

# Analisis Eksergi Pada Pembangkit Listrik yang Memanfaatkan Panas Buangan di PT Semen Padang

Nadry Heroza, Adjar Pratoto\*

Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Andalas,  
Jl. DR. M. Hatta, Kampus UNAND Limau Manis, Padang, Indonesia 25163

## Abstrak

Analisis eksergi pembangkit listrik yang memanfaatkan panas buang di PT. Semen Padang dilakukan untuk mengidentifikasi keandalan pembangkit, baik secara keseluruhan sistem ataupun masing-masing komponen. Hal ini penting sebagai landasan untuk optimalisasi pemanfaatan panas buang serta efisiensi pengoperasian pembangkit, seiring bertambahnya umur pemakaian. Aliran eksergi dan efisiensi eksergi dihitung untuk setiap komponen yang kemudian digunakan untuk menghitung seberapa besar eksergi yang termusnahkan pada masing-masing komponen. Perhitungan juga dilakukan terhadap sistem pada saat commissioning agar diketahui seberapa besar perubahan efisiensi eksergi sejak sistem ini beroperasi. Komponen pembangkit ini meliputi SP boiler, AQC boiler, turbin, kondenser, pompa kondensat, flasher, boiler feed pump dan economizer. AQC boiler adalah komponen yang memiliki nilai eksergi yang termusnahkan paling besar, yaitu sebesar 4405.34 kW atau 32.98% dari total eksergi yang dimusnahkan dalam sistem secara keseluruhan. Sedangkan pompa kondensat adalah komponen yang memiliki nilai eksergi yang termusnahkan paling kecil 18.94 kW (0.14%). Efisiensi sistem pada Januari 2012 adalah 62.60% dan mengalami penurunan di Desember 2019 menjadi 53.04% yang mana terjadi penurunan efisiensi eksergi sistem secara keseluruhan sebesar 9.56% dalam waktu 7 tahun operasi.

**Kata kunci:** Eksergi; eksergi termusnahkan; efisiensi eksergi; pembangkit listrik; panas buangan

## Abstract

**[Title: Exergy Analysis of Waste Heat Recovery Power Generation system at PT Semen Padang]** Exergy analysis of a power plant that utilizes exhaust heat at PT. Semen Padang was carried out to identify the reliability of the power generating system and its main components that could be used as a basis for optimizing the utilization of exhaust heat and optimizing the operation of the generator to make it more efficient with increasing usage life. The exergy flow and efficiency are calculated for each component which is then used to calculate the exergy destroyed in the respective component. Calculations are also carried out on the system at the time of commissioning in order to get how much the exergy efficiency has changed since the system was operational. The components of this plant include SP boiler, AQC boiler, turbine, condenser, condensate pump, flasher, boiler feed pump, and economizer. AQC boiler is the component with the highest exergy value that is destroyed, which is 4405.34 kW or 32.98% of the total exergy destroyed in the system. In comparison, the condensate pump is the component that has the smallest destroyed exergy value of 18.94 kW (0.14%). The system efficiency in January 2012 was 62.60% and decreased in December 2019 to 53.04%, where the overall system exergy efficiency decreased by 9.56% within 7 years of operation..

**Keywords:** Exergy; exergy destruction; exergy efficiency; power plant; waste heat

## 1. Pendahuluan

Keandalan kinerja pembangkit listrik sangat penting bagi industry. Dalam dunia industri pemanfaatan

sumber daya energi yang tersedia perlu dimanfaatkan dengan tepat. Pemanfaatan ini bisa dilihat dari kinerja yang ada. Dengan menilai kinerja tersebut, dapat ditentukan area atau komponen mana yang memiliki kinerja konversi energi yang rendah dan dapat pula diidentifikasi di mana perbaikan perlu dilakukan (Wu et al., 2014). Hal ini sangat membantu dalam meningkatkan efisiensi sistem atau

---

\*) Penulis Korespondensi.

E-mail: [adjar.pratoto@eng.unand.ac.id](mailto:adjar.pratoto@eng.unand.ac.id)

komponen energetik, meminimalkan biaya operasi dan meningkatkan profitabilitas industri. Metode yang umum digunakan dalam mengevaluasi kinerja pembangkit energi adalah analisis energi (Saidur et al., 2010).

Metode analisis energi konvensional didasarkan pada Hukum Pertama Termodinamika yang berkaitan dengan prinsip kekekalan energi. Hukum Pertama berkaitan dengan jumlah energi dari berbagai bentuk yang dipindahkan dari sistem ke lingkungan atau sebaliknya serta perubahan energi yang tersimpan dalam sistem yang setara dengan perpindahan energi *netto* dalam bentuk kerja dan/atau panas (Kotas, 1985). Namun, Hukum Pertama kadang-kadang memberikan hasil yang tidak akurat terhadap kinerja peralatan konversi energi dan optimasi melalui Hukum Pertama hampir mencapai tingkat saturasi (Ray et al., 2010). Demikian juga, dalam Hukum Pertama yang diperhatikan adalah jumlah energi dan perubahan dari satu bentuk ke bentuk lainnya tetapi tidak memperhitungkan aspek kualitas energi (Cengel & Boles, 2015).

Metode lain yang dapat digunakan dalam analisis kinerja sistem energetik adalah analisis eksergi. Analisis eksergi memberikan perbedaan antara kehilangan energi terhadap lingkungan dan irreversibilitas internal dalam proses (Aljundi, 2009). Aspek kualitas energi ini diperhitungkan oleh Hukum Kedua Termodinamika. Hukum Kedua menyediakan sarana yang diperlukan untuk menentukan kualitas serta tingkat degradasi energi selama proses.

Eksergi adalah jumlah kerja maksimum yang bisa diperoleh oleh suatu sistem atau aliran fluida kerja dari suatu tingkat keadaan awal tertentu hingga mencapai keseimbangan dengan lingkungannya atau yang disebut juga dengan tingkat keadaan mati (*dead state*). Eksergi mengukur potensi sistem atau aliran yang menyebabkan perubahan sebagai konsekuensi dari tidak sempurnanya kesetimbangan relatif terhadap lingkungan. Berbeda dengan energi, eksergi tidak kekal selama proses berlangsung, eksergi selalu hancur dalam suatu proses. Eksergi yang hancur sebanding dengan entropi yang disebabkan oleh irreversibilitas (Cengel & Boles, 2015; Li & Liu, 2012). Informasi mengenai besaran eksergi yang musnah atau kehilangan eksergi dapat digunakan sebagai pijakan dalam upaya peningkatan efektifitas termodinamik sistem atau komponen energetik (Moran, 2002).

Penelitian yang dilakukan Han et al. (2018) dan Karyadi & Rangkuti (2016) menunjukkan bahwa dengan analisis energi dan eksergi didapatkan gambaran penurunan performa serta besarnya kerugian akibat eksergi yang dimusnahkan sebagai penyebab inefisiensi pada pembangkit. Dari analisis eksergi, penghancuran eksergi tertinggi terjadi pada komponen boiler dan kondenser (Ahmadi & Toghraie, 2016; Pilankar & Kale, 2016; Musanta et al., 2013). Hal ini dipengaruhi oleh faktor perbedaan suhu antara fluida kerja dengan suhu

lingkungannya. Faktor tekanan lingkungan dan laju aliran pada komponen juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi eksergi, efisiensi energi dan laju destruksi (Afrianto et al., 2015). Secara garis besar, keunggulan analisis eksergi bila dibandingkan dengan analisis energi antara lain: (1) efisiensi eksergi menunjukkan nilai-nilai yang mendekati kondisi ideal dan memberikan informasi yang lebih bermakna dalam penilaian kinerja suatu sistem energetik serta mampu mengidentifikasi lokasi, penyebab, dan sumber-sumber penyimpangan dari kondisi ideal; (2) metode eksergi dapat membantu dalam evaluasi parameter-parameter termodinamik dari berbagai jenis output suatu sistem yang kompleks, seperti kogenerasi atau trigenerasi; (3) metode eksergi dapat digunakan dalam memperbaiki asesmen ekonomi dan lingkungan; (4) eksergi dapat menambah pemahaman konservasi energi dan krisis energy; dan (5) metode eksergi dapat membantu dalam optimasi proses (Yang & Wu, 2013).

Pada tahun 2009 pemerintah Indonesia dalam hal ini Kementerian Perindustrian dan pemerintah Jepang melalui *New Energy Technology Development Organization* (NEDO) membangun WHRPG (*Waste Heat Recovery Power Generation*) di PT Semen Padang. WHRPG merupakan salah satu teknologi yang digunakan dalam penggunaan gas buang sisa proses pembakaran atau produksi industri untuk menghasilkan energi listrik. PT Semen Padang sendiri memiliki kapasitas produksi 6.3 juta ton per tahun dengan kebutuhan batubara lebih kurang 760 ribu ton/tahun yang berpotensi menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> cukup besar. Dengan diterapkannya WHRPG, emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dapat berkurang sehingga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi serta meminimalkan dampak lingkungan dan memperlambat pemanasan global. Selain itu pembangkit ini juga menghasilkan tenaga listrik sekitar 63,2 GWh dalam satu tahun dari panas yang terbuang selama proses produksi (PT. Semen Padang, 2012).

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Deskripsi Sistem

Gambar 1 memperlihatkan sistem WHRPG di PT Semen Padang dengan kapasitas 8.5 MW. Garis merah putus-putus merupakan batas sistem yang digunakan dalam kajian ini. Sistem pembangkit ini menggunakan dua boiler dengan kapasitas masing-masing 25 ton/jam dan 30 ton/jam. Sumber panas pada boiler tersebut berasal dari panas buangan proses. Sumber panas buangan pertama adalah dari *suspension preheater* dan yang kedua adalah dari *grate cooler*. Gas buang dimanfaatkan untuk mengubah air menjadi uap yang kemudian dialirkan ke turbin untuk memutar generator dan menghasilkan listrik. Boiler yang memanfaatkan panas dari *suspension preheater* ini disebut sebagai *SP boiler*

(Suspension Preheater boiler) sedangkan boiler yang memanfaatkan panas dari grate cooler dinamakan AQC boiler (Air Quenching Cooler boiler). Komponen utama lain dari system WHRPG adalah turbin, vacuum condenser, pompa kondensat, flasher, pompa air umpan (boiler feed pump), demineralizer plant dan cooling tower. Pada prosesnya, air umpan yang ada di flasher dipompakan ke economizer untuk pemanasan awal. Selanjutnya, air dialirkan ke Steam drum SP dan AQC boiler. Dari air ini ada yang dikembalikan lagi ke flasher apabila kebutuhan air umpan di steam drum SP dan AQC boiler sudah terpenuhi. Air umpan di steam drum dialirkan ke generator bank untuk proses perpindahan panas. Hal ini agar terjadi perubahan fasa dari cairan menjadi uap. Uap yang terbentuk dikumpulkan kembali ke steam drum dan mengalir ke superheater akibat peningkatan tekanan yang terjadi dalam steam drum. Superheater berfungsi untuk meningkatkan suhu uap agar menjadi uap kering. Selanjutnya uap kering yang dihasilkan oleh SP boiler dan AQC boiler dialirkan ke turbin uap untuk memutar turbin dan generator yang selanjutnya menghasilkan listrik. Uap keluaran turbin dikondensasikan dan didinginkan sistem pendingin dan selanjutnya dipompakan oleh pompa kondensat ke flasher. Pada flasher terjadi produksi uap tekanan rendah akibat perubahan tekanan yang besar dan tiba-tiba antara air umpan keluaran economizer terhadap tekanan flasher yang relatif sama. Pada taraf ini, makalah tidak memasukkan demineralizer plant dan cooling tower (lihat batas system pada Gambar 1).

2.2 Analisis Eksergi

Eksergi merupakan fungsi dari entalpi, suhu, dan entropi. Eksergi spesifik dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan 1.

$$X = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \tag{1}$$

dimana  $X$  adalah eksergi spesifik,  $h$  adalah entalpi,  $h_0$  adalah entalpi tingkat keadaan mati (dead state),  $T_0$  adalah suhu keadaan mati,  $S$  adalah entropi dan  $S_0$  adalah entropi tingkat keadaan mati. Laju aliran eksergi dapat diperoleh dengan mengalikan eksergi pada Persamaan 1 dengan laju aliran massa sebagaimana yang dinyatakan dalam Persamaan 2.

$$EX = \dot{m}((h - h_0) - T_0 (s - s_0)) \tag{2}$$

dimana  $EX$  adalah aliran eksergi dan  $\dot{m}$  adalah laju aliran massa.

Untuk sistem terbuka dan kondisi tunak, neraca eksergi dapat dituliskan sebagaimana yang diberikan oleh Persamaan 3.

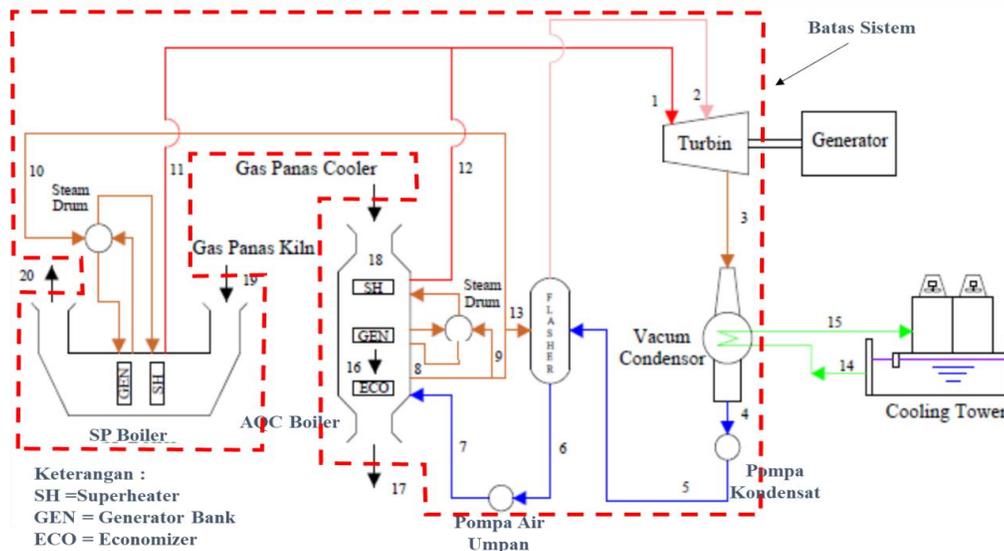
$$\sum EX_{in} = \sum EX_{out} + EX_d \tag{3}$$

dimana  $EX_{in}$  adalah aliran eksergi yang masuk,  $EX_{out}$  adalah aliran eksergi yang keluar dan  $EX_d$  adalah eksergi yang termusnahkan.

Rasio eksergi yang termusnahkan ( $Y_d$ ) terhadap total eksergi yang termusnahkan untuk tiap komponen dinyatakan dalam Persamaan 4.

$$Y_d = \frac{EX_d \text{ komponen}}{EX_d \text{ total sistem}} \tag{4}$$

Adapun, efisiensi eksergi dinyatakan dalam Persamaan 5



Gambar 1. Sistem pembangkit listrik tenaga panas buangan dan batas sistem untuk kajian

Tabel 1. Eksergi spesifik dan aliran eksergi (Desember 2019)

NO	Keterangan	Fasa	Suhu (oC)	P <sub>abs</sub> (Bar)	m (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kj.K)	X (kJ/kg)	EX (kW)
1	Uap Tekanan tinggi	Uap	318.0	12.10	10.00	3085.70	7.097	974.24	9742.44
2	Uap tekanan rendah	Uap	150.0	2.29	3.64	630.94	1.831	89.64	326.18
3	uap keluar turbin	Campuran	45.0	0.09	13.64	2582.49	8.173	150.27	2049.47
4	kondensat keluar kondenser	Cair	52.0	0.91	13.64	217.76	0.730	4.67	63.63
5	Air umpan ke Flasher	Cair	52.0	7.70	13.19	218.35	0.729	5.55	73.17
6	Air umpan masuk ke pompa	Cair	73.1	2.28	14.28	306.16	0.993	14.65	209.19
7	Air umpan ke Economizer	Cair	73.1	31.90	14.28	308.57	0.991	17.65	252.00
8	Air Umpan keluaran Economizer	Cair	188.5	31.90	14.28	801.80	2.219	144.76	2066.83
9	Air Umpan ke AQC boiler	Cair	188.5	31.90	5.81	801.80	2.219	144.76	840.41
10	Air Umpan ke SP boiler	Cair	188.5	31.90	3.75	801.80	2.219	144.76	542.85
11	Uap keluaran SH SP boiler	Uap	345.0	12.20	3.78	3144.20	7.191	1004.72	3795.62
12	Uap keluaran SH AQC boiler	Uap	294.0	12.40	6.22	3032.70	6.995	951.81	5922.38
13	Air Umpan kembali ke Flasher	Cair	188.5	31.90	4.72	801.80	2.219	144.76	683.58
14	Air pendingin ke kondenser	Cair	30.3	3.50	694.44	127.31	0.441	0.39	271.94
15	Air pendingin keluaran kondenser	Cair	35.1	3.5	694.44	147.37	0.506	1.08	749.72
16	Gas panas masuk Economizer	Udara	207.0	-	111.11	482.49	2.178	40.58	4509.35
17	Gas panas keluar Economizer	Udara	99.7	-	111.11	373.40	1.920	8.14	904.46
18	Gas panas masuk AQC boiler	Udara	322.0	-	111.11	601.77	2.400	93.53	10391.76
19	Gas panas masuk SP boiler	Udara	367.0	-	73.61	649.22	2.477	118.05	8689.35
20	Gas panas keluar SP boiler	Udara	217.0	-	73.61	492.74	2.199	44.53	3277.77

$$\eta_{Ex} = \frac{EX_{out}}{EX_{in}} \times 100 \quad (5)$$

Untuk menentukan parameter eksergetik, digunakan data rata-rata bulanan pada Bulan Desember 2019. Untuk evaluasi kinerja sistem seiring dengan umur pemakaian, parameter-parameter eksergetik tersebut dibandingkan dengan kondisi awal, yaitu kondisi saat *commissioning*. Data yang digunakan adalah data rata-rata bulanan pada Bulan Januari 2012. Data yang digunakan meliputi suhu (°C), tekanan (MPa) dan laju aliran massa (ton/jam). Adapun, entalpi dan entropi ditentukan dengan menggunakan tabel sifat termodinamika (Cengel & Boles, 2015) dan/atau dengan menggunakan neraca energi bilamana data suhu di titik yang bersangkutan tidak tersedia. Untuk evaluasi sifat-sifat gas, digunakan pendekatan gas ideal.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 1 memperlihatkan eksergi spesifik dan aliran eksergi pada bulan Januari 2019 dan Tabel 2 memperlihatkan eksergi spesifik dan aliran eksergi pada bulan Desember 2012 pada berbagai titik dalam system. Pada Gambar 2 terlihat bahwa AQC boiler memiliki nilai eksergi termusnahkan yang paling besar. Hal yang sama juga dilaporkan oleh peneliti-peneliti (Ahmadi &

Toghraie, 2016; Pilankar & Kale, 2016), bahwa eksergi termusnahkan terbesar terletak pada *boiler*. Hal ini terjadi akibat irreversibilitas yang bersumber dari perpindahan panas pada *boiler*. Selain itu, faktor perbedaan suhu antara fluida kerja dengan suhu lingkungannya juga mempengaruhi nilai eksergi yang termusnahkan. Faktor lain yang juga mempengaruhi efisiensi eksergi, efisiensi energi dan laju *destruksi* adalah laju aliran pada komponen tersebut (Afrianto et al., 2015). Pada sistem WHRPG, urutan komponen yang memiliki eksergi yang termusnahkan terbesar setelah AQC boiler adalah, turbin, *economizer*, SP boiler, kondenser, *flasher*, *boiler feed pump* dan terakhir pompa kondensat.

Jika dibandingkan eksergi yang termusnahkan pada masing-masing komponen antara bulan Januari 2012 dengan bulan Desember 2019 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan nilai eksergi yang termusnahkan di beberapa peralatan seperti pada turbin, kondenser, pompa kondensat, *flasher* dan SP boiler. Pada Januari 2012 eksergi yang termusnahkan pada turbin sebesar 2107.02 kW dan meningkat menjadi 3167.25 kW pada bulan Desember 2019. Pada kondenser juga demikian yang mana pada Januari 2012 eksergi yang termusnahkan sebesar 719.55 kW dan pada bulan Desember 2019 meningkat menjadi 1508.07 kW. Pada Januari 2012 eksergi yang termusnahkan pada pompa kondensat adalah 12.67 kW dan pada bulan Desember 2019

meningkat menjadi 18.97 kW. Demikian juga dengan *flasher* yang mana pada Januari 2012 eksergi yang termusnahkan sebesar 153.67 kW dan pada bulan Desember 2019 meningkat menjadi 221.38 kW. Untuk SP boiler pada Januari 2012 eksergi yang termusnahkan sebesar 621.13 kW dan pada bulan Desember 2019 meningkat menjadi 2158.79 kW. Berbeda halnya dengan *boiler feed pump*, *economizer* dan AQC boiler yang mana eksergi yang termusnahkan pada Desember 2019 lebih kecil dari eksergi yang termusnahkan pada Januari 2012, hal ini disebabkan oleh pengaruh laju aliran massa dan

suhu kerja yang masuk ataupun keluar pada komponen tersebut. Pada Januari 2012 aliran massa yang masuk dan keluar *boiler feed pump*, *economizer* adalah 10.94 kg/s, sedangkan pada bulan Desember 2019 laju aliran massa fluida yang bekerja pada komponen tersebut adalah 14.23 kg/s. Begitu juga dengan aliran massa yang masuk dan keluar AQC boiler, pada Januari 2012 air umpan yang masuk boiler adalah 3.47 kg/s dan uap yang keluar adalah 3.58 kg/s, sedangkan pada bulan Desember 2019 air umpan yang masuk ke boiler lebih besar dari pada Januari 2012 yaitu 5.81 ks/s dan menghasilkan uap sebesar 6.22

**Tabel 2.** Eksergi spesifik dan aliran eksergi saat *commissioning* (Januari 2012)

NO	Keterangan	Fasa	Suhu ( oC )	Pabs (Bar)	m (kg/s)	Entalpi (kj/kg)	Entropi (kg/kj.K)	X (kj/kg)	EX (kW)
1	Uap Tekanan tinggi	Uap	314.0	12.10	8.19	3076.43	7.082	969.58	7945.15
2	Uap tekanan rendah	Uap		2.30	3.92	432.69	1.364	30.69	120.20
3	uap keluar turbin	Campuran	39.0	0.06	12.11	2572.12	8.347	88.01	1065.93
4	kondensat keluar kondenser	Cair	45.0	0.94	12.78	188.51	0.639	2.54	32.49
5	Air umpan ke Flasher	Cair	45.0	8.50	12.78	193.35	0.651	3.81	48.62
6	Air umpan masuk ke pompa	Cair	56.0	2.30	10.94	234.60	0.781	6.30	68.94
7	Air umpan ke Economizer	Cair	56.0	33.20	10.94	237.23	0.779	9.52	104.17
8	Air Umpan keluaran Economizer	Cair	186.7	33.20	10.94	790.80	2.194	141.21	1545.49
9	Air Umpan ke AQC boiler	Cair	186.7	33.20	3.47	790.80	2.194	141.21	490.32
10	Air Umpan ke SP boiler	Cair	186.7	33.20	5.39	790.80	2.194	141.21	760.98
11	Uap keluaran SH SP boiler	Uap	343.9	12.40	4.61	3138.29	7.174	1004.06	4629.84
12	Uap keluaran SH AQC boiler	Uap	299.3	12.20	3.58	3044.34	7.023	954.98	3422.02
13	Air Umpan kembali ke Flasher	Cair	186.7	33.20	2.08	790.80	2.194	141.21	294.19
14	Air pendingin ke kondenser	Cair	26.9	3.50	694.44	113.10	0.394	0.19	129.58
15	Air pendingin keluaran kondenser	Cair	31.5	3.50	694.44	132.33	0.457	0.64	443.47
16	Gas panas masuk Economizer	Udara	200.0	-	111.11	475.32	2.163	37.91	4212.05
17	Gas panas keluar Economizer	Udara	91.7	-	111.11	365.32	1.898	6.61	734.47
18	Gas panas masuk AQC boiler	Udara	304.2	-	111.11	583.11	2.368	84.34	9371.14
19	Gas panas masuk SP boiler	Udara	354.7	-	69.44	636.20	2.457	111.15	7718.52
20	Gas panas keluar SP boiler	Udara	221.8	-	69.44	497.67	2.209	46.49	3228.53

**Tabel 3.** Eksergi yang termusnahkan, rasio eksergi dan efisiensi eksergi pada masing masing komponen

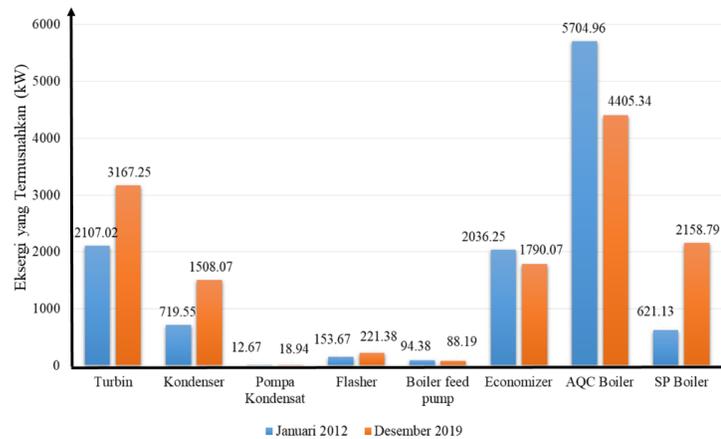
Peralatan	$EX_d$ (kW)		$Y_d$ (%)		$\eta_{Ex}$ (%)	
	2012	2019	2012	2019	2012	2019
Turbin	2107.02	3167.25	18.40	23.71	73.88	68.54
Kondenser	719.55	1508.07	6.28	11.29	39.81	35.04
Pompa Kondensat	12.67	18.94	0.11	0.14	79.33	79.44
Flasher	153.67	221.38	1.34	1.66	55.17	70.75
Boiler feed pump	94.38	88.19	0.82	0.66	52.47	74.08
Economizer	2036.25	1790.07	17.78	13.40	52.82	62.40
AQC Boiler	5704.96	4405.34	49.83	32.98	42.15	60.78
SP Boiler	621.13	2158.79	5.42	16.16	92.67	76.62

kg/s. Hal inilah yang menyebabkan nilai eksergi yang masuk, eksergi yang keluar dan eksergi yang dimusnahkan di AQC boiler pada Januari 2012 lebih kecil dari pada Desember 2019. Selain itu suhu kerja pada boiler feed pump, economizer dan AQC boiler pada Januari 2012 juga lebih kecil dari pada Desember 2019.

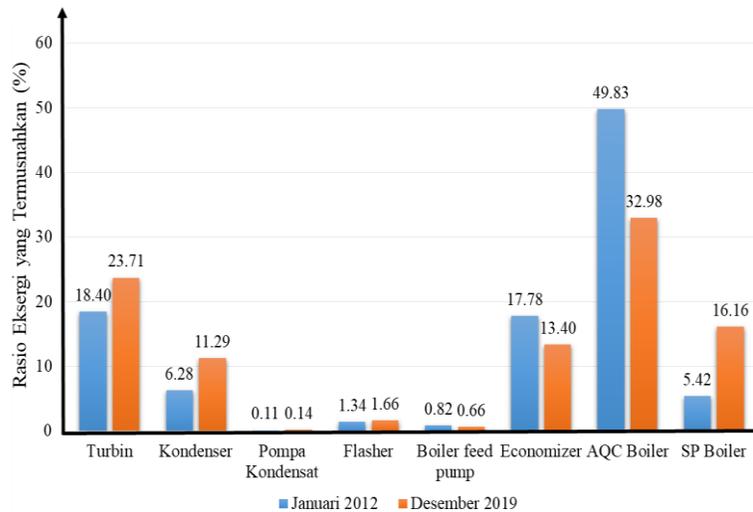
Berdasarkan perhitungan eksergi total yang termusnahkan pada bulan Januari 2012 adalah 11449.63 kW sedangkan pada bulan Desember 2019 sebesar 13358.02 kW. Dengan membandingkan total eksergi yang termusnahkan pada Januari 2012 dan Desember

2019 tersebut didapatkan bahwa terjadi kenaikan eksergi yang dimusnahkan sebesar 16.67% yang berarti secara keseluruhan performa sistem pembangkit pemanfaatan panas buangan berkurang sebesar 16.67%.

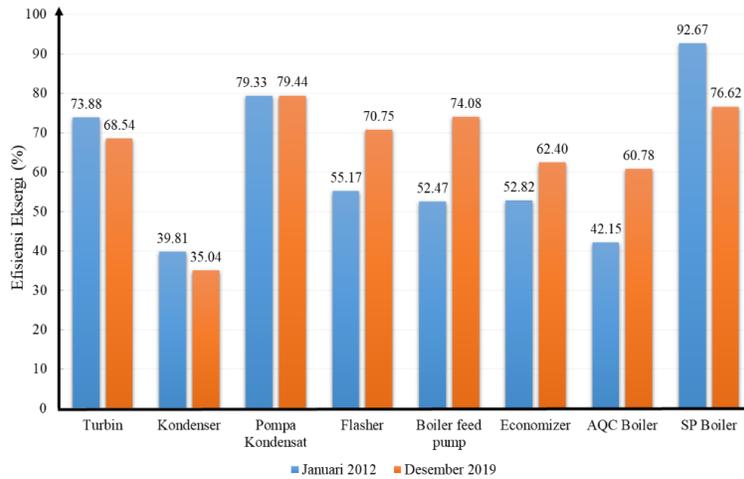
Pada Gambar 3 dapat dilihat grafik rasio eksergi yang termusnahkan pada masing-masing komponen sistem pembangkit pemanfaatan panas buangan. Rasio eksergi yang termusnahkan ini merupakan perbandingan antara eksergi yang termusnahkan pada satu komponen



Gambar 2. Eksergi yang termusnahkan pada berbagai komponen sistem pembangkit pemanfaatan panas buangan PT Semen Padang



Gambar 3. Rasio eksergi yang termusnahkan pada berbagai komponen sistem pembangkit pemanfaatan panas buangan PT Semen Padang

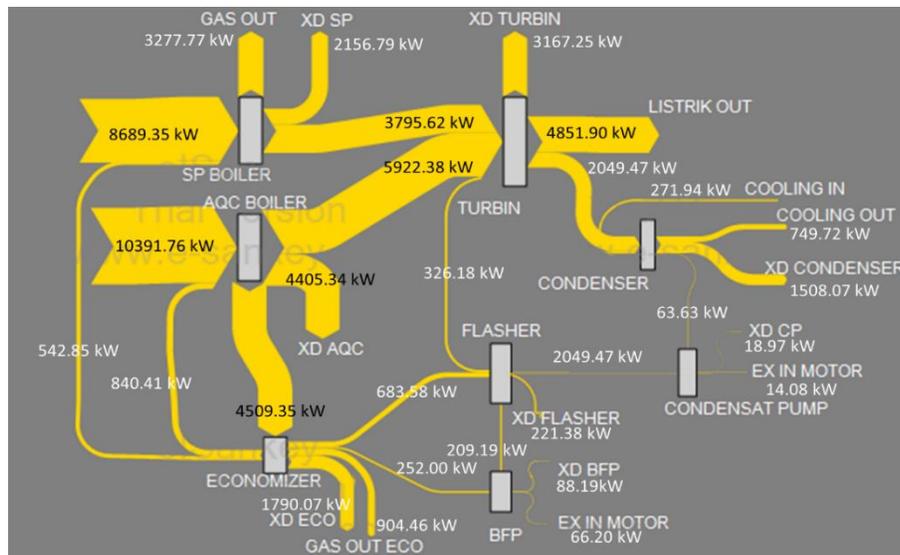


**Gambar 4.** Efisiensi eksergi masing-masing komponen sistem pembangkit pemanfaatan panas buangan PT Semen Padang

terhadap total eksergi yang dimusnahkan dalam sistem secara keseluruhan. Pada Gambar 3 juga tampak perbandingan rasio eksergi yang termusnahkan pada masing-masing komponen pada bulan Januari 2012 dan bulan Desember 2019. Secara umum, rasio eksergi yang termusnahkan sebanding dengan jumlah eksergi yang termusnahkan pada masing-masing komponen yang telah dilihat pada Gambar 2, yang mana jika dibandingkan rasio eksergi yang termusnahkan antara Januari 2012 dan Desember 2019 maka rasio eksergi yang termusnahkan meningkat seiring usia pemakaian yaitu pada turbin yang pada Januari 2012 rasio eksergi yang termusnahkan

adalah 18.40% menjadi 23.71% pada Desember 2019. Hal yang sama juga terjadi pada komponen kondenser, pompa kondensat, *flasher* dan sp boiler yang secara berurutan rasio eksergi yang termusnahkan pada bulan Januari 2012 adalah 6.28%, 0.11%, 1.34%, 0.82% dan 5.42% sedangkan rasio eksergi yang termusnahkan pada bulan Desember 2019 secara berurutan adalah 23.71% pada turbin, 11.29% pada kondenser, 0.14% pada pompa kondensat, 1.66% pada *flasher* dan 16.16% pada SP boiler.

Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa pada saat *commissioning* yaitu pada bulan Januari 2012 komponen



**Gambar 5.** Diagram Sankey sistem pembangkit pemanfaatan panas buangan PT Semen Padang

dari unit WHRPG yang paling tinggi efisiensi eksnerginya secara berurutan adalah SP boiler dengan efisiensi eksergi sebesar 92.67%, selanjutnya pompa kondensat 79.33%, turbin 73.88%, *flasher* 55.17%, *economizer* 52.82%, *boiler feed pump* 52.47%, AQC boiler 42.15% dan kondenser 39.81%. Efisiensi eksergi dipengaruhi oleh nilai aliran eksergi yang masuk dan keluar komponen serta laju aliran massa yang masuk ataupun keluar pada komponen tersebut (Afrianto et al., 2015). Pada bulan Desember 2019 efisiensi eksergi secara berurutan adalah pompa kondensat dengan efisiensi eksergi sebesar 79.44%, selanjutnya SP boiler 76.62%, *boiler feed pump* 74.08%, *flasher* 70.75%, turbin 68.54%, *economizer* 62.40%, AQC boiler 60.78% dan kondenser 35.04%. Dengan membandingkan energi listrik keluaran generator terhadap eksergi yang masuk pada SP boiler dan AQC boiler maka didapatkan efisiensi sistem WHRPG pada Januari 2012 adalah 62.60% dan mengalami penurunan di Desember 2019 menjadi 53.04%. Dengan demikian, penurunan efisiensi eksergi sistem secara keseluruhan adalah sebesar 9.56% dalam waktu 7 tahun operasi atau secara rata-rata terjadi penurunan efisiensi eksergi sebesar 1.06% per tahun.

Efisiensi eksergi sistem WHRPG secara keseluruhan yang didapatkan adalah 53.04 %. Nilai ini masih lebih rendah dibandingkan dengan nilai eksergi yang didapat oleh peneliti sebelumnya yang mana nilai efisiensi eksergi sistem pembangkit listrik pada 75% beban pembangkit adalah sebesar 59.64% (Li & Liu, 2012). Demikian juga, nilai efisiensi eksergi ini masih lebih rendah dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang mencapai 60.28% (Afrianto et al., 2015). Kisaran nilai ini juga tidak banyak berbeda dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh pada sistem HRSG (Heat recovery steam generator) pada instalasi PLTGU dimana efisiensi eksergi adalah sebesar 60.28% dan efisiensi energi sebesar 47.68%. (Afrianto et al., 2015). Perbedaan ini terjadi, antara lain, karena sistem dan kapasitasnya juga berbeda.

Pada Gambar 5 dapat dilihat diagram Sankey yang menjelaskan distribusi aliran eksergi dan eksergi yang termusnahkan pada masing-masing komponen utama pembangkit. Besar eksergi yang masuk adalah 17290.59 kW bersumber dari SP Boiler dan AQC boiler. Eksergi yang keluar dari SP boiler sebesar 3795.62 kW mengalir ke turbin, sedangkan eksergi yang termusnahkan di SP boiler adalah 3167.25 kW. Begitu juga pada AQC boiler, Eksergi yang dialirkan ke turbin sebesar 5922.38 kW dan eksergi yang termusnahkan adalah 4405.34 kW. Pada turbin eksergi yang masuk sebesar 9718 kW keluar dalam bentuk energi listrik sebesar 4852.90 kW, eksergi yang termusnahkan sebesar 3267.25 kW dan eksergi yang keluar turbin sebesar 2049.47 kW dialirkan ke kondenser. Pada kondenser eksergi yang termusnahkan adalah 1508.07 kW.

#### 4. Kesimpulan

Dalam sistem yang dikaji, komponen yang memiliki eksergi yang termusnahkan dan rasio eksergi yang termusnahkan yang paling besar adalah AQC boiler yaitu sebesar 4405.34 kW atau 32.98% dari total eksergi yang dimusnahkan. Komponen berikutnya dengan eksergi termusnahkan yang besar adalah turbin 3167.25 kW (23.71%), SP boiler 2158.79 kW (16.16%), *economizer* 1790.07 kW (13.40%), kondenser 1508.07 kW (11.29%), *flasher* 221.38 kW (1.66%), *boiler feed pump* 88.19 kW (0.66%) dan pompa kondensat 18.94 kW (0.14%). Efisiensi eksergi komponen secara berurutan dari yang besar ke yang kecil adalah pompa kondensat dengan efisiensi eksergi 79.44%, selanjutnya SP Boiler 76.62%, *boiler feed pump* 74.08%, *flasher* 70.75%, turbin 68.54%, *economizer* 62.40%, AQC boiler 60.78% dan kondenser 35.04%. Sedangkan efisiensi eksergi sistem secara keseluruhan adalah 53.04 %. Dalam waktu 7 tahun operasi (2012-2019) terjadi penurunan efisiensi eksergi sistem secara keseluruhan sebesar 9.56%.

#### Daftar Pustaka

- Afrianto, Y., Utomo, M., & Kiono, B. (2015). Analisa Efisiensi Exergi Pada HRSG (Heat Recovery Steam Generator) Di PLTGU. *Jurnal Teknik Mesin Universitas Diponegoro*, 4(4), 382–388.
- Ahmadi, G. R., & Toghraie, D. (2016). Energy and exergy analysis of Montazeri Steam Power Plant in Iran. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 56, pp. 454–463). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.074>
- Aljundi, I. H. (2009). Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. *Applied Thermal Engineering*, 29(2–3), 324–328. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.02.029>
- PT. Semen Padang (2012). JFE Jepang puji operasional WHRPG Semen Padang. Retrieved January 9, 2021, from <https://www.semenpadang.co.id/index.php?mod=foto&id=900>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics An Engineering Approach* (eighth Edn). Mc Graw-Hill Education.
- Dipak Pilankar, K., & Kale, R. (2016). Energy and Exergy Analysis of Steam and Power Generation Plant. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5(06 June 2016).
- Han, T., Wang, C., Zhu, C., & Che, D. (2018). Optimization of waste heat recovery power generation system for cement plant by combining pinch and exergy analysis methods. *Applied Thermal Engineering*, 140(March 2017), 334–340. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.039>
- Karyadi, A., & Rangkuti, C. (2016). Analisa Energi Dan

- Eksergi Pembangkit Listrik Tenaga Uap Banten 3 Lontar. *Seminar Nasional Cendekiawan*, 1–9.
- Kotas, T. (1985). The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. In *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-00894-8>
- Li, Y., & Liu, L. (2012). Exergy Analysis of 300MW Coal-Fired Power Plant. *Energy Procedia*, 17, 926–932. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.189>
- Moran, M. J. (2002). Engineering thermodynamics. *The Mechatronics Handbook*, 12-1-12–32. <https://doi.org/10.4324/9781315119717-1>
- Musanta h, G., Suryo, msk tony, & Rozi, K. (2013). Analisa Efisiensi Exergi Boiler Di Pltu Unit 3 Pt. Indonesia Power Semarang Jawa Tengah. *Jurnal Teknik Mesin*, 1(4), 16–25.
- Ray, T. K., Datta, A., Gupta, A., & Ganguly, R. (2010). Exergy-based performance analysis for proper O&M decisions in a steam power plant. *Energy Conversion and Management*, 51(6), 1333–1344. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.012>
- Saidur, R., Ahamed, J. U., & Masjuki, H. H. (2010). Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers. *Energy Policy*, 38(5), 2188–2197. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.11.087>
- Shumin Yang and Yanqing Wu. (2013). We are IntechOpen , the first native scientific publisher of Open Access books TOP 1 % Nutritional Value of Soybean Meal. *Web of Science*, 29.
- Wu, L., Wang, L., Wang, Y., Hu, X., Dong, C., Yang, Z., & Yang, Y. (2014). Component and process based exergy evaluation of a 600MW coal-fired power plant. *Energy Procedia*, 61, 2097–2100. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.084>