data dan parameter *steam chiller* dilakukan pada 21 Oktober 2022, dengan pemanfaatan energi *thermal* uap maka akan di dapatkan temperature *chilled water* yang optimum seperti pada Tabel 5.

Tabel 5 Unjuk Kerja Steam Chiller

Date :		21-Oct-22										
Equipment:		Steam Chiller										
NO.	PARAMETER	UNIT	21-Oct-22									
			11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
1	S.C. Chilled Water Flow rate	m ³ /h	986.04	989.55	986.04	989.28	985.91	984.96	980.51	978.62	967.82	976.53
2	S.C. Chilled Water Flow Meter Totalizer	m ³	4,515,280	4,516,331	4,517,272	4,518,210	4,519,232	4,520,188	4,521,157	4,522,176	4,523,115	4,524,142
3	S.C. Chilled Water Supply temp (outlet)	°C		13.20		13.10		13.00		12.70		11.60
4	S.C. Chilled Water Return temp (inlet)	°C		17.00		16.80		16.90		16.60		15.50
5	S.C. Steam flow meter	Ton/h	5.15	5.22	5.14	4.97	5.28	5.14	5.25	5.42	5.36	5.40
6	S.C. Steam flow meter Totalizer	Ton	22,621	22,627	22,632	22,637	22,642	22,647	22,653	22,658	22,663	22,669
7	S.C. Steam Inlet Pressure	barg	10.72	10.61	10.80	10.71	10.49	10.73	10.55	10.63	10.54	10.56

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisa Perhitungan

1.1 Perhitungan Kerja Kompresor

$$W_k = \dot{m}_u \cdot C_p \cdot (T_{2s} - T_1)$$

$$W_k = 26,61 \times 146,798 = 3906,297$$

$$\text{kJ/s} = 3.906,297 \text{ kW}$$

1.2 Kapasitas Kalor Masuk Bahan Bakar

$$Q_{in} = \dot{m}_{bb} \cdot LHV_{bb}$$

$$Q_{in} = 0,679 \times 35.017,988$$

$$Q_{in} = 23.792,777 \text{ kJ/s} = 23.792,777$$

$$\text{kW}$$

1.3 Perhitungan Daya Turbin

$$W_{T_s} = (\dot{m}_u + \dot{m}_{bb}) \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4)$$

$$W_{T_s} = (26,62 + 0,043) \times 455,092$$

$$= 26,653 \times 455,092$$

$$W_{T_s} = 12.129,389 \text{ kJ/s} = 12.129,389$$

$$\text{kW}$$

Energi gas buang keluar dari turbin (W_{exh}):

$$W_{exh} = \dot{m}_{exh} \cdot C_p \cdot T$$

$$W_{exh} = 23.433,920 \text{ kJ/s} = 23.433,920 \text{ kW}$$

1.4 Perhitungan Efisiensi Thermal Turbin Gas (η_c)

$$\eta_c = (W_{net} / Q_{in}) \times 100 \%$$

$$= \{(W_{T_s} - W_k) / Q_{in}\} \times 100 \%$$

$$= \{(12.129,389 - 3.906,297) / 23.792,777\} \times 100 \%$$

$$\eta_c = 34,5 \%$$

1.5 Perhitungan Energi Thermal Oil Heater (TOH)

$$E_{TOH} = \dot{m}_o \cdot h = \dot{m}_o \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1)$$

$$E_{TOH} = 219,3 \times 1,67 \times (598 - 581,3)$$

$$= 219,3 \times 1,67 \times 16,7$$

$$E_{TOH} = 6.116,058 \text{ kW}$$

Energi kalor yang dikeluarkan oleh gas buang adalah sebagai berikut:

$$Q_{out} = \dot{m}_e \cdot C_p \cdot (T_{ein} - T_{eout})$$

$$Q_{out} = 26,8 \times 1,099 \times (800 - 597,5)$$

$$= 5.964,273 \text{ kJ/s}$$

$$Q_{out} = 5.964,273 \text{ kW}$$

Q_{in} adalah energi gas buang masuk ke TOH

$$Q_{out} = \dot{m}_e \cdot C_p \cdot T_{eout}$$

$$= 26,8 \times 1,099 \times 800$$

$$Q_{out} = 23.562,56 \text{ kW}$$

$$\eta_t = (E_{TOH} / Q_{in}) \times 100 \%$$

$$= (6.116,058 / 23.562,56) \times 100$$

%

$$\eta_t = 25,9 \%$$

1.6 Perhitungan Energi Thermal Air Umpan di Evaporator dan Economizer

$$W_b = E_b = W_{tk2} - W_{tk1}$$

$$= 5.236,875 - 829,1$$

$$W_b = E_b = 4.407,775 \text{ kW}$$

1.7 Perhitungan Efisiensi Thermal Evaporator dan Economizer (η_b)

$$\eta_b = (E_b / Q_{in}) \times 100 \%$$

$$= (4407,775 / 17598,29) \times 100 \%$$

$$\eta_b = 25,0 \%$$

1.8 Perhitungan Efisiensi Thermal Hot Water Economizer (η_{HW})

$$\eta_{HW} = (E_{HW} / Q_{in}) \times 100 \%$$

$$= (2.678,64 / 13.195,03) \times 100 \%$$

$$\eta_{HW} = 20,3 \%$$

1.9 Perhitungan Energi Kondensat di Condensate Pre Heater

$$E_{CP} = (E_{CP} / Q_{in}) \times 100 \%$$

$$= (188,16 / 10.455,89) \times 100 \%$$

$$\eta_{CP} = 1,79 \%$$

1.10 Daya Auxiliary Turbin Gas dan Tri-Generation Plant.

- Total auxiliary power turbin gas dan tri-generation plant:

Tabel 6. Auxiliary Power pada Turbin Gas dan Tri-Generation Plant

Power Supply		Electrical Consumer	
GTG-1	7.55 MW (base load mode)	Tri-gen. AUX consumers	1.5 MW
GTG-2	7.55 MW (base load mode)		

Untuk detail *single line diagram auxiliary power* dapat di lihat di lampiran 9.

1.11 Efisiensi Total Thermal Sistem (Turbin Gas & Tri-Generation Plant)

$$\eta_{\text{system}} = \frac{[(7600,0 + 6116,0 + 4407,7 + 2678,6 + 188,1) - (1500)] \times 100 \%}{23792,7}$$

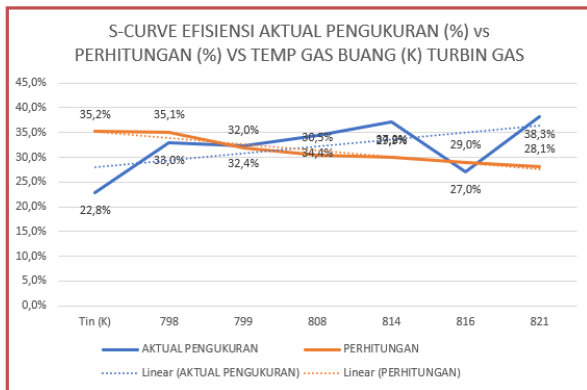
$$= \frac{19490,4 \times 100 \%}{23792,7}$$

$\eta_{\text{system}} = 81,9 \%$

Perbandingan Efisiensi Thermal Berdasarkan Perhitungan dan Aktual Pengukuran.

a) Turbin Gas

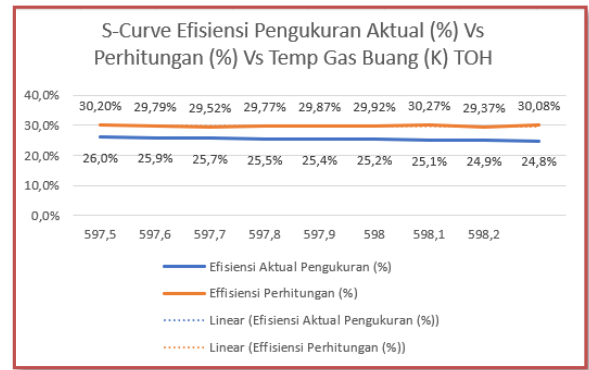
Perbandingan efisiensi turbin gas secara perhitungan menggunakan data pabrik dan secara aktual pengujian seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2 S-Curve Efisiensi Perhitungan Vs Pengujian di Lapangan Vs Temp Gas Buang Turbin Gas

b) Thermal Oil Heater

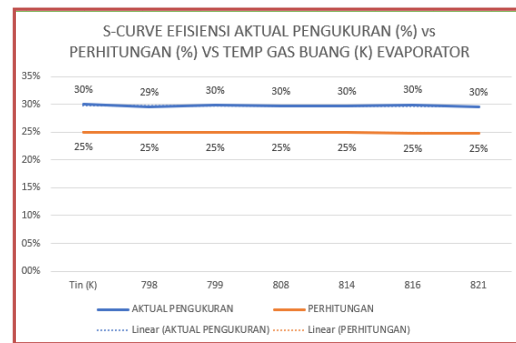
Perbandingan efisiensi TOH secara perhitungan dengan menggunakan data pabrik dan secara pengujian seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3 S-Curve Efisiensi Perhitungan Vs Pengujian di Lapangan vs Temp Gas Buang TOH

c) Evaporator

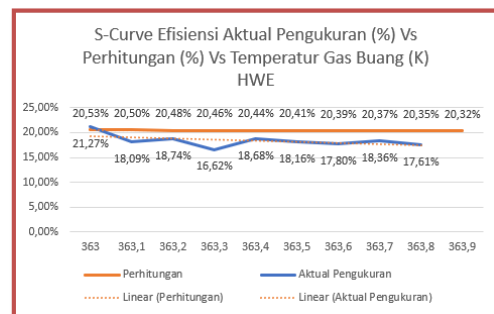
Perbandingan efisiensi *Evaporator* secara perhitungan dengan menggunakan data pabrik dan secara pengujian seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4 S-Curve Efisiensi Perhitungan Vs Pengukuran Vs Temp Gas Buang Evaporator

d) Hot Water Economizer

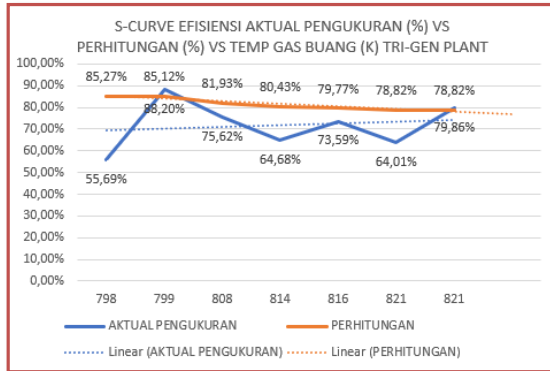
Perbandingan efisiensi *hot water economizer* secara perhitungan dengan menggunakan data manufaktur dan secara pengujian di lapangan adalah seperti ditunjukkan oleh Gambar 5.



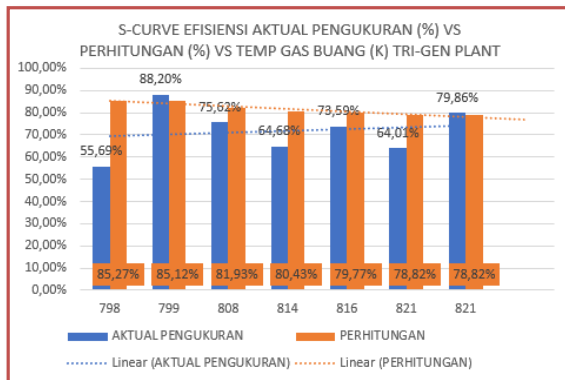
Gambar 5 S-Curve Efisiensi Thermal Perhitungan Vs Pengujian Vs Temp Gas Buang HWE

e) **Tri-Generation Plant**

Perbandingan efisiensi *Tri Generation Plant* secara perhitungan dengan menggunakan data pabrikan dan secara pengujian seperti ditunjukkan oleh Gambar 6.

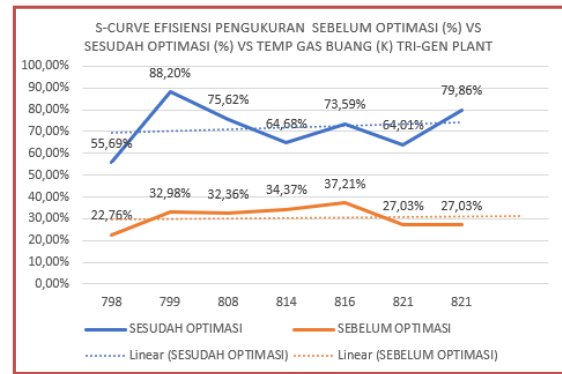


Gambar 6 S-Curve Efisiensi Thermal Perhitungan Vs Pengukuran Vs Temp Gas Buang *Tri Generation Plant*



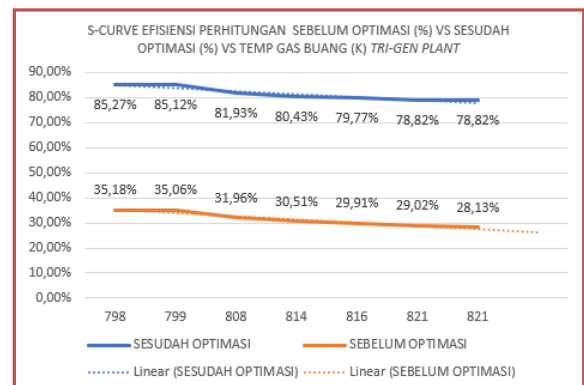
Gambar 7 S-Diagram Batang Efisiensi Thermal Perhitungan Vs Pengukuran Vs Temp Gas Buang *Tri Generation Plant*

Perbandingan efisiensi *thermal tri generation plant* secara pengukuran pada saat sebelum dilakukan optimasi pemanfaatan energi *thermal* gas buang turbin gas dan setelah pemanfaatan energi *thermal* gas buang dapat di lihat pada Gambar 8, yang mana setelah optimasi di dapatkan kenaikan efisiensi thermal sebesar 41,11 %.



Gambar 8 S-Curve Efisiensi Thermal Pengukuran Sebelum dan Sesudah Optimasi Vs Temp Gas Buang *Tri Generation Plant*

Perbandingan efisiensi sistem *thermal tri generation plant* secara perhitungan pada saat sebelum dilakukan optimasi pemanfaatan energi *thermal* gas buang turbin gas dan setelah pemanfaatan energi *thermal* gas bunag dapat di lihat pada Gambar 9, yang mana setelah dilakukan optimasi di dapatkan kenaikan efisiensi thermal sebesar 50,05 %.



Gambar 9 S-Curve Efisiensi Thermal Perhitungan Sebelum dan Sesudah Optimasi Vs Temp Gas Buang *Tri Generation Plant*

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan pengujian sebelum dan sesudah optimasi pemanfaatan energi *thermal* gas buang turbin gas pada *tri-generation plant* maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil perhitungan efisiensi *thermal* sistem keseluruhan (*overall system*) berdasarkan data dari pabrikan (*manufacture*) sebelum dilakukan

- optimasi pemanfaatan energi *thermal* gas buang turbin gas sebesar 35,18%.
- Hasil perhitungan efisiensi *thermal* sistem keseluruhan (*overall system*) berdasarkan hasil pengujian sebelum dilakukan optimasi pemanfaatan energi *thermal* gas buang turbin gas sebesar 32,1%.
 - Efisiensi *thermal* sistem keseluruhan (*overall system*) yang dihitung berdasarkan data pabrikan (*manufacture*) dengan memperhitungkan pemanfaatan energi *thermal* gas buang turbin gas pada *tri generation plant* dan tanpa memperhitungkan rugi-rugi ke lingkungan sekitar sebesar 81,89 %.
 - Efisiensi *thermal* sistem keseluruhan (*overall system*) dengan memperhitungkan pemanfaatan energi *thermal* gas buang turbin gas pada *tri generation plant* pada saat pengujian sebesar 71,66 % atau 10,23 % lebih rendah dibandingkan hasil perhitungan teoritis.
 - Berdasarkan perhitungan menggunakan data pabrikan bahwa semakin tinggi temperatur keluar gas buang menyebabkan efisiensi *thermal* turbin gas semakin rendah.
 - Efisiensi *thermal* sistem *tri-generation plant* secara keseluruhan dipengaruhi oleh perubahan beban pada sistem turbin gas.

- [6] J. C. Bruno, V. Ortega-López, and A. Coronas, "Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: Case study of a sewage treatment plant," *Appl Energy*, vol. 86, no. 6, pp. 837–847, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.08.007.
- [7] A. L. Polyzakis, C. Koroneos, and G. Xydis, "Optimum gas turbine cycle for combined cycle power plant," *Energy Convers Manag*, vol. 49, no. 4, pp. 551–563, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2007.08.002.
- [8] M. Valdes and J. L. Rapun, "Optimization of heat recovery steam generators for combined cycle gas turbine power plants." [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/apthermeng
- [9] J. C. Bruno, V. Ortega-López, and A. Coronas, "Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: Case study of a sewage treatment plant," *Appl Energy*, vol. 86, no. 6, pp. 837–847, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.08.007.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. K. Ibrahim and M. M. Rahman, "Effect of Compression Ratio on Performance of Combined Cycle Gas Turbine," *International Journal of Energy Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 9–14, Aug. 2012, doi: 10.5923/j.ijee.20120201.02.
- [2] "RUPTL_PLN_2016".
- [3] E. Özgirgin, "utilization of natural gas optimization of cogeneration/combine cycle application, 2004.
- [4] N. Gusnita and K. S. Said, "Analisa Efisiensi dan Pemanfaatan Gas Buang Turbin Gas Alsthom Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas Kapasitas 20 Mw," *Sains, Teknologi dan Industri*, vol. 14, no. 2, pp. 209–218, 2017.
- [5] Engel, "濟無No Title No Title No Title," *Paper Knowledge. Toward a Media History of Documents*, no. 4, 2014.