

Analisis Energi dan Eksergi Generator dan Turbin Uap untuk Pompa Air pada Kapal Laut

KHAI RUL ASLAM, DANI RUSIRAWAN

Institut Teknologi Nasional Bandung
Email : khairul.aslam@mhs.itenas.ac.id

ABSTRAK

Sebagian besar kapal laut masih menggunakan mesin diesel sebagai penggerak. Namun pada jenis kapal tertentu, penggeraknya sudah berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Turbin uap digunakan tidak hanya untuk penggerak baling-baling kapal, tetapi juga berguna sebagai penggerak pompa MFP. Pengukuran dilakukan di semua kondisi operasi mulai dari kapal berakselerasi, beroperasi maksimum, hingga kembali berhenti. Berdasarkan berbagai evaluasi dan analisis diperoleh bahwa efisiensi energi dan eksergi dari turbin berdaya rendah bervariasi antara 46% sampai 62%. Suhu lingkungan memiliki pengaruh terhadap nilai efisiensi eksergi turbin, setiap perubahan suhu lingkungan sebesar 10°C menyebabkan perubahan efisiensi eksergi kurang dari 1%. Efisiensi eksergi tertinggi dicapai pada suhu lingkungan terendah, sedangkan efisiensi tertinggi untuk turbo-generator dicapai di angka 71.5% dan efisiensi tertinggi untuk penggerak MFP dicapai pada daya turbin maksimum. Untuk mendapatkan efisiensi dan optimalisasi sistem yang lebih baik, sistem penggerak MFP dapat disubstitusi menggunakan motor listrik dan akan meningkatkan efisiensi energi dan eksergi turbo-generator senilai 1%-3%.

Kata kunci: LNG Carriers, Energi, Eksergi, Main Feeder Water Pump, Efisiensi

ABSTRACT

Most ships still use diesel engines as propulsion. However, on certain types of ships, the propulsion is based on steam power plants. Steam turbines are used not only to drive ship propellers, but are also useful as MFP drives. Measurements are carried out in all operating conditions starting from accelerating, maximum operating, until it stops again. Based on various evaluations and analyzes it was found that the energy and exergy efficiency of low-power turbines varies between 46% to 62%. Ambient temperature has an influence on the turbine exergy efficiency value, every change in ambient temperature of 10°C causes a change in exergy efficiency of less than 1%. The highest exergy efficiency was achieved at the lowest ambient temperature, while the highest efficiency for the turbo-generator was achieved at 71.5% and the highest efficiency for the MFP drive was achieved at maximum turbine power. To obtain better system efficiency and optimization, the MFP drive system can be substituted using an electric motor and will increase energy efficiency and turbo-generator exergy by 1% - 3%.

Keywords: LNG Carriers, Energy, Exergy, Main Feeder Water Pump, Efficiency

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi sistem propulsi kelautan untuk saat ini sebagian besar kapal laut masih menggunakan mesin diesel sebagai jantung penggerak kapal. Jika diteliti lebih rinci terdapat beberapa jenis kapal yang berfungsi sebagai pengangkut LNG (*Liquefied Natural Gas Carriers*) yang memiliki penggerak berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). PLTU tersebut selain digunakan sebagai penggerak utama kapal juga digunakan sebagai pembangkit tenaga listrik yang dibutuhkan oleh kapal termasuk kebutuhan daya untuk penggerak pompa pompa pada kompartemen pendukung di kapal.

Pembahasan difokuskan kepada 2 komponen utama PLTU sebagai penggerak utama kapal yaitu *Turbo-Generator* (TG) dan Turbin Uap sebagai penggerak *main feed water pump* (MFP).

Jurnal yang ditulis oleh (Adibhatla, 2014) membahas tentang analisis *super critical thermal power plant* pada 3 kondisi beban operasi (100%, 80% dan 60%). Efisiensi energi dan eksergi yang diperoleh dari turbin uap berdaya tinggi berada pada kisaran >90%. Pada tekanan yang tetap (Isobarik), tingkat *exergy destruction* pada turbin uap menurun secara *sensible* ketika beban operasi menurun dari 100% menjadi 80%, sedangkan pada kondisi beban operasi 80% dan 60% tingkat *exergy destruction* cenderung tetap.

Sedangkan (Yang et al., 2013) mempresentasikan evaluasi berbasis tenaga dari pembangkit listrik ultra-superkritis berbahan bakar batubara. Efisiensi suplai tenaga untuk turbin uap berdaya tinggi dari pembangkit listrik tersebut berada pada kisaran 75% sampai dengan 97% sementara untuk tingkat *exergy destruction* turbin antara 2.5 MW dan 10 MW. Jurnal yang ditulis tersebut juga membahas tentang evaluasi eksergi dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap Ultra Superkritis berbahan bakar batubara dimana nilai efisiensi turbin uap berdaya tinggi pada Pembangkit Listrik tersebut berada pada rentang nilai 75% sampai dengan 97% dengan tingkat *exergy destruction* antara 2.5 MW sampai dengan 10 MW.

Jurnal yang ditulis oleh (Fernandez et.al., 2017) membahas tentang analisis energi dan eksergi generator dan turbin uap sebagai penggerak MFP selama kapal melakukan akselerasi. Jurnal tersebut menganalisis tingkat efisiensi energi dan eksergi serta tingkat *exergy destruction* untuk turbin berdaya rendah. Kemudian dianalisa juga pengaruh efisiensi turbin terhadap suhu lingkungan.

(Olaleye et al., 2015) dalam jurnalnya melakukan analisis dari simulasi kondisi *steady state* dan analisis eksergi pembangkit listrik uap super-kritis berbahan bakar batu bara dengan penangkapan CO₂ dari turbin uap berdaya tinggi didapatkan efisiensi yang bervariasi antara 87% dan 99%, sementara *exergy destruction* yang dihasilkan bernilai 0.5 MW dan 7 MW.

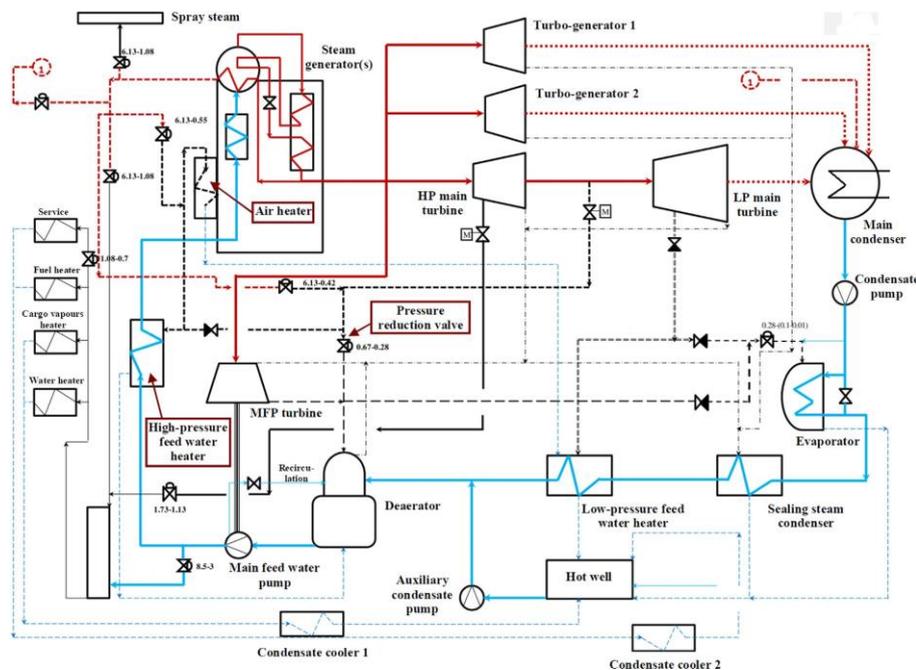
(Nazari et al., 2016) pada jurnalnya mempresentasikan analisis energi dan eksergi dari pembangkit listrik tenaga uap di Yordania dimana efisiensi turbin uap terukur sebesar 73.5% sedangkan *exergy destruction* yang dihasilkan berjumlah 20.40 MW pada kondisi operasi berbeban. Pada jurnal tersebut juga dilakukan pengamatan suhu lingkungan di sekitar turbin uap, generator uap, dan efisiensi eksergi pada kondensor. Dari pengamatan tersebut disimpulkan bahwa efisiensi eksergi turbin uap berdaya tinggi dan generator uap menurun sedangkan nilai *exergy destruction* meningkat seiring dengan peningkatan suhu lingkungan.

(Hafdhi et al., 2015) dalam jurnalnya melakukan analisis energi dan eksergi pembangkit listrik turbin uap di pabrik asam fosfat dimana efisiensi energi dari dua buah *turbo-generator* dan turbin uap yang berkisar antara 74% hingga 93%, sementara efisiensi komponen bervariasi antara 60% dan 74%. Turbin uap dan generator uap yang dianalisis adalah turbin

uap berdaya rendah dengan daya maksimum sekitar 7 MW. Dalam jurnal tersebut juga disajikan beberapa variasi efisiensi eksergi *turbo-generator* 1 dan *turbo-generator* 2 pada kondisi aliran massa uap yang berubah-ubah. Untuk *turbo-generator* 1, diperoleh nilai efisiensi eksergi tertinggi untuk aliran massa uapnya, sedangkan efisiensi eksergi tertinggi *turbo-generator* 2 diperoleh nilai 75.5%.

2. ANALISIS SISTEM TURBIN UAP

Analisis sistem turbin uap yang dilakukan oleh (Kecebas dan Gokgedik, 2015) terdiri dari 2 unit *Turbo-generator* yang identik dan khusus dirancang untuk kebutuhan tenaga listrik pada kapal pengangkut. Turbin uap pada masing masing *Turbo-generator* terdiri dari 9 *Rateau Stage*. Selama kapal melakukan akselerasi kedua kompartemen tersebut beroperasi secara paralel. MFP digerakkan oleh turbin uap secara mekanis dan konvensional. Pemilihan sistem penggerak tersebut didasarkan pada keamanan, kehandalan, dan kendali yang mudah dilakukan saat beroperasi. MFP digunakan untuk meningkatkan tekanan air ke *Turbo-generator*/generator uap.



Gambar 1. Skema Pembangkit Listrik Tenaga Uap pada LNG Carriers (Sumber : Kecebas dan Gokgedik, 2015)

Dapat dilihat pada Gambar 1 diatas, saat sistem mulai berjalan satu bagian dari feed water disirkulasikan kembali ke deaerator. Resirkulasi dilakukan untuk melindungi pompa tekanan tinggi pada beban sistem uap rendah. MFP memiliki beberapa tahap dan pompa akan secara sensible memanaskan feed water pada aliran yang berkurang karena terjadi penguapan. Penguapan feed water ini menyebabkan pengurangan volume dan menyebabkan terjadinya kavitasi yang dapat merusak impeller dan sealing pompa dalam waktu singkat.

(Baldi et al., 2016) Dalam jurnalnya melakukan analisis lebih rinci tentang jenis turbin uap dengan *Curtis Stage* dan *Rateau Stage*. Pada Jurnal tersebut juga dikaji secara rinci desain yang spesial dari turbin uap pada kapal laut. Dari jurnal tersebut dapat diketahui dengan jelas generator uap, dan komponen komponen rinci lainnya yang menghasilkan uap super-panas untuk pengoperasian turbin.

Untuk spesifikasi teknis dari LNG Carriers yang dianalisa dapat dilihat pada tabel 1 dibawah ini:

Tabel. 1 Spesifikasi Teknis dari LNG Carrier

Main particulars of the analyzed LNG carrier.	
Dead weight tonnage	84,812 DWT
Overall length	288 m
Max breadth	44 m
Design draft	9.3 m
Steam generators	2 × Mitsubishi MB-4E-KS
Propulsion turbine	Mitsubishi MS40-2 (max. power 29.420 kW)
Turbo-generators	2 × Shinko RGA 92-2 (max. power 3.850 kW each)
MFP steam turbine	Shinko DMG 125-3 (max. power 570 kW)

(Sumber : Baldi et al., 2016)

3. DESKRIPSI MATEMATIS GENERATOR DAN TURBIN UAP

3.1 Persamaan untuk Analisis Energi dan Eksergi

(Baldi et al., 2016) juga melakukan analisis energi berdasarkan *First Law of Thermodynamics* yang terkait dengan kekekalan energi. Persamaan keseimbangan massa dan energi untuk pengendalian volume dalam keadaan *steady state* dinyatakan sebagai berikut :

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$$

$$\dot{Q} - P = \sum \dot{m}_{out} \cdot h_{out} - \sum \dot{m}_{in} \cdot h_{in}$$

Energi total untuk setiap aliran fluida dapat dihitung sesuai dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{E}_n = \dot{m} \cdot h$$

Sedangkan untuk efisiensi energi dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$\eta_h = \frac{\text{Energy output}}{\text{Energy input}}$$

Analisis eksergi dianalisis berdasarkan *Second Law of Thermodynamics* tentang persamaan keseimbangan eksergi utama untuk pengendalian volume dalam kondisi *steady state* dinyatakan sebagai berikut :

$$\dot{X}_{heat} - P = \sum \dot{m}_{out} \cdot \epsilon_{out} - \sum \dot{m}_{in} \cdot \epsilon_{in} + \dot{E}_D$$

Dimana eksergi netto yang ditransfer oleh panas (X_{heat}) pada suhu (T) adalah sebagai berikut:

$$\dot{X}_{heat} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}$$

Dan untuk eksergi spesifik dapat diformulasikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\varepsilon = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)$$

Sehingga untuk eksergi total setiap aliran fluida dapat ditentukan dengan persamaan:

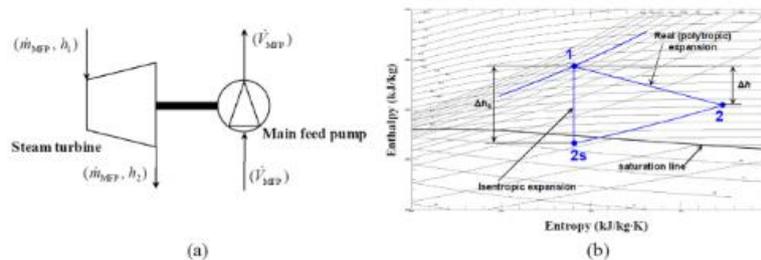
$$\dot{E}x = \dot{m} \cdot \varepsilon = \dot{m} \cdot [(h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)]$$

Dan untuk efisiensi dari eksergi ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\eta_{II} = \frac{\text{Exergy output}}{\text{Exergy input}}$$

3.2 Turbin Uap sebagai Penggerak MFP

Energi dan volume yang mengalir melalui turbin uap dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. Turbin Uap dan MFP (a) Energi dan Aliran Volume, (b) Turbin Isentropik dan Ekspansi Ideal

(Sumber : Baldi et al., 2016)

Dimana pada gambar 4 (a) h_1 adalah entalpi uap pada saluran intake turbin dan h_2 adalah entalpi uap pada saluran outlet turbin dan gambar 4 (b) menampilkan tentang kondisi ekspansi ideal melalui turbin uap MFP dalam diagram h-s.

Daya turbin yang dibutuhkan dapat ditentukan dari aliran volume MFP (VMFP) dengan menggunakan perhitungan orde-3 sebagai berikut :

$$P_{MFP} = 1.78582 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{V}_{MFP}^3 - 3.08892 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{V}_{MFP}^2 + 2.002 \cdot \dot{V}_{MFP} + 189.48$$

Aliran massa uap yang melalui Turbin MFP dapat diketahui dengan pendekatan menggunakan perhitungan polinomial orde-3 dengan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{m}_{MFP} = -3 \cdot 10^{-3} \cdot P_{MFP}^3 + 3.1326 \cdot 10^{-2} \cdot P_{MFP}^2 - 4.396794 \cdot P_{MFP}$$

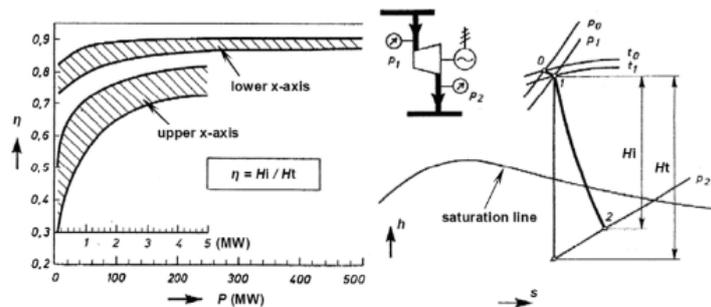
4. EFISIENSI ENERGI DAN EKSERGI TURBIN UAP

Efisiensi energi dan eksergi pada turbin uap dibagi menjadi 2 bagian :

1. Turbin Uap berdaya tinggi yang digunakan pembangkit listrik tipe *land-base*
 - a. Efisiensi energi dan eksergi sangat tinggi (sekitar 80% atau lebih tinggi)
 - b. Efisiensi energi dan eksergi memiliki tren perubahan yang hampir identik
 - c. Suhu lingkungan memiliki dampak pada efisiensi eksergi

2. Turbin Uap berdaya rendah seperti yang digunakan pada *LNG Carriers*

Untuk turbin uap berdaya rendah tidak ditemukan indikator pasti untuk rentang nilai efisiensi energi dan eksergi, tren perubahan atau indikator untuk pengaruh suhu sekitar pada efisiensi eksergi. Literatur yang tersedia hanya memberikan pedoman untuk nilai efisiensi energi turbin uap berdaya rendah sesuai dengan rentang dayanya saja. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 dibawah, dapat dilihat bahwa efisiensi energi turbin uap yang dianalisis jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin uap berdaya tinggi.



Gambar 3. Korelasi antara Efisiensi Energi dan Daya Turbin Uap (Sumber : Baldi et al., 2016)

5. HASIL DAN PERBANDINGAN

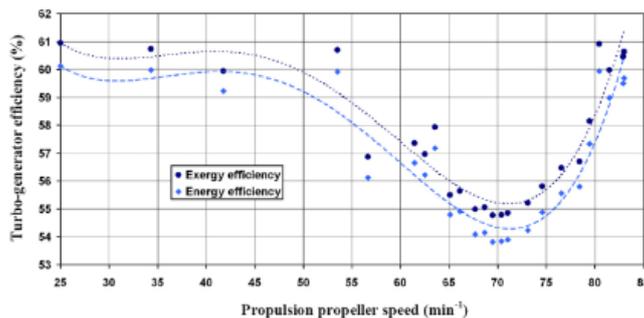
(Mrzljak et al., 2017) dalam jurnalnya menyajikan hasil pengukuran dengan variasi operasi yang berbeda beda untuk generator dan turbin uap MFP yang terkorelasi dengan propeler penggerak seperti yang diuraikan pada Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Pengukuran Generator dan Turbin Uap pada titik operasi yang berbeda-beda. (Sumber : Mrzljak et al., 2017)

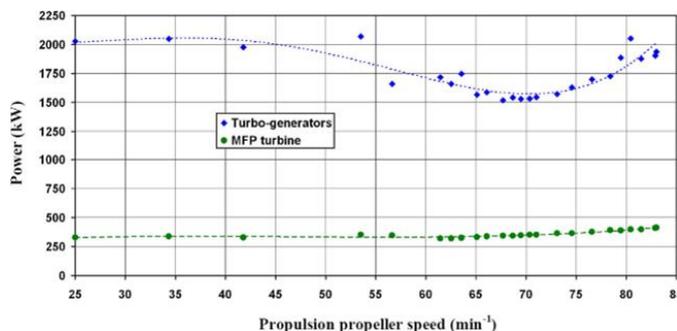
Measurement results for turbo-generators and MFP steam turbine in various operation regimes.

OP. [*]	Propulsion propeller speed (min ⁻¹)	Steam pressure at the TG inlet (MPa)	Steam temp. at the TG inlet (°C)	Steam mass flow through one TG (kg/h)	Steam pressure at the TG outlet (MPa)	Steam pressure at the MFP turbine inlet (MPa)	Steam temp. at the MFP turbine inlet (°C)	MFP water volume flow (m ³ /h)	Steam pressure at the MFP turbine outlet (MPa)
1	25.00	0.21	491.0	4048.83	0.00541	0.21	485	74.49	0.2715
2	34.33	0.20	491.0	4085.54	0.00512	0.20	487	78.87	0.2701
3	41.78	0.22	491.0	4356.10	0.00489	0.22	488	75.08	0.2704
4	53.50	0.09	495.0	4718.74	0.00511	0.09	502	88.14	0.2673
5	56.05	5.97	490.5	4000.58	0.00425	5.97	496	84.48	0.2703
6	61.45	5.97	491.0	4102.44	0.00428	5.97	496	70.07	0.2748
7	62.52	5.98	490.5	4004.09	0.00432	5.98	497	69.71	0.2723
8	63.55	5.97	491.0	4156.83	0.00451	5.97	497	73.59	0.2708
9	65.10	6.07	491.0	3838.78	0.00352	6.07	502	76.64	0.2655
10	66.08	6.06	493.0	3872.22	0.00396	6.06	502	79.11	0.2582
11	67.08	6.06	497.0	3754.24	0.00404	6.06	507	83.23	0.2564
12	68.66	6.07	500.0	3794.76	0.00404	6.07	510	82.90	0.2513
13	69.49	6.07	502.5	3775.38	0.00397	6.07	511	84.98	0.2417
14	70.37	6.07	502.5	3778.91	0.00397	6.07	511	86.88	0.2411
15	71.03	6.08	503.5	3798.28	0.00399	6.08	511	87.29	0.2374
16	73.09	6.06	504.5	3847.58	0.00408	6.06	512	94.24	0.2414
17	74.59	6.02	504.0	3951.37	0.00412	6.02	513	94.22	0.2391
18	76.56	6.01	504.5	4070.84	0.00420	6.01	512	100.52	0.2557
19	78.41	6.03	504.5	4116.48	0.00422	6.03	512	107.91	0.2425
20	79.46	5.87	504.5	4400.42	0.00433	5.87	510	106.01	0.2351
21	80.44	5.89	501.5	4089.03	0.00554	5.89	504	111.09	0.2531
22	81.49	5.91	495.5	4382.91	0.00550	5.91	501	110.66	0.2391
23	82.88	5.80	493.0	4428.43	0.00557	5.80	500	117.04	0.2495
24	83.00	5.90	493.5	4487.93	0.00561	5.90	500	118.26	0.2457

OP.^{*} = Operating Point.



Gambar 4. Perubahan Nilai Efisiensi Energi dan Eksergi pada Turbin-Generator Uap (Sumber : Mrzljak et al., 2017)

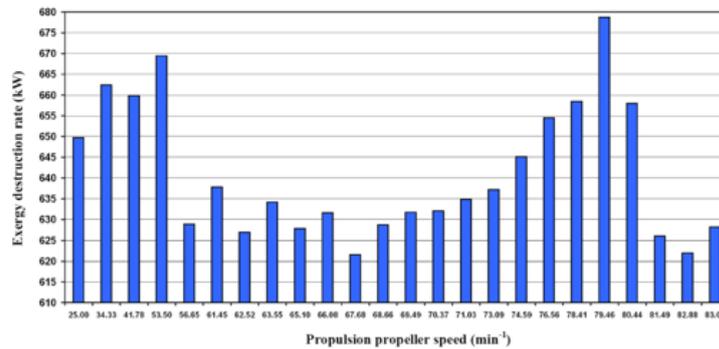


Gambar 5. Perubahan Daya pada Turbin dan Generator Uap (Sumber : Mrzljak et al., 2017)

Pada Gambar 6 diatas menunjukkan perubahan nilai efisiensi energi dan eksergi pada turbin uap dan generator uap sesuai dengan beban operasi dapat dilihat bahwa kedua turbin dan generator uap hanya menghasilkan daya sebesar 30% dari daya maksimum atau kapasitas terpasang. Pada saat pengukuran dilakukan, generator uap menghasilkan daya lebih dari 2 MW dengan kondisi beban penuh kemudian beban secara perlahan dilepas hingga daya terendah yang diserap oleh beban hanya sebesar 1.518 MW pada kecepatan propeler kapal 67.68 min⁻¹.

Turbin yang terkorrelasi dengan MFP pada awal rentang operasi menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan pemakaian beban. Pada kondisi tersebut aliran massa *feed water* masih relatif kecil yang melewati sistem, sehingga MFP harus mensirkulasi ulang *feed water* ke *deaerator*. Setelah air ber-resirkulasi, kecepatan turbin yang terkorrelasi dengan MFP menurun (pada kecepatan baling-baling propulsi 61,45 min⁻¹) dan kemudian perlahan meningkat dengan peningkatan beban pada sistem yang bekerja. Peningkatan daya turbin MFP secara signifikan mulai meningkat pada saat kecepatan baling-baling propulsi 73,09 min⁻¹ hal tersebut dikarenakan peningkatan yang cukup besar pada aliran volume *feed water*. Daya maksimum yang dihasilkan dari turbin MFP saat kondisi tersebut adalah 73% dari daya terpasang sebesar 413 kW.

Dari Tabel 2, Gambar 6 dan Gambar 7 diatas, kedua efisiensi (turbin dan generator) sangat tergantung pada penyerapan beban. Efisiensi energi dan eksergi akan berkurang ketika beban berkurang (kecepatan propeler dari 56,65 min⁻¹ menjadi 70,37 min⁻¹). Dengan meningkatnya beban, maka kedua efisiensi baik di turbin dan generator pun akan meningkat.



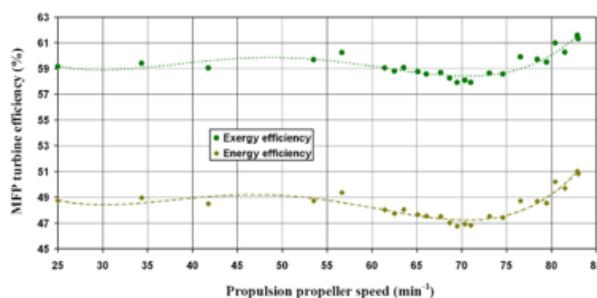
Gambar 6. Tingkat Exergy destruction dari satu turbin uap saat operasi.
(Sumber : Adibhatla, 2014)

Dari Gambar 8 diatas, (Adibhatla, 2014) menyampaikan bahwa tingkat *exergy destruction* dari turbin uap memiliki nilai yang bervariasi antara 621.5 kW dan 679 kW. Selama kecepatan propeler kapal meningkat tren *exergy destruction* tidak menunjukkan perubahan yang berkelanjutan. Dari hasil analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa peningkatan beban di sistem tidak berdampak besar terhadap *exergy destruction* di turbin uap.

Menurut (Ege dan Sahin, 2016) dalam jurnalnya menyimpulkan bahwa nilai *exergy destruction* pada turbin berdaya tinggi sebanding dengan beban turbin uap. Beban yang lebih tinggi menghasilkan *exergy destruction* yang lebih tinggi begitu juga sebaliknya. Setelah dilakukan perbandingan, hasilnya menunjukkan kesimpulan yang sama juga berlaku untuk turbin uap berdaya rendah

Penurunan signifikan dalam tingkat *exergy destruction* turbin uap (dari 669.5 kW menjadi 629 kW) disebabkan oleh penurunan aliran massa uap dari 4718.74 kg/jam menjadi 4000.58 kg/jam (kecepatan baling-baling propulsi 53.50 min⁻¹ dan 56.65 min⁻¹).

Peningkatan dalam tingkat *exergy destruction* pada turbin generator uap terlihat pada kecepatan propeler 78.41 min⁻¹ dan 79.46 min⁻¹ di mana aliran massa uap meningkat dari 4116.48 kg/jam menjadi 4400.42 kg/jam. Bahkan peningkatan yang lebih tinggi dalam aliran massa uap, dibandingkan dengan kasus sebelumnya, terjadi antara propeler 79.46 min⁻¹ dan 80.44 min⁻¹ (dari 4400.42 kg/jam menjadi 4689.03 kg/jam). Tetapi, dalam kondisi tersebut, tingkat *exergy destruction* menurun (dari 679 kW menjadi 658 kW). Analisis yang disampaikan bahwa penurunan tingkat *exergy destruction* tersebut terletak pada penurunan suhu uap di saluran *intake* turbin uap (dari 504.5°C menjadi 501.5°C). Penurunan suhu tersebut secara signifikan meningkatkan eksergi spesifik di saluran *outlet* turbin uap (dari 53.49 kJ/kg menjadi 83.71 kJ/kg).

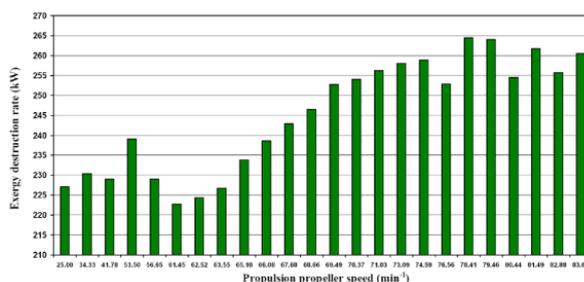


Gambar 6. Energi Turbin Uap MFP Terhadap Efisiensi Eksergi
(Sumber Kaushik et al., 2011)

Gambar 9 diatas menampilkan tentang perubahan beban turbin MFP dapat dianggap sebagai perubahan aliran volume *feed water*, sesuai dengan Tabel 2 pengukuran yang dilakukan oleh (Mrzljak et al., 2017) Setelah periode resirkulasi, efisiensi energi turbin uap MFP menurun dari 49.36% menjadi 48.01%, sedangkan efisiensi menurun dari 60.25% menjadi 59% (kecepatan propeler 56.65 min⁻¹ dan 61.45 min⁻¹).

Dari kecepatan propeler 61.45 min⁻¹ hingga 71.03 min⁻¹ daya turbin MFP yang dibangkitkan perlahan meningkat dengan peningkatan aliran volume *feed water* dikarenakan peningkatan suhu uap pada saluran *intake* turbin MFP (Tabel 2), namun nilai efisiensi energi dan eksergi sedikit menurun. Penurunan kedua efisiensi nilainya cukup rendah (kira-kira 1% dari awal hingga akhir rentang operasi).

Pada kecepatan propeler 73.09 min⁻¹ karena peningkatan aliran volume *feed water* yang cukup besar, kedua efisiensi turbin uap MFP mulai meningkat. Peningkatan perputaran propeler linier dengan peningkatan efisiensi turbin uap MFP. Efisiensi eksergi pada turbin MFP memiliki nilai yang bervariasi antara 58% dan 62% di semua kondisi operasi, hal ini menunjukkan bahwa efisiensi eksergi berada dalam kisaran yang sama seperti pada generator uap. Nilai efisiensi energi turbin MFP menunjukkan bahwa komponen ini memiliki efisiensi energi terendah (dari 46.8% menjadi 51%) di seluruh kondisi operasi.



Gambar 7. Energi yang Dihasilkan Turbin Uap Mfp Terhadap Perubahan Efisiensi Eksergi (Sumber Kaushik et al., 2011)

Gambar 10 diatas menunjukkan bahwa *exergy destruction* turbin MFP memiliki nilai rentang antara 222.7 kW dan 264.5 kW. Jika dibandingkan dengan turbin uap, *tingkat exergy destruction* turbin MFP jauh lebih rendah. Hal tersebut dikarenakan turbin MFP dapat menghasilkan daya tiga kali lebih kecil daripada setiap turbin uap. Menurut hasil pengukuran yang dilakukan (Mrzljak et al., 2017) pada Tabel 2 diatas, perubahan beban turbin MFP dapat dianggap sebagai perubahan aliran volume *feed water*.

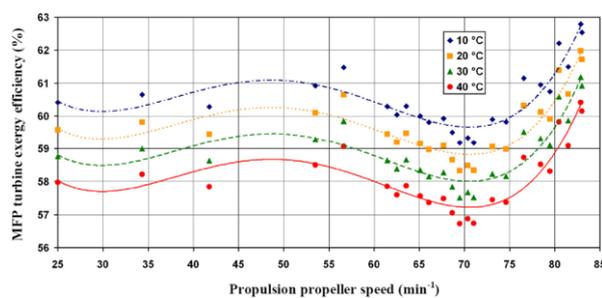
Dalam rentang operasi kecepatan propeler dari 25 min⁻¹ hingga 74.59 min⁻¹, perubahan beban pada turbin MFP sangat dipengaruhi oleh perubahan laju *exergy destruction*. Satu-satunya peningkatan yang signifikan dalam laju *exergy destruction* adalah pada saat kecepatan propeler 53.50 min⁻¹, yang disebabkan oleh peningkatan aliran volume *feed water* (dari 75.08 m³/jam pada kecepatan 41.78 min⁻¹ menjadi 88.14 m³/jam pada kecepatan 53.50 min⁻¹) dan kemudian menurun kembali secara *sensible* saat kecepatan propeler 74.59 min⁻¹ hingga kondisi berhenti beroperasi.

Analisis lain dituliskan oleh (Fernandez et al., 2017) Hasil pengukuran pada Tabel 2, suhu uap pada saluran intake turbin terus menurun (dari 513°C menjadi 500°C) seiring dengan penurunan laju *exergy destruction* turbin MFP (yang terjadi pada kecepatan propeler 76.56 min⁻¹, 80.44 min⁻¹, dan 82.88 min⁻¹) memiliki penjelasan yang sama dengan penurunan tingkat *exergy destruction* pada generator uap saat kecepatan propeler 79.46 min⁻¹ dan 80.44 min⁻¹.

Meskipun terjadi peningkatan aliran volume *feed water* (dibandingkan dengan titik operasi yang diamati sebelumnya), suhu uap pada saluran intake turbin MFP berkurang secara signifikan seiring dengan peningkatan nilai eksergi spesifik pada saluran *outlet* turbin MFP. Peningkatan nilai eksergi spesifik di outlet turbin MFP memiliki linieritas terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin MFP dan dengan kondisi tersebut menghasilkan penurunan nilai *exergy destruction* pada turbin MFP.

(Ege dan Sahin, 2016) dalam kesimpulannya juga menyampaikan hal yang sama bahwa peningkatan suhu lingkungan memiliki dampak tidak signifikan pada efisiensi eksergi kondensor uap. Efisiensi eksergi kondensor uap akan menurun seiring dengan peningkatan suhu lingkungan.

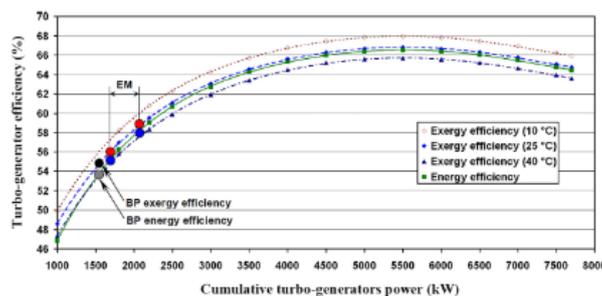
Efisiensi eksergi turbin uap dan TG dalam kaitannya dengan lingkungan dapat dilihat pada Gambar 11 berikut ini :



Gambar 8. Efisiensi Eksergi Turbin Uap terhadap Suhu Lingkungan
(Sumber : Ege dan Sahin, 2016)

Dari Gambar 11 diatas, dapat dilihat bahwa suhu lingkungan memiliki nilai yang bervariasi antara 10°C hingga 40°C, suhu lingkungan disini didasarkan pada suhu ruang di ruang mesin kapal. Nilai efisiensi eksergi tertinggi turbin uap diperoleh pada suhu ruang mesin terendah (10°C) dengan nilai 56% sampai dengan 62% pada kondisi beroperasi. Dengan kenaikan suhu 10°C, efisiensi eksergi turbin berkurang dari 0.8% hingga 1%. Pada suhu ruang mesin (suhu lingkungan) mencapai nilai 40°C, efisiensi eksergi berkisar antara adalah dari 53% sampai dengan 60%.

Efisiensi eksergi turbin uap MFP menunjukkan tren yang hampir sama dengan turbin uap. Nilai efisiensi eksergi tertinggi pada suhu ruang mesin 10°C bernilai antara dari 59% hingga 63% dan nilai efisiensi eksergi terendah pada suhu ruang mesin 40°C bernilai antara 56.7% hingga 60.5%. Peningkatan suhu 10°C dapat menyebabkan pengurangan efisiensi eksergi dari 0.8% menjadi 1%, hal tersebut juga berlaku untuk turbin uap MFP.

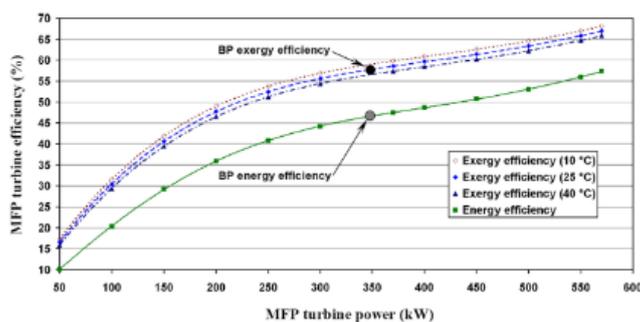


Gambar 9. Nilai Efisiensi Turbin Uap pada kondisi Operasi 13
(Fernandez et al., 2017)

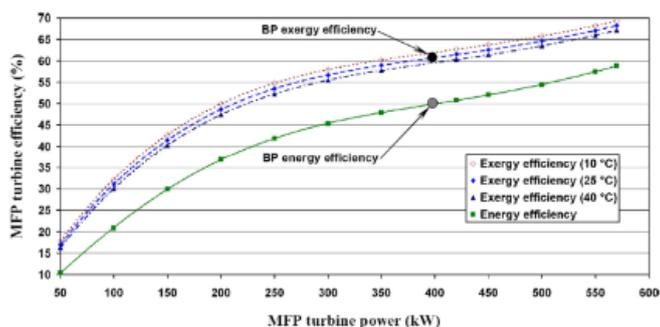
(Fernandez et al., 2017) juga melakukan analisa terhadap nilai efisiensi turbin uap dalam kondisi operasi. Pada Gambar 12 diatas dapat dilihat perubahan daya kumulatif untuk kedua *turbo-generator* dalam kaitannya dengan energi dan efisiensi eksergi saat kondisi operasi. Energi *turbo-generator* dan efisiensi eksergi meningkat hingga daya *turbo-generator* kumulatif mencapai 5500 kW. Efisiensi tertinggi terukur sebesar 71.5% dari daya terpasang dengan berbagai kondisi operasi. Peningkatan efisiensi energi *turbo-generator* selama peningkatan aliran massa uap terjadi karena peningkatan daya yang dibangkitkan memiliki intensitas yang lebih besar daripada peningkatan aliran massa uapnya.

Dengan kondisi aliran massa uap yang bervariasi, suhu sekitar juga bervariasi dalam rentang 10°C hingga 40°C. Berdasarkan hal tersebut, maka disimpulkan bahwa, peningkatan suhu lingkungan dapat menyebabkan penurunan efisiensi eksergi pada turbin uap. Selama perubahan suhu lingkungan berubah secara linier dengan perubahan aliran massa uap, tren efisiensi eksergi *turbo-generator* tetap sama dengan suhu lingkungan 25°C.

Efisiensi eksergi maksimum sebesar 67.92% dicapai pada suhu lingkungan di angka 10°C. Pada saat efisiensi eksergi turbo-generator mencapai angka 65.69% di suhu lingkungan 40°C, nilai tersebut menjadi 1,10% lebih rendah dari efisiensi eksergi maksimum pada suhu lingkungan 25°C atau 2.23% lebih rendah dari efisiensi eksergi maksimum pada suhu lingkungan 10°C. Selain itu, suhu lingkungan tidak memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi eksergi turbo-generator dalam analisis dengan aliran massa uap yang bervariasi.



Gambar 10. Efisiensi Turbin Uap MFP saat kondisi operasi 13.
(Sumber : Mrzljak et al., 2017)



Gambar 11. Efisiensi Turbin Uap MFP pada kondisi operasi 21
(Sumber : Mrzljak et al., 2017)

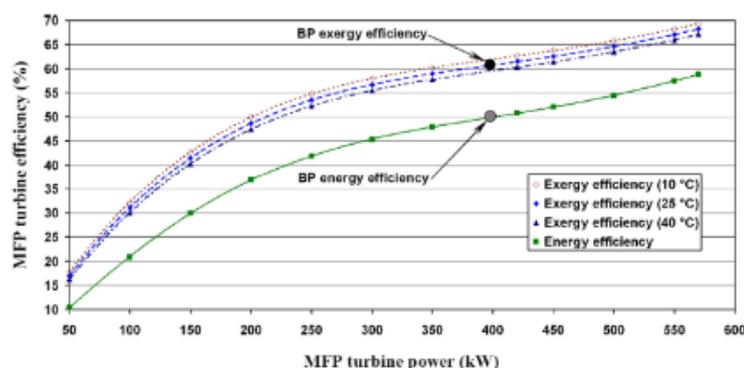
Pada sumbu titik operasi di Gambar 14, efisiensi energi masing-masing *turbo-generator* hanya sebesar 53.82% (titik abu-abu) sedangkan efisiensi eksergi pada titik operasi yang sama bernilai 54.77% (titik hitam). Dapat disimpulkan bahwa efisiensi ini jauh lebih rendah daripada nilai maksimum yang dihitung.

Menurut (Fernandez et al., 2017), aspek efisiensi energi turbin uap MFP menjadi salah satu komponen terburuk dalam sistem penggerak uap. ini. Oleh karena itu menyarankan untuk menggunakan motor listrik sebagai pengganti turbin sebagai penggerak MFP di *LNG Carriers* dengan memiliki keunggulan sebagai berikut :

1. Turbin uap MFP memiliki efisiensi energi antara 46.8% dan 51%, sedangkan efisiensi eksnerginya berkisar antara 57.5% dan 62%. Sedangkan efisiensi energi dan eksergi motor listrik bernilai antara 80% dan 87%. Dengan demikian, motor listrik memiliki efisiensi energi dan eksergi yang jauh lebih tinggi, yang akan meningkatkan efisiensi energi-eksergi sistem secara keseluruhan.
2. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 diatas, efisiensi energi dan eksergi *turbo-generator* meningkat seiring dengan peningkatan beban. Konsumsi daya motor listrik akan secara langsung meningkatkan beban di generator uap. Jika diasumsikan bahwa motor listrik akan memiliki daya maksimum 570 kW, peningkatan energi *turbo-generator* dan efisiensi eksergi akan berada di kisaran antara 1% dan 4%.

Dalam analisis yang disajikan, turbin MFP menggunakan uap super-panas sebesar 3250 kg/jam sampai dengan 3650 kg/jam. Kedua *turbo-generator* membutuhkan antara 750 kg/jam hingga 2000 kg/jam uap super panas untuk membangkitkan daya 200 kW hingga 570 kW. Sisa uap dengan tekanan dan suhu yang lebih tinggi akan ditransfer ke *deaerator* untuk memastikan sistem berjalan secara *looping*.

Dari pengukuran yang dilakukan , penulis mengambil 2 sample pengukuran dengan alasan nilai pada 2 kondisi tersebut memiliki rentang yang cukup signifikan yaitu pengukuran pada kondisi operasi 13 dan pengukuran dengan kondisi operasi 21. Dari gambar 13 diatas, dapat dilihat bahwa efisiensi energi tertinggi turbin uap MFP pada kondisi operasi tersebut adalah 57.34%, sedangkan efisiensi eksergi tertinggi untuk titik operasi yang sama bernilai 66.99% pada suhu lingkungan 25°C. Dengan menurunkan suhu lingkungan menjadi 10°C, efisiensi eksergi maksimum meningkat menjadi 68.12%, sedangkan pada saat kenaikan suhu lingkungan naik menjadi 40°C menyebabkan turunnya efisiensi eksergi maksimum menjadi 65.89%. Menurut data pengukuran (tabel 2) dan Gambar 13 diatas, efisiensi energi turbin uap MFP di titik operasi 13 adalah 46.75% (titik abu-abu) sedangkan efisiensi eksergi untuk titik operasi yang sama berjumlah 57.92% (titik hitam) memberikan nilai yang jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan yang ada pada daya maksimum. Daya yang dibutuhkan dari turbin uap MFP diubah sesuai dengan aliran massa *feed water* yang diperlukan dalam sistem propulsi uap.



Gambar 12. Efisiensi Turbin Uap MFP pada kondisi operasi 21 (Sumber : Mrzljak et al., 2017)

Pada titik operasi 21 (Tabel 2), dapat dilihat pada Gambar 14 efisiensi energi tertinggi turbin uap MFP adalah 58.85%, sedangkan efisiensi eksergi tertinggi sebesar 68.27% pada suhu lingkungan 25°C. Kedua efisiensi maksimum dihitung pada daya turbin uap MFP tertinggi. Dengan peningkatan suhu lingkungan suhu hingga 40°C efisiensi eksergi maksimum menurun menjadi 67.19%, sedangkan penurunan suhu lingkungan menjadi 10°C menyebabkan efisiensi eksergi maksimum meningkat menjadi 69.37%. Menurut data pengukuran pada Tabel 2, efisiensi energi turbin uap MFP di titik operasi 21 adalah sebesar 50.20% (titik abu-abu) sedangkan efisiensi eksergi sebesar 60.99% (titik hitam).

Analisis yang dituliskan oleh (Hafdhi et al., 2015) tentang variasi aliran massa uap dan pengaruh variasi tersebut pada efisiensi eksergi untuk dua buah *turbo-generator*, diperoleh tren yang sebanding dengan hasil yang diperoleh untuk *turbo-generator* dan turbin uap MFP. Tren tingkat efisiensi eksergi yang diperoleh adalah sama. Dengan peningkatan aliran massa uap, efisiensi eksergi meningkat ke nilai maksimum. Peningkatan dalam aliran massa uap menyebabkan efisiensi eksergi menurun. Dari analisis diatas, disimpulkan bahwa efisiensi eksergi maksimum berjumlah 75.5% dan dicapai pada 89% dari aliran massa uap maksimum.

6. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan data pengukuran dari kapal pengangkut LNG (LNG Carriers) maka dilakukan reviu terhadap analisis yang dilakukan oleh penulis-penulis sebelumnya. Reviu analisis difokuskan kepada 2 komponen utama pembangkit tenaga listrik yaitu turbin uap dan *turbo generator* sebagai penggerak *main feed water pump* (MFP).

Untuk turbin uap berdaya rendah, dapat disimpulkan bahwa :

1. Efisiensi energi dan eksergi cukup rendah (antara 46.8% sampai 62%), nilai tersebut lebih rendah dibandingkan dengan turbin uap berdaya tinggi.
2. Efisiensi energi dan eksergi memiliki tren perubahan yang hampir identik.

Suhu lingkungan memiliki pengaruh terhadap efisiensi eksergi (perubahan suhu sekitar untuk 10°C menyebabkan perubahan efisiensi eksergi kurang dari 1%). Meskipun memiliki pengaruh, namun pengaruh yang ditimbulkan tidak terlalu signifikan.

Dengan melihat variasi aliran massa uap pada berbagai kondisi operasi (tabel 2), penulis mendapatkan pengetahuan tentang berbagai efisiensi energi dan eksergi. Energi tertinggi dan efisiensi eksergi *turbo-generator* dicapai pada 71.5% dari daya pembangkitan maksimum, sedangkan turbin uap MFP mencapai efisiensi tertinggi pada daya maksimumnya.

Efisiensi energi dan eksergi *turbo-generator* dan turbin uap MFP yang diukur, didapatkan nilai yang jauh lebih rendah daripada nilai rentang atasnya. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan optimisasi energi dan eksergi dari seluruh sistem propulsi uap untuk mencapai efisiensi yang optimal dalam kondisi operasi yang bervariasi.

Dari berbagai jurnal yang ada, terdapat rekomendasi yang disampaikan dimana untuk mendapatkan nilai efisiensi dapat mensubstitusi turbin uap MFP dengan motor listrik untuk penggerak. Dari rekomendasi tersebut, optimalisasi yang paling berdampak adalah peningkatan energi *turbo-generator* dan efisiensi eksergi setidaknya 1% sampai dengan 3%.

Dari reviu yang dilakukan, penulis menyarankan agar penelitian atau analisis tidak hanya berfokus kepada *turbo-generator* dan turbin uap MFP saja, tetapi juga dapat melakukan

penelitian atau analisis terhadap komponen lain dari sistem propulsi kelautan seperti *Engine Room Electronic Management (EREM)* ataupun *Smart Control System (SCS)* yang saat ini sudah mulai banyak digunakan pada kendaraan tanpa awak (LRT, MRT, *Autonomous Car*, dll.) dimana sistem kontrol tersebut memungkinkan penggunaannya untuk melakukan monitoring dan kendali sampai ke setiap komponen secara *real time*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prodi Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Bandung yang telah membantu dan memfasilitasi dalam penyusunan jurnal ini. Tak lupa juga kepada rekan-rekan Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Bandung yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian jurnal ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Tan H, Zhao Q, Sun N, Li Y. Enhancement of energy performance in a boil-off gas re-liquefaction system of LNG carriers using ejectors. *Energy Convers Manage* 2016;126:875–88. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.031>
- Fernandez IA et al. Review of propulsion systems on LNG carriers. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;67:1395–411 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.095>
- Adibhatla S, Kaushik SC. Energy and exergy analysis of a super critical thermal power plant at various load conditions under constant and pure sliding pressure operation. *Appl Therm Eng* 2014;73:49–63. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.030>
- Erdem HH, Akkaya AV, Cetin B, Dagdas A, Sevilgen SH, Sahin B, et al. Comparative energetic and exergetic performance analyses for coal-fired thermal power plants in Turkey. *Int J Therm Sci* 2009;48:2179–86. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.03.007>
- Yang Y, Wang L, Dong C, Xu G, Morosuk T, Tsatsaronis G. Comprehensive exergy-based evaluation and parametric study of a coal-fired ultra- supercritical power plant. *Appl Energy* 2013;112:1087–99. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.063>
- Kecebas A, Gokgedik H. Thermodynamic evaluation of a geothermal power plant for advanced exergy analysis. *Energy* 2015;88:746–55. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.094>
- Mrzljak V, Poljak I. Dual fuel consumption and efficiency of marine steam generators for the propulsion of LNG carrier. *Applied Thermal Engineering* 2017;03:078-54. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.078>
- Vedran M, Igor P, Tomislav M. Energy and exergy analysis of the turbo-generators and steam turbine for the main feed water pump drive on LNG carrier. *Energy Convers Manage* 2015;93:1819–31. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.007>
- Welaya YMA, Mosleh M, Ammar NR. Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power plant with a solid oxide fuel cell for marine applications. *Int J Nav Archit Ocean Eng* 2013;5(4):529–45. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0151>
- Baldi F, Ahlgren F, Melino F, Gabriellii C, Andersson K. Optimal load allocation of complex ship power plants. *Energy Convers Manage* 2016;124:344–56. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.009>
- Nazari N, Heidarnjad P, Porkhial S. Multi-objective optimization of a combined steam-organic Rankine cycle based on exergy and exergo-economic analysis for waste heat recovery application. *Energy Convers Manage* 2016;127:366–79. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.022>
- Vandani AMK, Bidi M, Ahmadi F. Exergy analysis and evolutionary optimization of boiler blowdown heat recovery in steam power plants. *Energy Convers Manage* 2015;106:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.018>

- Ifaei P, Rashidi J, Yoo CK. Thermo-economic and environmental analyses of a low water consumption combined steam power plant and refrigeration chillers – Part 1: energy and economic modelling and analysis. *Energy Convers Manage* 2016;123:610–24. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.036>
- Kim CK, Yoon JY. Performance analysis of bladeless jet propulsion micro-steam turbine for micro-CHP (combined heat and power) systems utilizing low-grade heat sources. *Energy* 2016;101:411–20. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.070>
- Ege A, Sahin HM. Uncertainties in energy and exergy efficiency of a high pressure turbine in a thermal power plant. *Int J Hydrogen Energy* 2016;41:7197–205. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.002>
- Olaleye AK, Wang M, Kelsall G. Steady state simulation and exergy analysis of supercritical coal-fired power plant with CO₂ capture. *Fuel* 2015;151:57–72. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.013>
- Kaushik SC, Reddy VS, Tyagi SK. Energy and exergy analyses of thermal power plants: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:1857–72. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.007>
- Hafidhi F, Khir T, Ben Yahyia A, Ben Brahim A. Energetic and exergetic analysis of a steam turbine power plant in an existing phosphoric acid factory. *Energy Convers Manage* 2015;106:1230–41. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.044>
- Peng S, Wang Z, Hong H, Xu D, Jin H. Exergy evaluation of a typical 330 MW solar-hybrid coal-fired power plant in China. *Energy Convers Manage* 2014;85:848–55. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.073>