

EVALUASI PERFORMANSI MESIN BENSIN SIKLUS EMPAT LANGKAH DENGAN MENGGUNAKAN ANALISIS ENERGI DAN EKSERGI

PERFORMANCE EVALUATION OF FOUR-STROKE CYCLE GASOLINE ENGINE BY USING ENERGY AND EXERGY ANALYSIS

Dyos Santoso¹, Bertu Natana²

*Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Jalan Raya Palembang-
Prabumulih, Inderalaya, Indonesia
dyos_santoso@yahoo.com*

ABSTRAK

Makalah ini menyajikan analisis energi dan eksergi yang diterapkan untuk mengevaluasi performansi mesin bensin siklus empat langkah berpendinginan udara. Tujuan utama kajian ini adalah untuk menganalisa sistem tersebut dan mengidentifikasi dan menentukan besarnya efisiensi energetik dan eksergetik pada berbagai kecepatan mesin. Studi telah dilakukan pada mesin uji skala laboratorium dengan putaran mesin yang bervariasi antara 800-3300 rpm. Hasil pengujian baik berdasarkan analisis energi maupun analisis eksergi mengindikasikan bahwa kerugian energi dan eksergi meningkat dengan meningkatnya kecepatan mesin. Sementara itu, efisiensi energetik dan eksergetik pertama-tama meningkat dengan meningkatnya kecepatan mesin, mencapai nilai maksimum dan akhirnya menurun. Efisiensi energetik maksimum sekitar 22,77%, sedangkan efisiensi eksergetik maksimum sekitar 21,89%, dan keduanya diperoleh pada putaran 2039 rpm.

Kata kunci: analisis energi, analisis eksergi, motor bensin siklus empat langkah.

ABSTRACT

This paper present the energy and exergy analysis is applied in evaluating the performance of air cooled four-stroke cycle gasoline engine. The primary objectives of this study are to analyze the system and to identify and quantify the maximum energetic and exergetic efficiency at different engine speed. The study was carried out on laboratory scale test gasoline engine with a range of engine speed variation between 800-3300 rpm. The result of the test both for energy analysis and exergy analysis indicate that the energy losses and the exergy losses increase with increase in the engine speed. While the energetic and exergetic efficiency first increase with increase in the engine speed, reaches a maximum value and finally decreases. The maximum energetic efficiency of about 22.77%, and the maximum exergetic efficiency of about 21.89% both occurred at the engine speed 2039 rpm.

Keywords: energetic efficiency, exergetic efficiency, four-stroke cycle gasoline engine.

1. PENDAHULUAN

Energi adalah salah satu masukan penting untuk pembangunan sosial ekonomi di negara manapun, seiring pertambahan jumlah penduduk, pertumbuhan perekonomian, perkembangan dunia industri, kemajuan teknologi dan meningkatnya

standar kenyamanan hidup di masyarakat, permintaan terhadap kualitas energi yang lebih baik pun semakin meningkat. Semakin tingginya tingkat permintaan masyarakat terhadap kualitas energi yang lebih baik di Negara Indonesia, membuat beberapa pabrikan kendaraan bermotor berlomba-lomba untuk mendesain dan memproduksi kendaraan terbaik yang dapat mereka keluarkan. Ribuan bahkan jutaan kendaraan bermotor selalu keluar setiap tahunnya untuk memenuhi kebutuhan pasar. Bahan bakar sebagai salah satu sumber energi, memainkan peranan yang sangat penting dalam pertumbuhan sektor industri dan transportasi. Keberlangsungan berbagai macam bentuk aktivitas dan mobilisasi di masyarakat dan sektor industri nasional, sangat tergantung kepada ketersediaan bahan bakar. Eksploitasi besar-besaran terhadap berbagai sumber energi, perkembangan jumlah kendaraan bermotor dalam berbagai jenis bentuk dan kegunaan, serta kurangnya kepedulian masyarakat dalam pengoptimalan kinerja dari kendaraan mereka menyebabkan krisis energi di Negara kita kian terasa. Dengan demikian perlu dilakukannya peningkatan kualitas agar energi yang tersedia benar-benar dapat dimanfaatkan secara optimal.

Metode mengenai analisis sistem termal tradisional didasarkan pada hukum pertama termodinamika. Metode ini menggunakan neraca energi pada sistem untuk menghitung perpindahan kalor yang terjadi antara sistem dan lingkungan. Hukum pertama termodinamika memberikan sebuah konsep konservasi energi, yang menyatakan bahwa energi yang memasuki sistem termal dengan bahan bakar, elektrisitas, aliran materi, dan sebagainya adalah kekal dan tidak dapat dimusnahkan. Secara umum, neraca energi tidak memberikan informasi mengenai kualitas atau nilai energi yang melintasi batas sistem termal dan tidak ada informasi tentang kerugian internal. Sebaliknya, hukum kedua termodinamika memberikan konsep eksergi dalam analisis sistem termal. Eksergi adalah ukuran kualitas atau tingkatan energi dan dapat dimusnahkan di dalam sebuah sistem termal. Hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa bagian dari eksergi yang memasuki sistem termal dengan bahan bakar, listrik, aliran materi, dan sebagainya dapat dimusnahkan di dalam sebuah sistem dikarenakan ireversibilitas. Hukum kedua termodinamika menggunakan keseimbangan eksergi untuk analisis dan desain pada sebuah sistem termal [1]. Penilaian energi harus berdasarkan kualitas dan kuantitas. Oleh karena itu, kombinasi dari analisis energi dan analisis eksergi memberikan pemahaman yang lebih baik terhadap operasi siklus dengan berbagai komponen sistem dan komponen-komponen yang memerlukan modifikasi desain dan operasional untuk meminimasi kerugian-kerugian [2].

Baru-baru ini, analisis eksergi ini telah diterapkan pada beberapa sistem pembangkit tenaga di Indonesia, yaitu pada Siklus Turbin Gas Sederhana 14 MW [3], pada Siklus Gabungan Pembangkit Tenaga Gas Uap [4], dan pada Sistem Pembangkit listrik tenaga panas bumi [5].

Tujuan utama dari studi ini adalah untuk menganalisis performansi mesin bensin siklus empat langkah dan mengidentifikasi serta menentukan besarnya efisiensi energetik dan eksergetik pada berbagai kecepatan mesin. Sebagai tambahan, efek dari berbagai keadaan lingkungan biasanya juga disajikan pada analisis ini.

Energi merupakan kapasitas sistem untuk melakukan kerja dan juga merupakan konsep dasar dalam termodinamika dan salah satu dari aspek yang paling berarti dari analisis teknik. Dalam buku "*Thermodynamics An Engineering Approach*" [6] memberikan penjelasan tentang pembagian bentuk energi yang dibaginya menjadi dua kelompok besar, yaitu : makroskopik dan mikroskopik. Bentuk energi makroskopik adalah energi yang menguasai sistem secara keseluruhan, seperti energi potensi dan kinetik. Bentuk energi mikroskopik adalah energi yang dihubungkan dengan struktur molekular dari suatu sistem dan tingkat derajat aktifitas molekular. Penjumlahan dari semua bentuk energi yang mikroskopik disebut energi dalam sistem dan ditandai dengan U.

Dalam analisis, setiap proses dianggap dalam keadaan stedi dan aliran stedi. Dimana energi kinetik dan energi potensial diabaikan. Untuk gas ideal, formulasi yang digunakan memperhitungkan variasi entalpi dan entropi absolut terhadap temperatur untuk berbagai substansi dan kondisi lingkungan. Analisis energi ini didasarkan pada Hukum Pertama Termodinamika yang prinsipnya yaitu energi yang masuk sistem sama dengan energi yang keluar sistem. Analisis energi ini tidak dapat mengetahui informasi yang berhubungan dengan degradasi energi, analisis ini tidak dapat menunjukkan penyebab serta komponen mana dari sistem yang paling banyak kerugiannya ataupun yang paling efisien.

Untuk proses aliran stedi keadaan stedi, neraca laju energi volume atur pada sistem terbuka dapat ditulis sebagai:

$$\dot{Q}_{c.v} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + g \cdot z_i \right) = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g \cdot z_e \right) + \dot{W}_{c.v} \quad (1)$$

Sedangkan, neraca laju energi pada sistem tertutup dapat ditulis sebagai :

$$(U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) = Q - W \quad (2)$$

Hukum kedua termodinamika menjelaskan bahwa setiap proses akan berlangsung secara spontan ke arah keseimbangan dengan lingkungannya. Eksergi sebagai kerja maksimal (berguna) yang dapat dihasilkan oleh sistem bila sistem tersebut berinteraksi dengan suatu lingkungan referensi tertentu. Lingkungan referensi yang dimaksudkan di sini biasanya adalah lingkungan luar (atmosfir) yang mempunyai suhu T_0 dan tekanan konstan P_0 , untuk sistem terbuka (*control volume*) [7].

Kotas [8] menyatakan bahwa eksergi suatu arus/aliran (*stream*) stedi dari suatu zat adalah sama dengan jumlah kerja maksimum yang dapat diperoleh bila arus tersebut dibawa dari keadaan awalnya ke keadaan mati (*dead state*) melalui suatu proses yang mana arus tersebut hanya berinteraksi dengan lingkungan. Jadi eksergi suatu arus adalah sifat dari keadaan arus tersebut dan keadaan lingkungan tersebut. Sekalipun suatu sistem berada dalam kesetimbangan dengan lingkungannya, maka sistem tersebut tidak mungkin lagi untuk menggunakan energi dalam sistem tersebut untuk menghasilkan kerja. Pada kondisi ini, eksergi dari suatu sistem telah dimusnahkan sepenuhnya.

Analisis Energi berdasarkan pada Hukum Pertama Termodinamika yang prinsipnya yaitu energi yang masuk sistem sama dengan energi yang keluar sistem. Analisis energi tidak dapat mengetahui informasi yang berhubungan dengan degradasi energi, analisis ini tidak dapat menunjukkan penyebab serta komponen mana dari sistem yang paling banyak kerugiannya ataupun yang paling efisien, selain itu analisis energi tidak dipengaruhi kondisi lingkungan.

Eksergi didefinisikan sebagai kerja atau kemampuan untuk menimbulkan kerja dan selalu bersifat kekal dalam proses reversibel namun selalu berkurang dalam suatu proses irreversibel (memenuhi Hukum Kedua Termodinamika). Hukum Kedua Termodinamika menyatakan bahwa pengkonversian energi hanya dimungkinkan jika total entropi bertambah. Dengan mengajukan eksergi, energi dan entropi dapat dikaji secara simultan. Kualitas energi digambarkan dengan konsep entropi. Entropi tinggi berarti kualitas energi adalah rendah. Bentuk-bentuk energi yang berbeda mempunyai kualitas yang berbeda yang mengindikasikan seberapa besar energi tersebut secara teoritis dapat dikonversikan menjadi kerja. Batasan ini adalah suatu hukum alam yang mengimplikasikan bahwa kualitas energi selalu berkurang dalam setiap pengkonversian (Hukum Kedua Termodinamika) [9].

Dalam termodinamika, sistem adalah segala sesuatu yang ingin kita kaji untuk dijadikan objek analisis. Saat sistem berubah dari keadaan awal ke keadaan seimbang (keadaan akhir), sistem tersebut dapat menyerap atau melepas energi ke lingkungannya [7]. Keadaan seimbang adalah keadaan dimana tidak terjadi lagi perubahan dalam sistem, atau antara sistem dengan lingkungannya. Pada keadaan setimbang suhu dan tekanan adalah seragam di seluruh sistem dan tidak ada lagi gaya-gaya tak seimbang yang bekerja [10].

Disaat sistem berubah menuju lingkungan maka kerja yang dihasilkan terus berkurang hingga didapati keadaan setimbang antara sistem dan lingkungan. Keadaan seperti inilah yang disebut Keadaan Mati (*dead state*). Pada keadaan mati, masing masing sistem dan lingkungan memiliki energi tetapi nilai ekserginya nol [9].

Dengan tidak adanya efek-efek nuklir, magnetik, elektrik, tegangan permukaan, eksergi total dari suatu sistem dapat dibagi menjadi empat komponen: eksergi fisik E^{PH} , eksergi kinetik E^{KN} , eksergi potensial E^{PT} , dan eksergi kimia E^{CH} [8]:

$$E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH} \quad (3)$$

Persamaan (3) dapat dinyatakan dengan basis unit massa :

$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH} \quad (4)$$

dimana : $e = \frac{E}{m}$

Eksergi kinetik dan eksergi potensial adalah sebagai berikut :

$$e^{KN} = \frac{1}{2} V^2 \quad (5)$$

$$e^{PT} = g \cdot z \quad (6)$$

Dimana V menunjukkan kecepatan relatif aliran fluida pada permukaan bumi dan z adalah ketinggian aliran di atas permukaan laut.

Dengan mensubstitusikan persamaan (5) dan (6), persamaan (4) dapat ditulis menjadi :

$$e = e^{PH} + \frac{1}{2}V^2 + g \cdot z + e^{CH} \quad (7)$$

Komponen eksergi fisik yang menyertai arus/aliran suatu zat adalah:

$$e^{PH} = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (8)$$

Eksergi fisik untuk gas ideal [8]:

$$\dot{E}^{PH} = C_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + \bar{R} T_0 \ln \frac{p}{p_0} \quad (9)$$

Jika komponen berada pada kondisi lingkungan, maka eksergi kimia untuk bahan bakar cair dapat ditulis dengan persamaan:

$$(\bar{e}_{ch})_i = \bar{R} T_0 \ln \frac{y_i}{y_i^e} \quad (10)$$

Proses pembakaran menggunakan bahan bakar cair dengan menggunakan *hydrocarbon*, untuk menghitung nilai eksergi *hydrocarbon* dapat diperoleh dari:

$$e_{C_aH_b} = \left(\bar{g}_{C_aH_b} + \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{g}_{O_2} - \bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O(g)} \right) + \bar{R} T_0 \ln \left[\frac{(y_{O_2}^e)^{(a+\frac{b}{4})}}{(y_{CO_2}^e)^a (y_{H_2O}^e)^{b/2}} \right] \quad (11)$$

Lain halnya dengan energi, eksergi tidaklah kekal tapi dapat dimusnahkan. Nama lain pemusnahan eksergi adalah irreversibilitas (*irreversibility*). Irreversibilitas akibat gesekan, pencampuran, reaksi kimia, dan sebagainya selalu memusnahkan eksergi [8]. Pemusnahan eksergi itu berbanding lurus dengan pembentukan entropi. Pemusnahan eksergi disimbolkan dengan \dot{I} (*irreversibility*), pada beberapa literatur lain pemusnahan eksergi disimbolkan dengan \dot{E}_D (*exergy destruction*).

$$\dot{I} = T_0 \cdot S_{gen} \geq 0 \quad (12)$$

2. METODOLOGI

Dalam penelitian ini, analisis energi dan eksergi diterapkan pada data eksperimen dari suatu operasi mesin pembakaran dalam (motor bakar torak berbahan bakar bensin). Data dikumpulkan dengan menggunakan unit uji mesin yang memungkinkan pengukuran akurat dari laju aliran bahan bakar, laju aliran pembakaran udara, beban mesin, putaran mesin dan semua suhu yang relevan. Efisiensi energetik dan eksergetik dihitung untuk putaran mesin yang berbeda dan nantinya diperbandingkan.

Dengan memasukkan parameter-parameter operasi yang sesungguhnya, evaluasi menggunakan neraca energi dan eksergi terhadap performansi sistem dilakukan. Lingkungan referensi ditetapkan sebagai kondisi standar.

Pembahasan ini dibatasi dengan analisis secara eksergi fisika (*physical exergy*) dimana proses yang dianalisis berdasarkan skala laboratorium dengan mempertimbangkan kondisi masuk dan keluar komponen kerja. Proses analisis ini mencakup pengukuran akurat fluida kerja dari bahan bakar, laju aliran massa udara, laju aliran massa air pendinginan dari kalorimeter, beban mesin, putaran mesin, torsi, temperatur gas buang dari mesin, dan temperatur inlet dan outlet dari kalorimeter. Dalam penelitian ini, analisis proses hanya memperhitungkan energi fisik, energi bahan bakar, eksergi fisik, dan eksergi bahan bakar dari mesin uji.

Alat-alat utama yang digunakan dalam pengujian ini adalah:

- Motor Bakar Torak
 - Merk : Honda GX160-QX2
 - Jenis Mesin : Air cooled 4 stroke OHV
 - Diameter Silinder : 68 mm
 - Panjang Langkah Torak : 45 mm
 - Jumlah Silinder : 1
 - Volume Langkah : 160 cc
 - Perbandingan Kompresi : 8.5:1
 - Putaran Maksimum : 3600 rpm
 - Daya Maksimum : 5.5 Hp / 3.6 kW
- Dinamometer
 - Merk : Xiangyi Power
 - Type : 4D ACS AC Dynamometer
 - Daya Maksimum : 3.8 Hp
 - Kecepatan Maksimum : 4000 rpm
- Kalorimeter Bom
 - Merk : Sri Rudran Instrument
 - Nilai Kalori Maksimum : 1000 – 26000 Kkal/m³
 - Bahan : Baja Tahan Karat

Asumsi umum yang digunakan dalam perhitungan analisis eksergi pada instalasi pembangkit ini adalah :

- Setiap komponen/ sub sistem diasumsikan pada keadaan stedi.
- Kondisi referensi yang digunakan adalah pada temperatur lingkungan.
- Komponen/sistem diasumsikan beroperasi tanpa memperhitungkan kerugian kalor.
- Eksergi kinetik dan eksergi potensial diabaikan.
- Sistem dan kontrol pada keadaan *steady-state* volume kontrol.

Data-data yang ada disusun dan kemudian diolah menggunakan lembar kerja program *microsoft excel* untuk menghitung eksergi spesifik, laju aliran eksergi, irreversibilitas, efisiensi energi dan efisiensi eksergi. Dalam perhitungan ini satuan internasional (SI) digunakan untuk semua satuan hasil perhitungan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

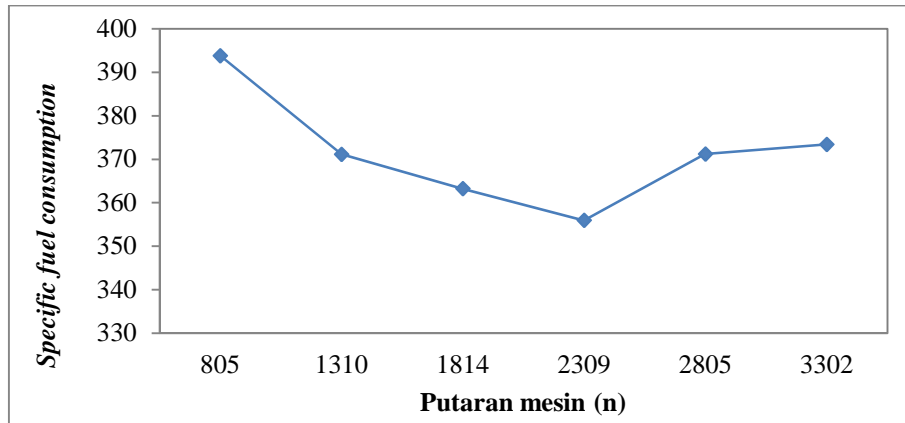
Hasil pengujian yang telah dilakukan pada kondisi lingkungan, $T_o = 298,15 K$ dan $P_o = 1.0139 bar$, dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 1. Data hasil pengujian.

n (rpm)	L (N)	T (Nm)	m _f (g/sec)	m _a (l/min)	m _w (kg/hr)	T _{e1} (°C)	T _{e2} (°C)	T _{e3} (°C)	T _{s2} (°C)	T _{s1} (°C)	T _{engine} (°C)	T _s (°C)
805	376	106	0.977	594	413	436	225	34	32	25	84	26
1310	443	126	2.021	1354	783	494	308	46	41	25	84	26
1814	417	119	2.269	1853	806	568	417	52	52	25	84	26
2309	392	113	2.767	2487	789	650	522	56	60	25	84	26
2805	386	110	3.33	3651	717	678	533	69	68	25	84	26
3302	373	106	3.812	2293	574	703	586	82	81	25	84	26

Tabel 2. Hasil analisis energi.

Putaran Mesin (rpm)	Energi Bahan Bakar (kW)	Daya Efektif (kW)	Kalor Gas Buang (kW)	Total Kalor Hilang (kW)
805	43.41	8.93	6.49	27.99
1310	79.13	17.28	22.79	39.07
1814	100.86	22.50	33.54	44.82
2309	119.96	27.31	38.99	53.66
2805	147.95	32.29	45.83	69.82
3302	168.83	36.63	45.87	86.33



Gambar 1. Konsumsi Bahan Bakar versus Putaran Mesin.

Dari tabel 2 terlihat besarnya energi pada setiap putaran mesin, jika dilihat dari kerja yang dihasilkan (36.63 kW) kita akan mengasumsikan bahwa putaran mesin pada 3302 rpm merupakan putaran yang paling baik, tetapi jika kita melihat melalui konsumsi bahan bakar yang dipakai pada tiap putaran (gambar 1), kita dapat menyimpulkan bahwa putaran mesin pada 2309 rpm merupakan putaran terbaik berdasarkan analisis energi dengan nilai *specific fuel consumption* sebesar 356 gr/kWh.

Tabel A-25 dalam buku Moran [11] menyajikan daftar jumlah energi Gibbs pada tiap unsur yang dibutuhkan, dari fluida pada keadaan dimana temperatur adalah T_o dan tekanan adalah P_o (*dead state*). Dengan menggunakan persamaan analisis eksergi, maka kita dapat menghitung Eksergi bahan bakar (\dot{E}_f), Eksergi kerja (N_e), Exhaust eksergi (\dot{E}_e), Heat loss eksergi (\dot{E}_Q), Eksergi yang dimusnahkan (\dot{E}_d).

Dari hasil perhitungan analisis energi dan eksergi pada motor torak berbahan bakar bensin, dapat dilihat perbandingan hasil perhitungan yang terdapat antara kedua jenis metode tersebut.

Tabel 3. Eksergi fisik tiap-tiap putaran mesin.

n (rpm)	\dot{E}_f (kW)	N_e (kW)	\dot{E}_e (kW)	\dot{E}_Q (kW)	\dot{E}_d (kW)
805	51.01	8.93	1.57	4.00	36.51
1310	92.98	17.28	4.42	3.98	67.30
1814	118.51	22.50	7.63	3.17	85.21
2309	140.96	27.31	12.72	3.50	97.42
2805	173.85	32.29	14.53	5.53	121.49
3302	198.38	36.63	13.90	7.96	139.89

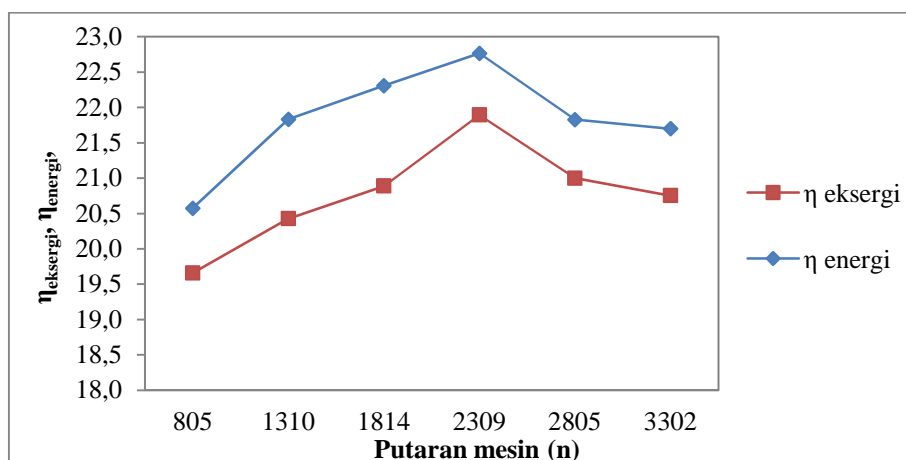
Tabel 4. Efisiensi energi dan eksergi pada mesin kerja.

Putaran Mesin (rpm)	η_{energi} (%)	η_{eksergi} (%)	Ed (%)
805	20.57	19.66	71.57
1310	21.83	20.43	72.38
1814	22.31	20.89	71.90
2309	22.77	21.89	69.11
2805	21.83	21.00	69.88
3302	21.70	20.75	70.52

Dari tabel 4 dapat disimpulkan bahwa putaran mesin pada 2309 rpm juga merupakan putaran yang mempunyai efisiensi eksergi terbaik (21.89%), ini dikarenakan rasio pemusnahan eksergi atau ireversibilitas berkurang dengan bertambahnya rasio laju aliran massa udara dan laju aliran massa bahan bakar. Putaran mesin 1310 rpm memiliki persentase ireversibilitas paling tinggi (72.38%), sementara 805 memiliki rasio laju aliran massa udara dengan bahan bakar serta efisiensi eksergi (19.66%) yang paling kecil, sehingga kita dapat menyimpulkan putaran ini merupakan putaran yang terburuk.

Pembakaran merupakan sumber utama dari pemusnahan eksergi (ireversibilitas), sejalan dengan penambahan putaran mesin, maka temperatur fluida kerja pun akan meningkat. Dengan meningkatnya temperatur fluida kerja menyebabkan terjadinya pembangkitan entropi pada fluida kerja. Sumber lain ireversibilitas antara lain gesekan dan juga perpindahan kalor.

Dari gambar 2 dapat kita lihat efisiensi energi memiliki nilai yang lebih besar daripada efisiensi eksergi, seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya bahwa perhitungan energi, nilai hasil perhitungan tidak dibatasi oleh kondisi lingkungan (*dead state*). Berbeda dengan perhitungan menggunakan metode analisis eksergi, besarnya kualitas dari energi tersebut dapat teridentifikasi dengan jelas, berapa besarnya energi yang masuk dan besarnya energi yang dapat dimanfaatkan secara maksimum didalam sistem tersebut, dengan kondisi lingkungan sebagai referensi batasan antara sistem dengan lingkungan. Dengan menggunakan metode analisis eksergi juga dapat mengidentifikasi secara akurat putaran mana yang paling besar mengalami iriversibilitas.



Gambar 2. Diagram efisiensi eksergi dan energi pada tiap putaran yang ditentukan.

4. KESIMPULAN

Perpaduan perhitungan analisis energi dan eksergi telah dilakukan sebagai metode yang digunakan untuk mengukur performansi dari motor bakar torak berbahan bakar bensin. Pengujian dilakukan dengan menggunakan berbagai variasi kecepatan mesin. Dengan menggunakan metode analisis eksergi dapat ditentukan besarnya kualitas energi yang dimanfaatkan secara maksimum pada sistem tersebut dan besarnya laju pemusnahan eksergi serta putaran optimum untuk menghasilkan efisiensi terbaik.

Dari hasil analisis dan pembahasan pada bab sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan bahwa mesin mengalami pemusnahan eksergi (*irreversibilitas*) terbesar terjadi pada kecepatan mesin 1310 rpm dengan persentase eksergi yang dimusnahkan sebesar 72,38%, sedangkan kecepatan mesin 2309 rpm merupakan kecepatan mesin terbaik dengan persentase eksergi yang dimusnahkan sebesar 69,11% dan efisiensi eksergetik sebesar 21,89%. Sementara itu kecepatan mesin pada 2309 rpm juga merupakan kecepatan mesin yang memiliki efisiensi energetik terbaik dengan nilai 22,77%, sedangkan kecepatan mesin 805 rpm merupakan performansi terburuk dengan nilai efisiensi energetik 20,57% dan efisiensi eksergetik 19,66%

Pembakaran merupakan sumber utama pemusnahan eksergi, sumber lain ireversibilitas antara lain gesekan dan juga perpindahan kalor. Selain itu prosentase pemusnahan eksergi atau ireversibilitas bertambah dengan berkurangnya rasio laju aliran massa udara dan laju aliran massa bahan bakar (AFR), juga sebaliknya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sachdevaa, K.B., Karuna., 2012. *Performance Optimization of Steam Power Plant through Energy and Exergy Analysis*: International Journal of Current Engineering and Technology, ISSN 2277 – 4106.
- [2] Pandev, M., Gogoi, T.K., 2013. *Energy And Exergy Analysis Of A Reheat Regenerative Vapor Power Cycle*: International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 3, Special Issue 3: ICERTSD 2013, Feb 2013, pages 427-434
- [3] Basri, Hasan., Santoso, Dyos., 2010. *Analisis Eksergi pada Siklus Turbin Gas Sederhana 14 MW Instalasi Pembangkit Tenaga Keramasan*. Palembang : Jurnal Teknik Mesin Indonesia
- [4] Santoso, Dyos., Basri, Hasan., 2011. *Analisis Eksergi Siklus Kombinasi Turbin Gas-Uap Unit PLTGU*: Prosiding Seminar Nasional AvoER ke-3, Palembang, 26-27 Oktober 2011, halaman 389-400
- [5] Santoso, Dyos., Yusup, M.R., 2012. *Analisis Eksergi pada Sistem Pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP)UBP Kamojang Unit PLTP Darajat Jawa Barat*: Prosiding Seminar Nasional AvoER ke-4, Palembang, 28-29 November 2012, halaman 134-139
- [6] Çengel, Y.A., Boles, M.A., 2006. *Thermodynamics: an engineering approach*, 5th ed.,Dubuque, Iowa: McGraw-Hill.
- [7] Sigalingging, Riswanti. 2008. *Analisis Energi dan Eksergi Pada Produksi Biodiesel berbahan baku CPO (Crude Palm oil)*. Bogor : Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.
- [8] Kotas, T. J., 1985. *The exergy method of thermal plant analysis*. London: Butterworths.
- [9] Dincer, Ibrahim., Çengel, Y.A., 2001. *Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering*. Entropy 2001, 3, 116-149.
- [10] Kamaruddin A, Irwanto AK, Siregar N, dkk. 1998. *Energi dan Listrik Pertanian*. JICA-DGHE/IPB PROJECT/ADAET:JTA-9a(132). Academic Development of tthe Graduate Program. The Faculty of Agricultural Engineering and Technology : Bogor Agricultural
- [11] Moran, M. J., Tsatsaronis, G., 2000. *Engineering thermodynamics*. U.S.A: CRC Press LLC, Turkey.