

Implementasi *Power Turbine* pada *Diesel-Generator* di Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel untuk Meningkatkan Produksi Energi Listrik

Aditya Wahyu Sapura dan Dr. I Made Ariana, ST., M.T.,

Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: ariana@its.ac.id

Abstrak— Aplikasi *Power Turbine* merupakan salah satu aplikasi *PTO (Power Take-Off)* yang mampu meningkatkan produksi energi listrik dengan memanfaatkan aliran gas buang dari motor bakar (diesel maupun bensin) yang mengandung energi kalor (panas) yang digunakan untuk memutar turbin dan generator. Penelitian ini bertujuan mencari besar potensi daya listrik yang bisa dihasilkan *power turbine*. Hal ini dicapai dengan cara menganalisa pengaruh pembebanan *power turbine* terhadap kinerja motor diesel sehingga kita dapat melihat seberapa jauh *power turbine* tersebut dapat diaplikasikan pada motor bakar. Dari hasil analisa dan perhitungan, didapat bahwa *power turbine* tersebut dapat menghasilkan energi listrik sebesar 250 kW pada *continuous rating* (93,23%).

Kata Kunci— *Power Turbine*, *Power Take Off (PTO)*, Turbin, Turbo Generator.

I. PENDAHULUAN

Di Indonesia, terdapat berbagai jenis pembangkit listrik yang menggunakan energi terbarukan dan tidak terbarukan. Pembangkit listrik dengan energi terbarukan terdiri dari 18% dari total energi listrik yang dihasilkan secara nasional dan energi tidak terbarukan (batu bara, gas, minyak fosil) sebesar 82% [1]. Dari data tersebut, dapat kita tarik kesimpulan bahwa pembangkit listrik dengan energi tak terbarukan masih mendominasi pembangkit listrik di Indonesia. Hal ini dikarenakan teknologi untuk mengolah energi tak terbarukan sudah ada dan mudah untuk diimplementasikan. Salah satu jenis pembangkit listrik yang terdapat di Indonesia yaitu pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) yang memanfaatkan motor diesel (diesel generator) untuk menghasilkan listrik. Pada umumnya, motor diesel dengan kapasitas power yang besar dilengkapi dengan *turbocharger* untuk meningkatkan power output dan efisiensi dari motor diesel.

Pada penelitian ini, akan membahas bagaimana mengoptimalkan energi listrik yang dapat dihasilkan dari diesel generator, yaitu dengan mengimplementasikan *Power Turbine* yang dihubungkan dengan Generator. *Power Turbine* merupakan aplikasi turbin tambahan yang akan dihubungkan dengan generator dalam satu *shaft*. Aplikasi *Power Turbine* ini mengambil konsep kerja dari *turbocharger* dimana turbin

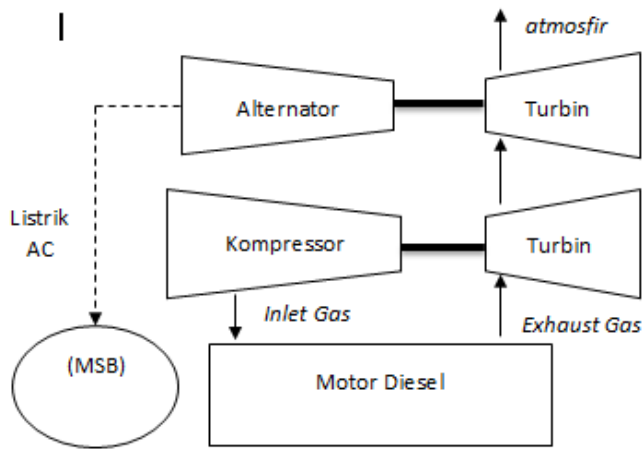
tersebut memanfaatkan tekanan dan panas dari *exhaust gas* untuk memutar turbin tersebut dan kemudian mengaktifkan generator sehingga dapat dihasilkan energi listrik. aplikasi *Power Turbine* ini diharapkan dapat mengurangi konsumsi bahan bakar, meningkatkan potensi energi listrik yang dapat dihasilkan, dan mengurangi tingkat polusi yang dihasilkan dari motor diesel, baik dari mesin utama maupun mesin bantu.

Aplikasi *Power Turbine* merupakan salah satu aplikasi *PTO (Power Take-Off)* yang memanfaatkan aliran gas buang dari motor bakar (diesel maupun bensin) yang mengandung energi kalor (panas) yang digunakan untuk memutar turbin dan generator. Aplikasi *Power Turbine* ini terinspirasi dari penelitian mengenai *Prediction on Power Produced from Power Turbine as a Waste Heat Recovery Mechanism on Naturally Aspirated Spark Ignition Engine Using Artificial Neural Network* [2] dan aplikasi *hybrid turbocharger* [3][4] yang memiliki konsep kerja hampir sama dengan *Power Turbine* yang dimana *hybrid turbocharger* tersebut menghubungkan antara *turbocharger* dengan generator. Aplikasi *Power Turbine* ini sangat berpotensi karena mudah untuk diaplikasikan ke motor diesel, tidak berpotensi mengganggu kinerja motor diesel secara keseluruhan (dimana pada *hybrid turbocharger*, *turbocharger* tersebut mendapat tambahan beban dari generator) dan tidak hanya dapat diaplikasikan di motor diesel laut, tetapi juga pada motor diesel darat untuk produksi, pembangkit listrik, dan lain — lain.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Perencanaan SkemSa istem

Perencanaan skema sistem diperlukan untuk memudahkan dalam menganalisa sistem seperti apa yang tepat untuk diaplikasikan. Pada penelitian ini, komponen utama yang digunakan yakni motor diesel pada diesel-generator, power turbine, dan generator tambahan yang akan dihubungkan dengan power turbine. Skema tersebut dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar. 1. Skema Sistem Power Turbine.

B. Perhitungan Pressure Loss pada Exhaust Gas

Pressure Loss merupakan fenomena penurunan tekanan pada fluida kerja dari satu tempat menuju tempat lain karena adanya losses berupa faktor gesekan material pipa. Berdasarkan persamaan Darcy-Weisbach pada Fluid Mechanics [5], dapat dirumuskan.

$$1) \Delta Pressure = \rho x g x \Delta Head \tag{1}$$

$$\Delta Head = f x L x V^2 / 2g x D \tag{2}$$

$$2) F = 1.325 / [\ln(e/D) + 5.74/Re^{0.9}]^2 \tag{3}$$

Dimana $\Delta Pressure$ merupakan pressure loss (kPa), ρ merupakan massa jenis (kg/m^3), g merupakan percepatan gravitasi (m/s^2), $\Delta Head$ merupakan head loss (m), f merupakan friction factor, L merupakan panjang saluran (m), V merupakan kecepatan fluida (m/s), D merupakan diameter pipa (m), e merupakan faktor kekasaran material (mm), dan Re merupakan bilangan Reynold. Pada penelitian ini, digunakan saluran exhaust gas sepanjang 16 m dengan faktor kekasaran material 0,26 mm.

C. Skema Pembebanan Daya pada Power Turbine

Skema pembebanan generator yang digunakan sebagai dasar perhitungan adalah 250 kW. Hal ini didasarkan pada hipotesa penelitian sebelumnya bahwa potensi daya yang bisa dihasilkan sekitar 5% dari besar daya engine. Kemudian dilakukan juga pembebanan pada range atas dan bawah dari 250 kW, yakni sebesar 400 kW, 350 kW, 300 kW, 200 kW, 150 kW, dan 100 kW. Skema tersebut dijalankan masing-masing pada tiga kondisi engine, yaitu sebesar 100% (4920 kW), 97,1% (4775,4 kW), 93,2 % (4587 kW), 86,69% (4363,4 kW), 84,17% (4141,1 kW), dan 76,57% (3767 kW). Dimana pembebanan 93,23% menjadi dasar perhitungan, karena merupakan titik service rate engine.

Langkah pertama yakni mengkonversi daya listrik menjadi daya aktual mekanis. Konversi tersebut menggunakan persamaan sebagai berikut

$$Pa = Pe / G_{Eff} \tag{4}$$

Dimana Pa merupakan daya mekanis aktual (kW), Pe

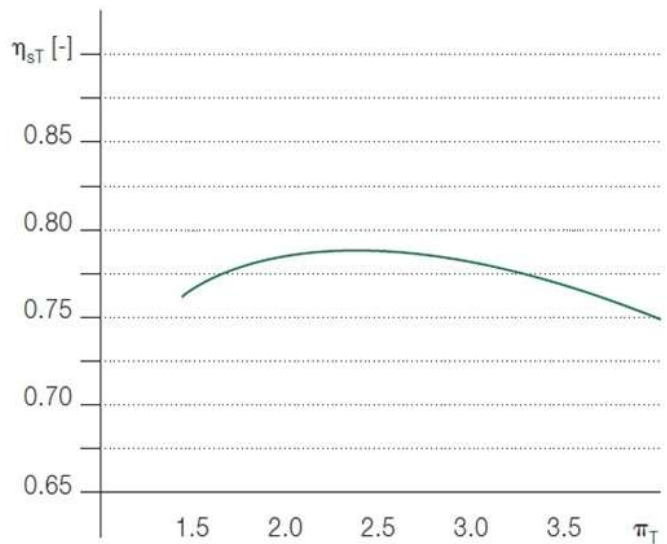
merupakan daya listrik, dan G_{Eff} merupakan efisiensi generator. Efisiensi generator yang digunakan berada di nilai 94% - 90%.

Setelah itu mencari nilai daya mekanis dari turbin. Persamaan daya pada turbin berdasarkan [5] dan [6] terlampir sebagai berikut:

$$Pa = \eta_T \cdot \dot{m}_T \cdot C_p \cdot T_3 (1 - ([P_4/P_3]^{(k-1)/k})) \tag{5}$$

Dimana Pa merupakan daya mekanis (kW), η_T merupakan Turbine Efficiency, \dot{m}_T merupakan laju aliran massa Exhaust Gas (kg/s), C_p merupakan panas spesifik pada tekanan konstan (kJ/Kg.C), T_3 merupakan Temperature sebelum Turbin ($^{\circ}C$), P_3 merupakan tekanan sebelum Turbin (kPa), P_4 merupakan tekanan setelah Turbine (kPa), dan K merupakan nilai ratio kapasitas panas (1,359)

Dari persamaan tersebut, akan didapat nilai tekanan akhir gas setelah turbin dan efisiensi turbin. Nilai efisiensi turbin tersebut didapat dari ratio antara tekanan sebelum dan sesudah turbin, yang dimana nilai efisiensi itu juga mempengaruhi nilai daya teoritis mekanis. Oleh karena itu, dilakukan iterasi sehingga mencapai nilai yang sama antara tekanan setelah turbin (P_4), efisiensi turbin, dan daya teoritis mekanis turbin. Grafik Efisiensi Turbin terdapat pada gambar 2. Berikut tabel Perhitungan Pembebanan power turbine pada 93,23%.



Gambar. 2. Grafik Efisiensi Power Turbin

D. Perhitungan Exhaust Backpressure

Exhaust Backpressure merupakan gaya tekan yang timbul berlawanan arah dari arus utama fluida yang disebabkan oleh panjang saluran exhaust dan juga adanya rancang bangun pada sistem exhaust yang menghambat laju aliran fluida dan menimbulkan arah (tekanan) yang berlawanan arah dari arah (tekanan) utama fluida. Perhitungan backpressure dibagi menjadi dua macam, yaitu berdasarkan panjang saluran exhaust gas dan berdasarkan komponen tambahan pada saluran exhaust gas. Berdasarkan Project Guide CAT 3616, perhitungan berdasarkan panjang saluran menggunakan

persamaan sebagai berikut.

$$BP = L \times S \times Q^2 \times 3,6 \times 10^6 / D^5 \tag{6}$$

Dimana BP merupakan *backpressure* (kPa), L merupakan panjang saluran (m), S merupakan massa jenis (kg/m³), Q merupakan debit *exhaust gas* (m³/s), dan D merupakan diameter saluran (m)

Perhitungan *backpressure* berdasarkan komponen tambahan pada saluran *exhaust gas* sistem ini terdiri dari *power turbine* itu sendiri, *standard radius elbow* (0,1 kPa), *18-inch bellows* (0,05 kPa), *exhaust silencer* (0,2 kPa), dan *exhaust opener* (0,2 kPa). Maksimum *back pressure* yang diperbolehkan untuk *engine* CAT 3616 ini sebesar 4,0 kPa. Perhitungan *backpressure* akibat pembebanan *power turbine* menggunakan persamaan sebagai berikut

$$P = (MF \times V1 - MF \times V2) / A \tag{7}$$

Dimana P merupakan *Backpressure* (kPa), MF merupakan laju aliran massa (kg/s), V1 merupakan kecepatan aliran sebelum turbin (m/s), V2 merupakan kecepatan aliran sesudah turbin (m/s), dan A merupakan luas saluran *exhaust gas* (m²). Hasil dari perhitungan *backpressure* berdasarkan panjang saluran *exhaust gas*, *backpressure* dari komponen-komponen di saluran *exhaust gas*, dan *backpressure* dari *power turbine*, yang kemudian ditotal akan menjadi nilai *backpressure* sistem.

E. Perhitungan Efek Kondensasi pada Saluran Exhaust Gas

Kondensasi pada *exhaust gas* dapat timbul karena penurunan tekanan dan suhu gas akibat ekspansi dari saluran *exhaust gas* menuju udara luar (atmosfir). Senyawa kimia yang berpotensi mengalami kondensasi adalah SO₃ dan H₂O, yang kemudian interaksi antara dua senyawa tersebut akan membentuk asam sulfat (H₂O + SO₃ → H₂SO₄). Pada penelitian ini perlu diketahui titik pengembunan (*dew point*) pada SO₃ dan H₂O, lalu suhu akhir *exhaust gas* saat di atmosfir. Suhu *exhaust gas* tidak boleh lebih kecil daripada suhu titik pengembunan, jika tidak akan terjadi kondensasi asam sulfat yang mengakibatkan korosi, dan merusak saluran *exhaust gas*. Persamaan yang digunakan untuk mencari titik pengembunan asam sulfat berdasarkan [7] sebagai berikut

$$Vx / Vtot = Px / Ptot \tag{8}$$

$$Td = 1000 / (3,9526 - (0,1863 * LN(P H_2O)) + (0,000867 * LN(PSO_3)) + (0,000913 * LN(H_2O) * LN(PSO_3))) - 273 \tag{9}$$

Dimana Vx merupakan volume substans, Vtot merupakan Volume total gas, Px merupakan tekanan parsial dari senyawa, Ptot merupakan tekanan total gas, P H₂O merupakan tekanan parsial H₂O, dan P SO₃ merupakan tekanan parsial PSO₃.

Sedangkan persamaan untuk menghitung suhu *exhaust gas* pada tekanan atmosfir terlampir berikut:

$$P2 / P1 = (T2 / T1)^{[(k-1)/k]} \tag{10}$$

Dimana P2 merupakan tekanan awal gas, P1 merupakan tekanan atmosfir (1 bar), T2 merupakan suhu awal gas, T1 merupakan suhu gas saat di atmosfir, dan k merupakan rasio kapasitas panas (1,359)

F. Perhitungan dan Pemilihan Generator AC

Setelah dilakukan perhitungan pembebanan pada *Power Turbine* dan pengaruhnya terhadap kinerja *engine*, lalu dilakukan pencarian data spesifikasi Generator AC yang sesuai. Pemilihan tersebut berpatokan pada hasil yang diperoleh dari analisa dikondisi 93,23% *engine* yang notabene merupakan *service rate engine*.

III. HASIL PENELITIAN

Setelah dilakukan perhitungan terhadap beberapa aspek pada sistem *power turbine* tersebut, maka dilakukan analisa efek pembebanan *power turbine* terhadap kinerja *engine*. Hal ini dilakukan untuk melihat apakah *power turbine* tersebut dapat diaplikasikan dan sejauh mana *power turbine* tersebut dapat dioperasikan jika dapat diaplikasikan.

A. Pembebanan Power Turbine

Dari pembebanan *power turbine* terhadap *engine*, akan didapat besaran tekanan akhir *exhaust gas* dan efisiensi turbin. Tekanan akhir *exhaust gas* ini akan menjadi patokan dalam menentukan besaran suhu akhir *exhaust gas*, besar *backpressure* dan ada tidaknya kondensasi pada *exhaust gas*. Berikut merupakan hasil perhitungan pembebanan *power turbine* pada 93,23% *Engine*:

Tabel 2.

P.Elektris kW	P. Aktual kW	P3 kPa	P4 kPa	P3/P4	H Turbine
400	425,53	321,91	186,30	1,73	0,78
350	376,34	321,91	198,26	1,62	0,77
300	322,58	321,91	212,33	1,52	0,77
250	271,74	321,91	226,07	1,42	0,76
200	219,78	321,91	242,36	1,33	0,75
150	166,67	321,91	259,58	1,24	0,74
100	111,11	321,91	278,93	1,15	0,74

B. Pengaruh Pembebanan Power Turbine terhadap Backpressure

Besarnya pembebanan pada *power turbine* berbanding lurus dengan besarnya *backpressure* pada sistem. Dari perhitungan pembebanan *power turbine* yang menghasilkan nilai tekanan akhir *backpressure*, maka kita dapat menentukan besar total *backpressure*. *Backpressure* maksimal yang boleh diterima oleh sistem yaitu < 4,0 kPa Berikut ditampilkan hasil perhitungan besar *backpressure* berdasarkan panjang pipa dan komponen pada tabel 3, serta hasil perhitungan *backpressure power turbine* dan totalnya pada 93,23% *engine* pada tabel 4:

Tabel 3.

Percent	Backpressure by Pipe kPa	Backpressure by Component kPa	Total kPa
100,00	1,74232	0,600	2,342

97,06	1,63246	0,600	2,232
93,23	1,52584	0,600	2,126
88,69	1,42041	0,600	2,020
84,17	1,31835	0,600	1,918
76,57	1,17902	0,600	1,779

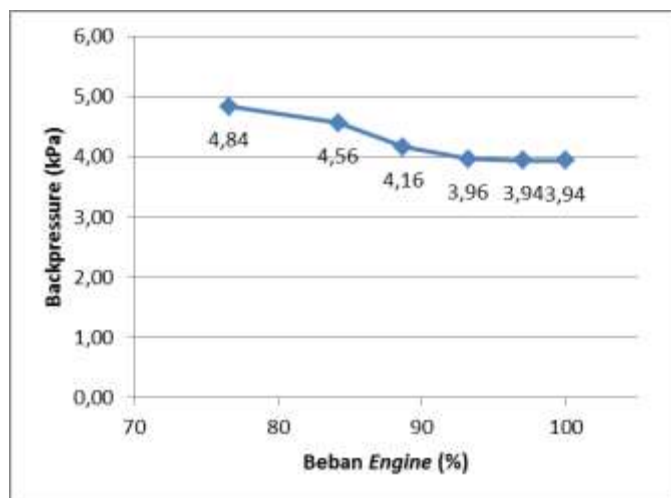
Tabel 4.

Backpressure Power Turbine dan totalnya pada 93,23% Engine

Daya kW	Density Kg/m ³	V Before m/s	V after m/s	BP kPa	Total kPa
400	0,851	103,48	60,991	2,339	4,682
350	0,800	103,48	64,908	2,124	4,466
300	0,747	103,48	69,516	1,870	4,212
250	0,702	103,48	74,014	1,622	3,965
200	0,654	103,48	79,346	1,329	3,671
150	0,611	103,48	84,985	1,018	3,361
100	0,569	103,48	91,317	0,670	3,012

*BP - Backpressure

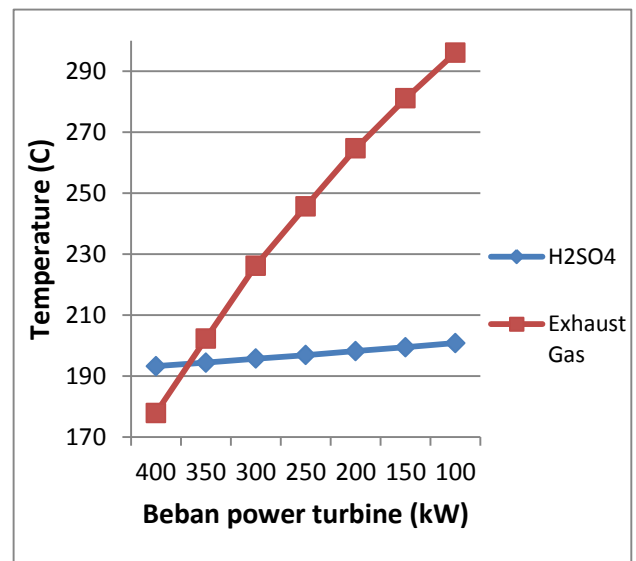
Pada kondisi 93,23%, pembebanan yang memenuhi kondisi adalah pada pembebanan 250 kW. Setelah itu kita melihat pengaruh pembebanan 250 kW pada setiap kondisi engine. Hasilnya terdapat pada grafik berikut:



Gambar 3. Grafik backpressure pada pembebanan 250 kW

C. Pengaruh Pembebanan Power Turbine terhadap Kondensasi asam

Setelah mendapatkan nilai tekanan akhir exhaust gas, kitadapat menentukan suhu akhir exhaust gas, suhu exhasut gas di atmosfer, dan titik pengembunan asam sulfat (H₂SO₄). Berikut akan ditampilkan grafik perbandingan titik pengembunan asam sulfat (H₂SO₄) dan suhu gas di atmosfer pada 93,23% engine:



Gambar. 4. perbandingan titik pengembunan asam sulfat (H₂SO₄) dan suhu gas di atmosfer pada 93,23% engine

Dapat dilihat dari grafik tersebut pada titik 250 kW, yang dimana memenuhi dari segi backpressure, tidak mengalami kondensasi.

D. Analisa Hasil Perhitungan

Secara garis besar, dari perhitungan yang telah dilakukan, kondisi minimum yang harus dipenuhi agar sistem berjalan dengan normal adalah backpressure tidak boleh lebih dari 4,0 kPa dan tidak mengalami kondensasi (suhu gas di atmosfer > titik embun asam sulfat). Dari situ dapat kita lihat bahwa kondisi service rate engine 93,23%, pembebanan power turbine yang bisa diterima oleh engine adalah 250 kW. Setelah kia melihat pada kondisi service rate, kita melihat besar beban power turbin yang bisa diaplikasikan pada kondisi diatas (100% dan 97%) maupun bawah (88,69%, 84,17%, 76,57%). Berikut hasil perhitungan final pada semua kondisi engine:

Tabel 5. Pembebanan Power Turbin di tiap kondisi Engine

Engine %	P. Elektris kW	P. Turbin kW	Press. After kPa	η Turbine	BP kPa
100	250	271,739	283,933835 1	0,754	3,936
97	250	219,780	263,203929 1	0,7449	3,654
93,23	250	166,667	259,583103 2	0,744	3,361
86,69	250	219,780	220,,18976 17	0,753	3,977
84,17	250	166,667	215,600787 6	0,747	3,966
76,57	250	111,111	207,886567 7	0,740	3,917

E. Penentuan Spesifikasi Generator dan Power Turbine

Pemilihan generator yang nanti akan dihubungkan pada *power turbine* didasarkan pada beban *power turbine* yang bisa diterima oleh *engine* pada kondisi 93,23% yang notabene merupakan *service rate engine*. Berikut spesifikasi *power turbine* dan generator yang sesuai:

Spesifikasi Generator

Merk	: Stamford
Type	: EC-385-50Hz
Capacity	: 380 kVA/280 kW
Phase	: 3
Poles	: 4
Power Factor	: 0,8
Efficiency	: 93,5
Frequency	: 50Hz

Spesifikasi Power Turbine

Merk	: ABB
Type	: PTL500
Daya Maksimal	: 500 kW
Pressure Ratio Max	: 3,5
Efisiensi	: 73% - 78%

IV. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan tersebut, dapat disimpulkan:

- 1) *Power Turbine* dapat diaplikasikan pada beban tertentu dengan baik tanpa mengganggu kinerja *engine* secara umum, baik pada *service rate engine* di 93,23%, diatas *service rate engine* (100% dan 97%), dan dibawah *service rate engine* (88,69%; 84,17%; dan 76,57%)
- 2) Dari hasil perhitungan pada penelitian ini, didapatkan bahwa daya listrik yang bisa dihasilkan oleh *power turbine* dari motor diesel CAT 3616-V dengan daya 4920 kW pada *continuous rating* yakni sebesar, **250 kW** (5,08% dari daya *engine* utama) pada kondisi 100%, 97%, dan 93,23% *engine*; **200 kW** (4,07% dari daya *engine* utama) pada kondisi 86,69% *engine*; **150 kW** (3,05% dari daya *Engine* utama) pada kondisi 84,17% *engine*, dan **100 kW** (2,03% dari daya *Engine* utama) pada kondisi 76,57% *engine*.
- 3) Spesifikasi sistem *power turbine* yang tepat untuk diaplikasikan pada penelitian ini yakni, *power turbine* PTL500 dengan daya maksimal 500 kW dan putaran efisiensi 73% - 78% dan generator STAMFORD 380 kVa / 280 kW at 50 Hz dengan kutub 4 dan efisiensi 93,5%

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rasio jenis pembangkit listrik di Indonesia <<http://www.djk.esdm.go.id>>, Desember, 2015
- [2] Safarudin Gazali Herawan; Ahmad Faris Ismail; Azma Putra, "Prediction on Power Produced from Power Turbine as a Waste Heat Recovery Mechanism on Naturally Aspirated Spark Ignition Engine Using Artificial Neural Network", Research Gate, 2016
- [3] Keiichi Shiraishi; Yoshihisa Ono; Kiyoko Sugishita, "Development of Large Marine Hybrid Turbocharger for Generating Electric Power with Exhaust Gas from the Main Engine", Mitsubishi Heavy Industry Technical Review Vol 47 No. 3, September, 2010.
- [4] Keiichi Shiraishi; Yoshihisa Ono, "Hybrid Turbocharger with Intregated High Speed Generator", Mitsubishi Heavy Industry Technical Review Vol 44 No. 1, Maret, 2007.
- [5] Dixon, Hall, "Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery", Elsevier Inc., 2014
- [6] Aungier, R.H., "Turbine Aerodynamics", ASME Press, 2006
- [7] Verhoff F.H., Branchero J., "Predicting Dew Points of Flue Gasses", Chem. Eng. Prog, August 1974.