



ANALISIS EKSERGI SISTEM COMBINED HEAT AND POWER DI PABRIK GULA PESANTREN BARU

Ari Agustin¹, Bayu Rudiyanto^{1*}

¹Program Studi Teknik Energi Terbarukan, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Jember

Email korespondensi : bayu_rudianto@polije.ac.id

Abstract

Sugar Industry Pesantren Baru has been integrated with cogeneration system of bagasse- based which classified as CHP system. This research will evaluate CHP system in scope of thermodynamics with an exergy analysis method, so can be known number of distribution two energy forms of cogeneration and system performance. CHP system produces two energy forms simultaneously from one primary energy source, namely the form of mechanical energy (power) is 69,098.3 kW and heat is 2,662 kW. While the performance of CHP system tends not optimal. Performance of CHP system is affected by equilibrium between magnitude of exergy destruction and exergy efficiency of the system. More fundamentally, exergy analysis is able to interpret factors that cause irregularities of a system according to Second Law of Thermodynamics. Factors that cause a system's irregularities is described by irreversibility (inability to reverse). There are two types of irreversibility, namely internal irreversibility and external irreversibility. Exergy destruction refers to internal irreversibility and influenced by entropy flow of internal irreversibility that appears from process of heat transfer spontaneously. The heat transfer spontaneously allows exergy destruction to occur only in heat exchanger components or components that involve temperature differences in the process.

Keywords: sugar industry, CHP system, exergy, irreversibility, exergy destruction

Abstrak

Pabrik Gula (PG) Pesantren Baru beroperasi menggunakan sistem kogenerasi dengan bahan bakar ampas tebu yang digolongkan sebagai sistem CHP. Penelitian ini bertujuan menganalisa sistem CHP menggunakan metode analisis eksergi. Sistem CHP menghasilkan bentuk energi mekanik (*power*) sebesar 69.098,3 kW dan panas (heat) sebesar 2.662 kW, sehingga kinerja sistem CHP dianggap bekerja belum optimal. Kinerja sistem CHP dipengaruhi oleh adanya ketidakseimbangan eksergi sebagai akibat terjadinya kerusakan eksergi yang berakibat menurunnya efisiensi eksergetik sistem. Analisis eksergi mampu menginterpretasikan faktor penyebab ketidakidealan suatu sistem berdasarkan hukum Termodinamika kedua. Faktor penyebab ketidakidealan pada suatu sistem dinyatakan dengan ireversibilitas (ketidakmampuan balik). Terdapat dua jenis ireversibilitas yaitu ireversibilitas internal dan eksternal. Kerusakan eksergi merujuk pada ireversibilitas internal dan dipengaruhi oleh adanya aliran entropi yang timbul dari proses perpindahan panas spontan. Perpindahan panas spontan memungkinkan kerusakan eksergi hanya terjadi pada komponen penukar panas atau komponen yang melibatkan adanya perbedaan temperatur pada prosesnya.

Kata kunci: industri gula, sistem CHP, eksergi, ireversibilitas, kerusakan eksergi.

1. PENDAHULUAN

Pabrik gula adalah industri yang mampu menyediakan kebutuhannya sendiri melalui sistem kogenerasi (Kurniawan dan Santoso, 2009). International Institute of Refrigeration (2017) menjelaskan bahwa sistem kogenerasi adalah sistem pembangkitan dua bentuk energi yang berbeda dimana secara simultan menjadi sumber energi primer yaitu energi dalam bentuk kerja dan panas. Uap hasil pemanasan ketel uap adalah sumber energi primer sistem kogenerasi. Uap dialirkan ke turbin untuk menghasilkan kerja yang dimanfaatkan menggerakkan gilingan dan generator listrik (dikonversi bentuk energi listrik). Selanjutnya uap bekas hasil ekspansi turbin tidak dikondensasikan secara langsung tetapi air kondensat digunakan sebagai energi panas pada proses evaporasi nira tebu.

Sistem kogenerasi di industri gula memanfaatkan bahan bakar limbah biomassa atau ampas tebu untuk memanaskan ketel uap. Selain itu sistem kogenerasi mampu menghasilkan energi lain yaitu energi listrik. Banyak

negara yang menjadikan industri gula sebagai industri yang berbasis energi (selain basis pangan), karena mampu mencapai surplus energi (Kusdyanto, 2016). Sehingga industri gula jika dikelola dengan baik mampu menjadikan industri pangan dan energi.

Kurniawan dan Santoso (2009) mengatakan bahwa dua tahapan untuk mewujudkan surplus energi industri gula. Tahapan diatas adalah melakukan evaluasi energi dan melakukan penataan ulang skema energi dan kinerja industri gula. Mengingat permasalahan pada sebagian besar industri gula di Indonesia yang masih menggunakan teknologi konvensional dan memiliki umur pabrik yang sudah terlalu tua, sehingga perlu dilakukan evaluasi penggunaan energi. Evaluasi energi di pabrik gula dapat dilakukan dengan metode analisis eksergi. Analisis eksergi mampu menunjukkan sumber ketidakefektifan sistem secara akurat dan menyeluruh (Agung dan Santosa, 2003).

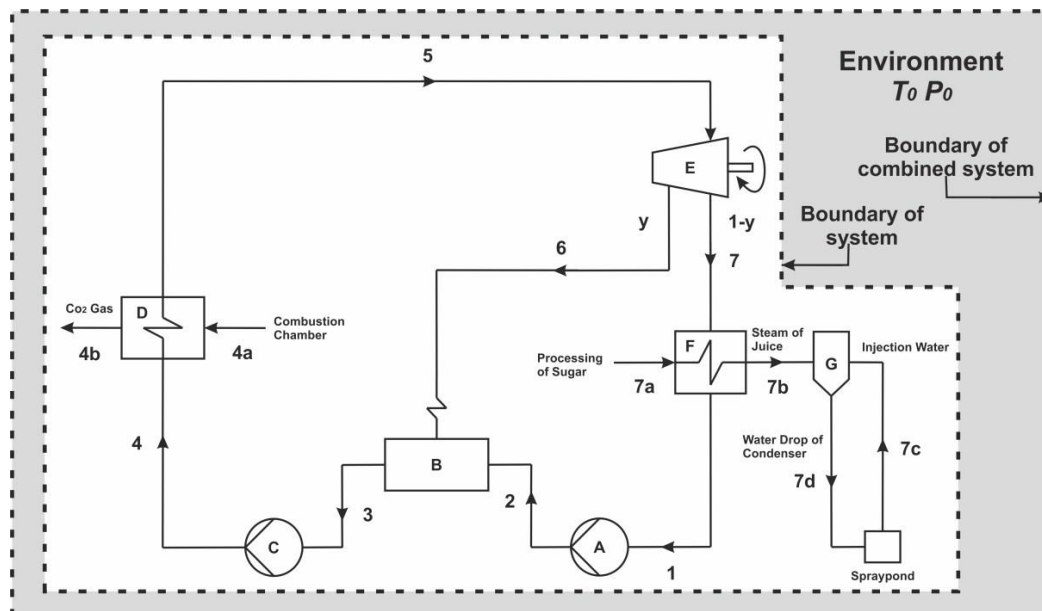
Sistem PG Pesantren Baru telah terintegrasi dengan pembangkitan energi sejak tahun 1979 (Agustin, 2018). Potensi daya listrik mencapai 9 MW dan sudah melakukan sejumlah komersialisasi energi listrik (Kusdyanto, 2016). Komersialisasi energi listrik menunjukkan adanya surplus energi di PG Pesantren Baru.

1.1 Deskripsi Titik Pengamatan

PG Pesantren berdiri pada tahun 1849 milik perseroan dari bangsa Indonesia keturunan Tionghoa yang memproduksi gula merah (Agustin, 2018). PG Pesantren berada di Desa Pesantren, Kecamatan Pesantren, Kota Kediri, Jawa Timur. Pabrik gula ini sempat mengalami beberapa pergantian hingga pada akhirnya mengalami pembaharuan produksi dari gula merah menjadi gula putih. Tahun 1979 PG Pesantren berganti nama menjadi PG Pesantren Baru.

Sistem pembangkitan energi pada PG Pesantren Baru adalah sistem kogenerasi yang berbentuk CHP (Combined Heat and Power). Pemanfaatan dua bentuk energi mendasari sistem pembangkit energi di PG Pesantren Baru yaitu sistem CHP. Dua bentuk energi tersebut yaitu energi mekanik (*power*) dan panas (*heat*). Energi mekanik digunakan dalam menggerakkan gilingan dan generator listrik. Sementara panas (*heat*) digunakan membantu proses evaporasi nira. Selain itu siklus uap-air (Rankine Regeneratif) PG Pesantren Baru terjadi proses *preheat* di deaerator atau FWH tipe terbuka. Deaerator tipe terbuka melakukan proses preheat secara langsung di mana uap pemanas bercampur dengan dengan air umpan.

Sistem CHP didalam operasinya diasumsikan sebagai sistem kompresibel yang seragam, di mana temperatur sama dengan T_0 dan tekanan sama dengan P_0 . Pemodelan ini menyebabkan terciptanya suatu batas lingkungan, sehingga lingkungan diidentifikasi sebagai sebuah sistem kompleks yang di dalamnya terdapat sistem CHP dan disebut sebagai sistem kombinasi (*combined system*). Langkah ideal dari asumsi yaitu membatasi kerja sistem agar tidak terpengaruh terhadap perpindahan dari dan/atau ke luar batas sistem kombinasi. Skema sistem kombinasi pada penelitian ini digambarkan pada Gambar 1.



Keterangan:

1. Simbol angka merupakan states
2. Simbol huruf merupakan komponen,
A = pompa 1, B = deaerator, C = pompa FW, D = ketel uap, E = turbin, F = evaporator, G = kondensor
3. y merupakan fraksi uap bekas

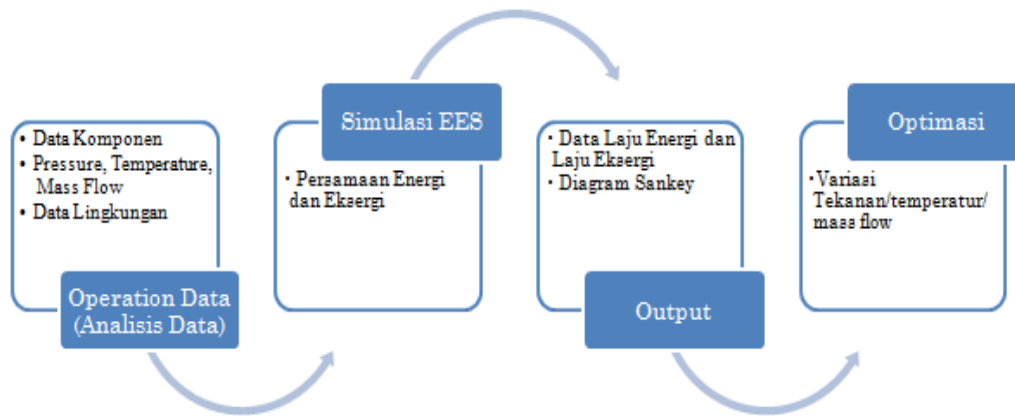
Gambar 1. Skema Sistem Kombinasi

Kondisi *dead state* ditentukan berdasarkan data lingkungan rata-rata di sekitar pembangkitan yaitu T_0

sebesar 299 K dan P_0 sebesar 1,01325 bar. Kemudian dari data T_0 dan P_0 dapat ditentukan bahwa h_0 sebesar 299,4 kJ/kg dan s_0 sebesar 5.698 kJ/kg-K.

2. METODOLOGI

Penelitian dilakukan dengan pendekatan kuantitatif dan metode penelitian deskriptif yang berbentuk studi kasus. Pengumpulan data diperlukan untuk mendapatkan data primer ataupun sekunder. Data yang dibutuhkan yaitu data sistem, data dead state, dan data variasi *dead state*. Data-data tersebut diolah menggunakan program EES dan *Steam Table*. Selanjutnya hasil analisis data disajikan lewat metode statistika deskriptif, baik dengan tabulasi, diagram dan grafik. Selain itu informasi juga disajikan dengan Diagram *Sankey*. Informasi dalam diagram *Sankey* digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem CHP, sehingga bisa ditarik kesimpulan dari penelitian. Alur penelitian disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Alur Penelitian

2.1 Persamaan Energi dan Eksergi dalam Ruang Lingkup Termodinamika

Eksergi dapat mengalir ke atau dari suatu sistem. Ketika suatu massa mengalir, maka akan terjadi perpindahan eksergi disertai dengan aliran kerja. Laju eksergi pada suatu keadaan (state) dapat menjelaskan adanya perpindahan eksergi yang dinyatakan pada persamaan 1.

$$E_{ph} = \dot{m} \cdot ((h - h_0) - T_0(s - s_0)) \quad (1)$$

di mana \dot{m} merupakan laju aliran massa fluida (kg/s), subskrip $_0$ adalah batasan dead state, h merupakan entalpi spesifik (J/kg), s merupakan entropi spesifik, T_0 adalah temperatur *dead state* (K). Neraca massa, energi, dan entropi untuk setiap sistem *steady* dengan mengabaikan perubahan energi kinetik dan energi potensial, masing-masing dinyatakan pada persamaan 2, 3, dan 4.

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (2)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Delta H \quad (3)$$

$$\frac{\Delta H}{\Delta T} - \sigma = \Delta S \quad (4)$$

di mana subskrip $_{in}$ dan $_{out}$ merupakan relasi dari masukan dan keluaran, \dot{Q} dan \dot{W} merupakan laju kalor diterima dan laju kerja dihasilkan, \dot{m} merupakan laju aliran massa fluida (kg/s), ΔH merupakan perubahan entalpi atau laju energi proses (J/s), \dot{Q} merupakan perubahan entalpi proses (J/s), ΔT merupakan perbedaan temperatur proses (K), σ merupakan perubahan entropi proses (J/s-K), σ merupakan entropi yang dihasilkan oleh irreversibilitas internal (J/s-K).

Penyusunan neraca eksergi dapat dilakukan dengan menggabungkan neraca energi dan neraca entropi, masing-masing pada persamaan 3 dan 4. Oleh karena itu, didapatkan neraca eksergi pada persamaan 5.

$$\left(\left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \cdot \Delta \dot{Q} - (\dot{W} - P_0 \Delta v) \right) - (T_0 \sigma) = \Delta E_{ex} \quad (5)$$

di mana $\left(\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot \Delta \dot{Q} - (W - P_0 \Delta v)\right)$ adalah perpindahan eksergi, $(T_0 \sigma)$ adalah kerusakan eksergi (*exergy destruction*) E_d , dan ΔE_{ex} merupakan perubahan laju eksergi pada proses. Kerusakan eksergi E_d bukan berupa properti/ sifat sehingga tidak dapat bernilai negatif dan memiliki ketentuan yaitu $E_d \geq 0$. Kerusakan eksergi bernilai positif $E_d > 0$ karena dalam sistem terdapat irreversibilitas, sedangkan bernilai nol $E_d = 0$ artinya dalam sistem tidak terdapat irreversibilitas selama proses berlangsung. Sementara perubahan laju eksergi ΔE_{ex} merupakan suatu sifat yang dapat bernilai positif $\Delta E_{ex} > 0$, bernilai 0 ($\Delta E_{ex} = 0$) ataupun negatif $\Delta E_{ex} < 0$ Sementara Dincer dan Cengel (2001) menyatakan bahwa persamaan eksergi dan parameter-parameternya dinyatakan pada persamaan 6.

$$\dot{E}_{ph,in} = \dot{E}_{ph,out} + \dot{E}_{ph,loss} + \dot{E}_d \quad (6)$$

di mana superskrip *in* dan *out* merupakan relasi dari masukan dan keluaran, sedangkan superskrip *loss* menyatakan relasi dari kerugian eksergi. Analisis energi dan eksergi pada suatu proses dalam komponen beracuan pada neraca massa, energi, entropi, dan neraca eksergi. Laju energi spesifik E_n (J/s), laju entropi \dot{S} (J/s-K), dan laju eksergi \dot{E}_{ph} (J/s) pada komponen masing-masing dinyatakan pada persamaan 7, 8, dan 9.

$$\dot{E}_n = \Delta H \quad (7)$$

$$\dot{S} = \Delta S \quad (8)$$

$$\dot{E}_{ph} = \Delta E_{ph,state} \quad (9)$$

di mana laju entropi S (J/s-K) digunakan untuk menentukan pengaruh irreversibilitas suatu proses.

Efisiensi eksergetik ϵ dapat mengukur efisiensi pemakaian sumber daya dengan berbasis eksergi atau pendekatan Hukum Termodinamika Kedua. Efisiensi eksergetik ϵ memiliki banyak persamaan atau dapat dirumuskan dalam beberapa bentuk tergantung pada proses atau komponennya, berikut ini merupakan efisiensi eksergetik ϵ pada komponen secara umum yaitu pompa, turbin, alat penukar kalor persentuhan langsung (*direct*), dan alat penukar kalor tanpa pencampuran (*indirect*), masing-masing dinyatakan pada persamaan 10, 11 dan 12.

$$\epsilon = \frac{\dot{E}_{ph,out} - \dot{E}_{ph,in}}{\dot{E}_{ncomp}} \quad (10)$$

$$\epsilon = \frac{\dot{E}_{ph,mix} - \dot{E}_{ph,cold}}{\dot{E}_{ph,hot} - \dot{E}_{ph,mix}} \quad (11)$$

$$\epsilon = \frac{\dot{E}_{ph,cold}}{\dot{E}_{ph,hot}} \quad (12)$$

di mana superskrip *in* dan *out* merupakan relasi dari masukan dan keluaran, *hot* dan *cold* merupakan relasi dari aliran panas dan aliran dingin, *mix* merupakan relasi dari aliran pencampuran, *comp* merupakan relasi sebuah komponen atau proses.

Penentuan besar kerusakan eksergi E_d (kW) bertujuan untuk dapat mengetahui sumber ketidakefektifan suatu sistem kompleks yang dinyatakan pada persamaan 13.

$$E_d = T_0 x \sigma \quad (13)$$

dimana sigma σ merupakan entropi yang dihasilkan oleh irreversibilitas internal. Besarnya sigma σ dinyatakan pada persamaan 14.

$$\sigma = \dot{S} - \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (14)$$

di mana ΔT merupakan perbedaan temperatur yang terjadi pada suatu proses (K).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis State

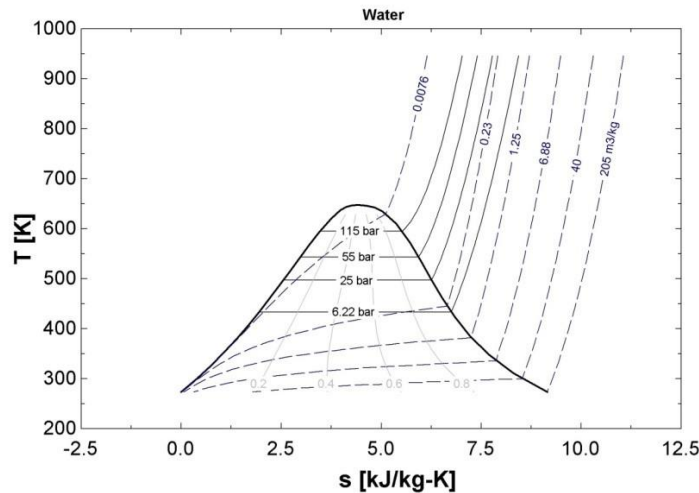
Analisis pada setiap state digunakan untuk menentukan properti pada tiap state. Total laju eksergi sistem diketahui sebesar 135.067 kW. Berikut ini data hasil yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisis State

State	Laju Energi (En), kW	Laju Entropi (\dot{S}), kW	Laju Eksergi (\dot{E}_{ph}), kW
1	451.8	1.462	20.18
2	1809	5.849	81.42
3	826.3	2.56	263.3
4	17673	54.44	5686
4a	63677	355.6	44908
4b	7338	84.53	2512
5	91362	204.3	71906
6	210.4	0.58	145.7
7	3844	10.6	2662

7a	3468	9.66	2406
7b	2680	7.396	1865
7c	4369	14.81	2594
7d	158.8	0.5216	16.3

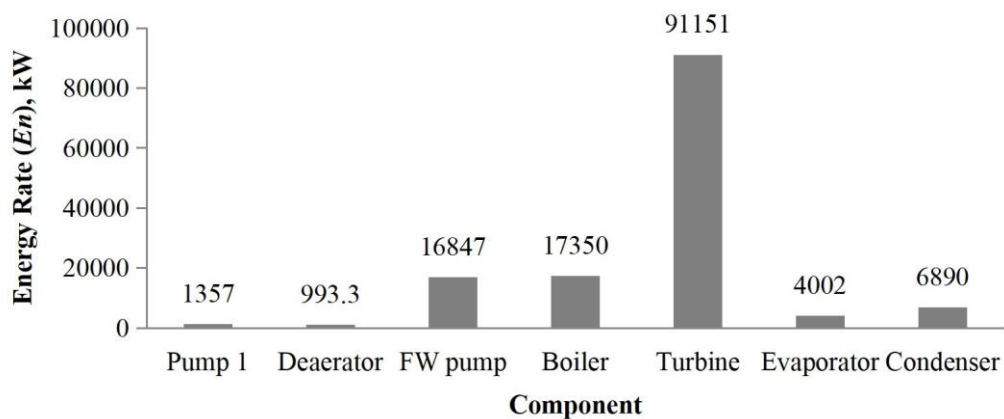
Diagram T-s menunjukkan hubungan antara temperatur dan entropi spesifiknya disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram T-s Dua Fase pada Sistem Tertutup

3.2 Analisis Laju Energi pada tiap Komponen

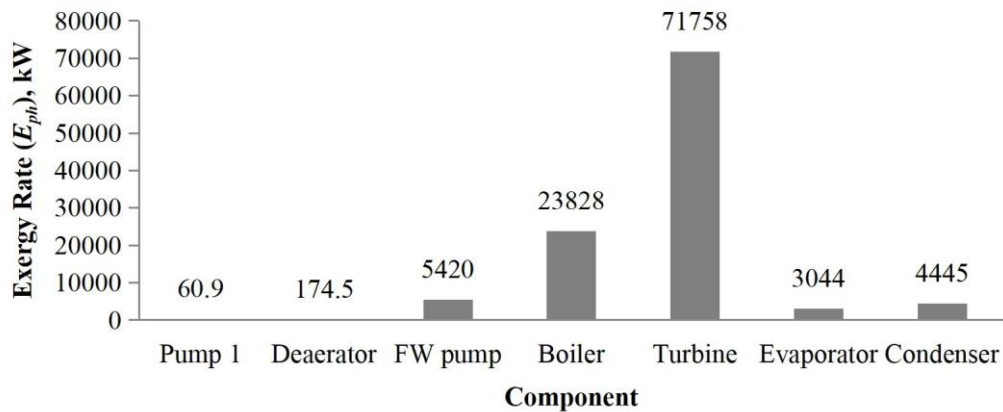
Gambaran laju energi pada tiap komponen ditampilkan pada Gambar 4, Laju energi terbesar terjadi pada komponen turbin dan ketel uap. Laju energi pada turbin sebesar 91151 kW. Laju energi ketel uap sebesar 17350 kW di mana bentuk energi berupa panas yang diserap ke dalam sistem (Q_{in}). Sementara itu, laju energi terkecil terdapat pada komponen turbin, deaerator, dan pompa 1. Laju energi deaerator sebesar 993.3 kW di mana bentuk energi berupa panas (Q_{in}). Laju energi pompa 1 sebesar 1357 kW di mana bentuk energi berupa kerja (W_{in}) yang dibutuhkan oleh sistem. Komponen yang membuang energi dalam bentuk panas (Q_{out}), yaitu bejana evaporator dan kondensor dengan laju energi masing-masing yaitu 4002 kW dan 6890 kW.



Gambar 4. Laju Energi Tiap Komponen

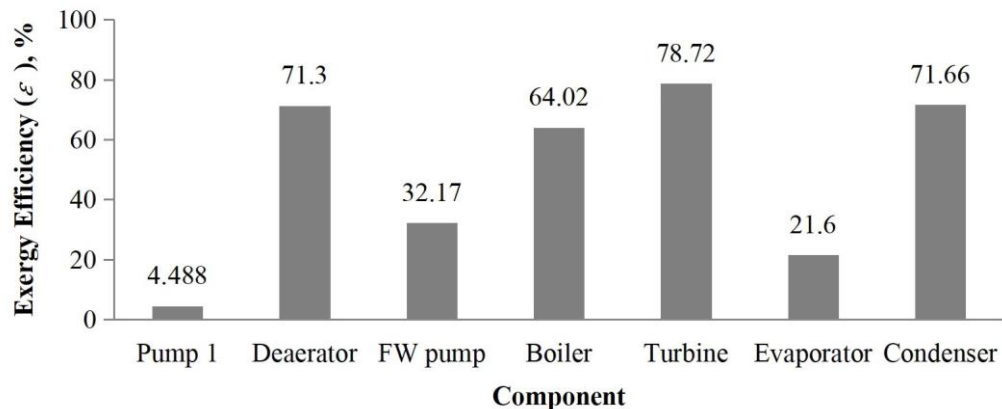
3.3 Analisis Laju Eksergi dan Efisiensi Eksergetik pada tiap Komponen

Berdasarkan Gambar 5, besarnya laju eksergi \dot{E}_{ph} tiap komponen, kualitas kinerja terbesar terdapat pada komponen turbin dan ketel uap dengan kualitas kinerja masing-masing yaitu 71.758 kW dan 13.828 kW. Kualitas kinerja terkecil terdapat pada komponen pompa 1 dan deaerator dengan kualitas kinerja masing-masing yaitu 60,9 kW dan 174,5 kW. Komponen lainnya seperti pompa FW, evaporator, dan kondensor masing-masing memiliki kualitas kinerja yaitu 5.420 kW, 3.044 kW, dan 4.445 kW.



Gambar 5. Grafik Laju Eksergi Tiap Komponen

Efisiensi eksergetik ε terjadi dalam berbagai bentuk tergantung pada prosesnya. Gambar 6 menunjukkan efisiensi eksergetik ε tiap komponen. Efisiensi eksergi tertinggi terjadi pada komponen turbin, kondensor, dan deaerator dengan efisiensi masing-masing yaitu 78,72%; 71,66%; dan 71,3%. Sementara itu, efisiensi proses terendah berlangsung pada komponen pompa 1 dan evaporator dengan efisiensi masing-masing yaitu 4,49% dan 21,6%. Komponen lainnya seperti pompa FW, dan ketel uap masing-masing memiliki efisiensi yaitu 32,17 dan 64,02

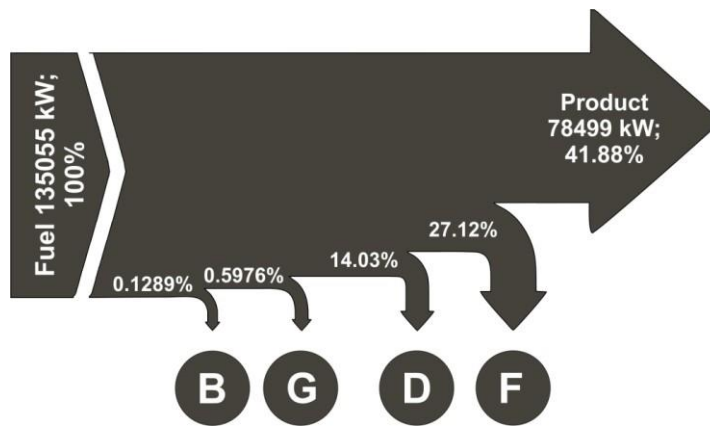


Gambar 6. Grafik Efisiensi Eksergetik Tiap Komponen

Ireversibilitas pada tiap komponen terjadi secara internal dan eksternal. Ireversibilitas internal pada sistem, sedangkan ireversibilitas eksternal terjadi di lingkungan. Hasil analisis tiap komponen menunjukkan bahwa efisiensi eksergetik ε tidak mungkin sebesar 100, artinya jika ada aliran masuk dalam suatu proses, maka akan dapat terjadi peningkatan atau penurunan aliran eksergi. Penurunan aliran eksergi disebabkan oleh ireversibilitas pada suatu proses atau komponen yang mengindikasikan ketidakidealan. Pada proses ini komponen yang mengalami penurunan aliran eksergi adalah deaerator, ketel uap, turbin, evaporator, dan kondensor. Sementara komponen yang mengalami peningkatan aliran eksergi, seperti pompa 1 dan pompa FW masih dapat mengalami ireversibilitas. Ireversibilitas yang terjadi pada komponen perpompaan atau komponen mekanik lainnya disebabkan oleh adanya faktor gesekan fluida. Ruang lingkup termodinamika tidak mampu menjelaskan ireversibilitas internal yang disebabkan oleh faktor gesekan.

3.4 Analisis Laju Kerusakan Eksergi Komponen

Berdasarkan Diagram Sankey (Gambar 7) total kerusakan pada sistem CHP sebesar 56.556 kW atau 41,88% dari total laju eksergi sistem. Diagram Sankey pada Gambar 7 menunjukkan letak kerugian paling signifikan terletak pada komponen evaporator dan ketel uap dengan ketidakidealan masing-masing yaitu 36.623 kW (27,12%) dan 18.951 kW (14,03%). Kemudian sisanya terdapat pada komponen deaerator dan kondensor dengan ketidakidealan masing-masing yaitu 174,1 kW (0,1289%) dan 807,1 kW (0,5976%).



Keterangan:

B = deaerator D = ketel uap F = evaporator G = kondensator

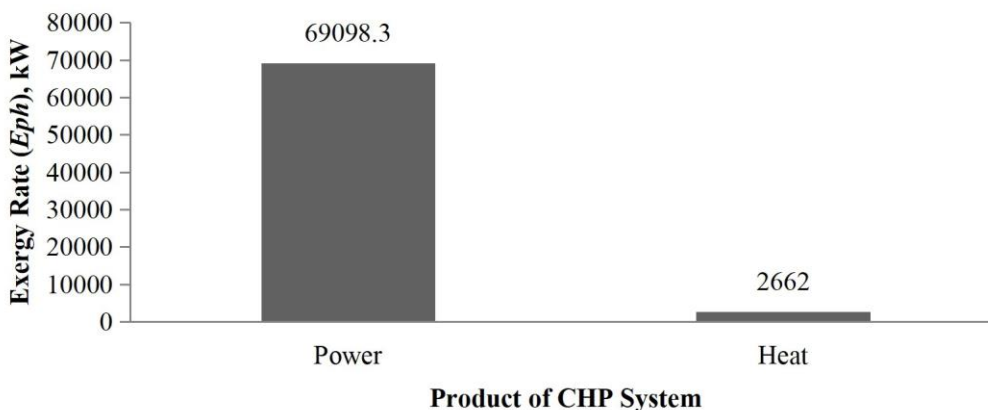
Gambar 7. Diagram Sankey Aliran Laju Kerusakan Eksergi

Kerusakan eksergi terjadi pada komponen penukar panas yang disebabkan adanya perpindahan panas spontan. Perpindahan panas spontan memungkinkan entropi ireversibilitas mengalir dari temperatur tinggi ke temperatur rendah. Sementara komponen mekanik seperti pompa tidak terjadi perbedaan temperatur ΔT atau dapat diinterpretasikan bahwa komponen mekanik mengalami proses isentropik. Jika tidak terdapat perbedaan temperatur ΔT , maka tidak akan ada entropi (dalam hal ini entropi oleh ireversibilitas internal σ) yang mengalir di dalamnya sehingga besarnya kerusakan eksergi E_d komponen yaitu nol.

Komponen turbin menunjukkan hal yang berbeda, di mana meskipun terdapat perbedaan temperatur dan proses ekspansinya secara spontan, tetapi tidak menunjukkan besarnya kerusakan eksergi E_d . Perbedaan temperatur dan proses ekspansi yang terjadi secara spontan pada turbin memungkinkan entropi oleh ireversibilitas internal σ dapat mengalir. Namun besarnya entropi oleh ireversibilitas internal σ sebesar nol, sehingga besarnya kerusakan eksergi E_d juga sebesar nol.

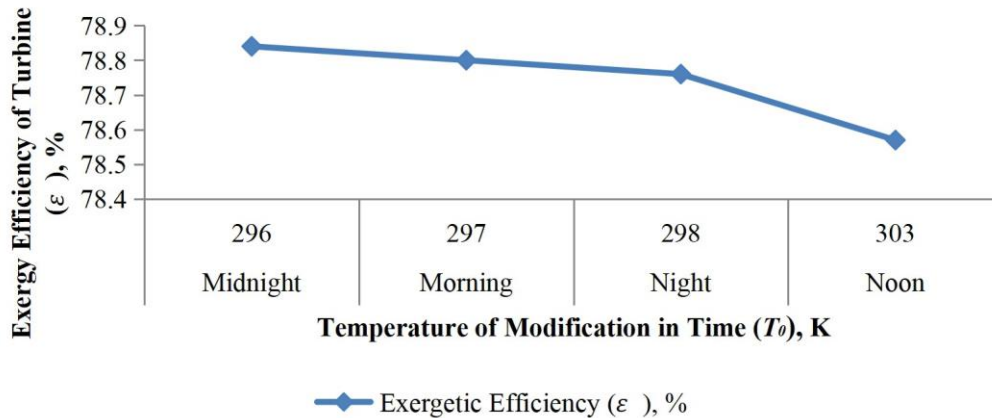
3.5 Evaluasi Kinerja Sistem CHP Berbasis Eksergi

Berdasarkan Gambar 9, diketahui laju eksergi dalam bentuk mekanik (*power*) atau kerja teoretis sebesar 69.098,3 kW dihasilkan oleh turbin. Laju eksergi dalam bentuk mekanik tersebut digunakan sebagai penggerak gilingan atau ditransmisikan ke generator untuk dikonversi menjadi energi listrik. Sementara laju eksergi dalam bentuk panas (*heat*) sebesar 2.662 kW terkandung dalam uap bekas (*exhaust steam*) yang digunakan pada evaporator proses evaporasi nira.

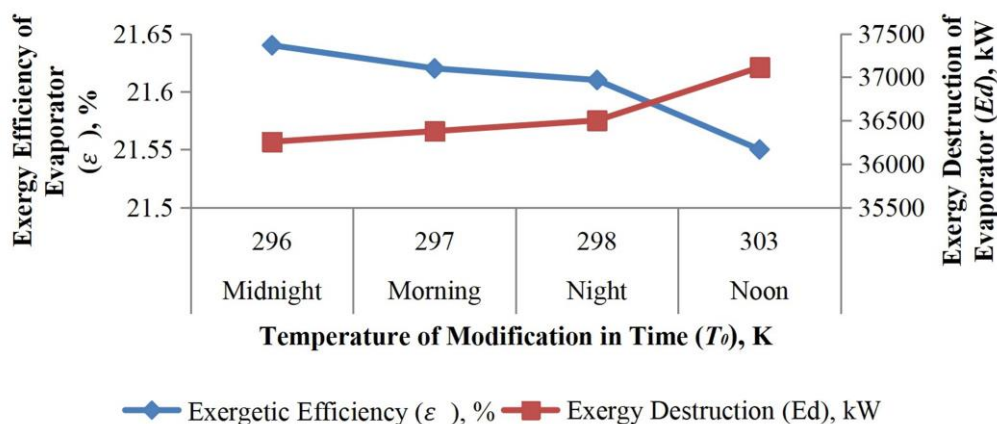


Gambar 9. Grafik Laju Eksergi Produk dari Sistem CHP

Evaluasi kinerja terhadap dua komponen sistem CHP digambarkan dalam diagram garis Gambar 10 dan 11. Sistem CHP memiliki temperatur yaitu 299 K. Sistem CHP dengan temperatur 299 K memiliki keadaan yang cenderung mendekati titik impas di mana terjadi kesetimbangan antara besarnya efisiensi eksergetik ϵ dan kerusakan eksergi E_d . Kondisi ini menunjukkan bahwa besarnya kerugian yang dinyatakan sebagai kerusakan eksergi E_d masih pada batas toleransi atau tidak melebihi titik impas (cenderung pada keadaan non-optimum). Oleh karena itu, perlu adanya peningkatan kualitas kinerja guna mengoptimalkan keadaan sistem CHP.



Gambar 10. Grafik Evaluasi Kinerja Komponen Turbin



Gambar 11. Grafik Evaluasi Kinerja Komponen Evaporator

4. KESIMPULAN

Sistem CHP di PG Pesantren Baru dapat menghasilkan dua bentuk energi yaitu bentuk energi mekanik (*power*) sebesar 69.098,3 kW dan panas (*heat*) sebesar 2.662 kW. Kinerja sistem CHP di PG Pesantren Baru cenderung belum optimal. Kesetimbangan antara besarnya kerusakan eksergi (*exergy destruction*) dan efisiensi eksergetik sistem dapat mempengaruhi kinerja komponen.

Sementara faktor penyebab ketidakidealan suatu sistem dinyatakan dengan ireversibilitas (ketidakmampuan balik). Terdapat dua jenis ireversibilitas yaitu ireversibilitas internal dan eksternal. Kerusakan eksergi merujuk pada ireversibilitas internal dan dipengaruhi oleh adanya aliran entropi ireversibilitas internal yang timbul dari proses perpindahan panas spontan. Perpindahan panas spontan memungkinkan kerusakan eksergi hanya terjadi pada komponen penukar panas atau komponen yang melibatkan adanya perbedaan temperatur pada prosesnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Agung, A. dan Waris S. 2003. "Analisis Cost-effectiveness Sistem Pembangkit Uap pada Pabrik Gula Menggunakan Metode Exergi (Studi Kasus pada Pabrik Gula Madukismo)". Dalam Jurnal Forum Teknik Jilid 27, No.1. Hal. 2.
- [2] Agustin, A. 2018. Perawatan Unit Evaporator Stasiun Penguapan PTPN X Pabrik Gula Pesantren Baru. Laporan Praktek Kerja Lapangan. Program Studi Teknik Energi Terbarukan Jurusan Teknik Politeknik Negeri Jember. Jember. (Belum Dipublikasi).
- [3] Cengel, A.Y. and Boles, A.M. 2005. Thermodynamics an Engineering Approach. 5th ed. Portland, Or: Book News, Inc.
- [4] Gundersen, T. 2009. "The Introduction to The Concept of Exergy and Energy Quality". In Journal of Department of Engineering Norwegian University of Science and Technology Trondheim 3. P. 2 - 8.
- [5] Illah, I.A. 2016. Analisis Eksergi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Siklus Uap Hasil Pemisahan (Separated Steam Cycle) di PT Indonesia Power UPJP Kamojang. Skripsi. Program Studi Teknik Energi Terbarukan Jurusan Teknik Politeknik Negeri Jember. Jember.
- [6] International Institute of Refrigeration. 2017. "Cogeneration/ Trigeneration". In Informatory Note on

- Refrigeration Technologies. Edition No. 33. Januari 2017. Paris, France: IIR Informatory Note. P. 2-3.
- [7] Ismawati, A.S. 2012. Analisis Eksergi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Siklus Biner dengan Regenerative Organic Rankine Cycle (RORC). Depok. Skripsi. Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik.
- [8] Kulshrestha, S.K. 1989. Termodinamika Terpakai, Teknik Uap dan Panas. Cetakan ke-1. Jakarta: UI-Press.
- [9] Kurniawan, Y. dan H. Santoso. 2009. "Listrik sebagai Ko-produk Potensial Pabrik Gula – Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia". Dalam Jurnal Litbang Pertanian, 28 (1). Hal. 24-27.
- [10] Kusdyanto, A. 2016. "Ampas Tebu, Bisnis Tumpuan Masa Depan Industri Gula". Dalam Buletin Energi Terbarukan Global Energi, 57. Hal. 54-57.
- [11] Laurensia, R. 2016. Analisis Hukum Kedua Termodinamika pada Boiler Omnical dengan Variasi Bahan Bakar di PT Indo Achidatama Tbk. Skripsi. Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- [12] Moran, M.J. dan H.N. Shapiro. 2004. Termodinamika Teknik. (Penyandur Y.L. Nugroho). Edisi ke-4. Jakarta: Erlangga.
- [13] Raharja, S. 2012. "Pengolahan, Analisis, dan Penyajian Hasil Penelitian". Dalam Materi Ajar Universitas Negeri Yogyakarta. 16 Februari 2012. Yogyakarta. Hal. 1-2.
- [14] Rifai, F.R. 2015. Studi Potensi Energi Terbarukan dari Sistem Kogenerasi di Pabrik Gula Stusi Kasus di Pabrik Gula Gempolkrep PT Perkebunan Nusantara X (Persero). Tesis. Program Pascasarjana Jurusan Teknik Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- [15] Rizqi, M. dan W.W. Purwanto. 2017. "Analisis Tekno Ekonomi Aplikasi Sistem Combined Cooling Heating and Power (CCHP) Berbasis Bahan Bakar Gas pada Bangunan Hotel". Dalam Jurnal Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Hal. 3-4.
- [16] Rudiyanto, B. et al. 2017. "Energy and Exergy Analysis of Steam Power Plant in Paiton, Indonesia". In Journal. P. 9. (Belum Dipublikasi).
- [17] Setyawan, D.A. 2013. "Metodologi Penelitian, Data dan Metode Pengumpulan Data Penelitian". Dalam Materi Ajar Poltekes Kemenkes Surakarta. Surakarta. Hal. 2-16. [18] Suryana. 2010. Metodologi Penelitian, Model Praktis Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif. Dalam Materi Ajar Universitas Pendidikan Indonesia. Bandung. Hal. 18-40. [19] Sustainable Energy Authority of Ireland. 2017. "My Energy Audit, Energy Sankeys". In Literature of Teaching Sustainability. Ireland. H-12.
- [18] Syaumi, F. 2018. Statistika Deskriptif: Pengertian Tabulasi, Diagram, dan Grafik. www.weare.id. Diakses: 25 Juni 2018.