

PENGARUH PERAWATAN KOMPRESOR DENGAN METODE *CHEMICAL WASH* TERHADAP UNJUK KERJA SIKLUS TURBIN GAS dan KARAKTERISTIK ALIRAN ISENTROPIK PADA TURBIN IMPULS GE MS 6001B di PERTAMINA UP III PLAJU

Ismail Thamrin, Rahmadi Pamungkas
ad1_sigh@yahoo.com

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
Jalan Raya Prabumulih km 32 Indralaya (30662) Ogan Ilir Sumatera Selatan

Abstrak

Sebuah mesin yang sudah digunakan terlalu lama, maka unjuk kerja mesin tersebut akan turun. Untuk mendapatkan unjuk kerja agar tetap terjaga kehandalan dari sebuah mesin, sebagai contoh adalah sistem turbin gas, tidak harus dengan mengembalikan kondisi mesin seperti semula seperti dengan mengganti komponen dari turbin gas yang lama dengan yang baru. Salah satu cara untuk mendapatkan unjuk kerja yang tetap optimal yang dihasilkan dari turbin gas adalah dengan perawatan yang dilakukan terhadap kompresor aksial dengan metode chemical wash. Untuk mengetahui pengaruh perawatan kompresor tersebut maka dilakukan perhitungan efisiensi dengan membandingkan antara sebelum dan sesudah perawatan dan juga perhitungan karakteristik aliran yang terjadi pada turbin. Berdasarkan perhitungan dan analisa yang dilakukan, kerja aktual kompresor menurun sebesar 11,47 kJ/kg, kerja aktual turbin menurun 10,336 kJ/kg, kerja isentropik kompresor meningkat 6,82 kJ/kg, kerja isentropik turbin turbin menurun 13,460 kJ/kg, efisiensi termal siklus turbin gas mengalami kenaikan efisiensi thermal siklus sebesar 2% dan daya yang dihasilkan siklus meningkat sebesar 124,068 kW. Temperatur stagnasi dan statis yang terjadi tiap tingkat turbin sebelum chemical wash lebih tinggi. Tekanan stagnasi dan statis yang terjadi tiap tingkat turbin sebelum chemical wash lebih rendah.

Kata kunci : kerja aktual, kerja isentropik, efisiensi, stagnasi, statis

1. PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Pembangkit listrik di Pertamina UP III Plaju untuk kebutuhan listrik kilang dan perumahan salah satu pembangkitnya menggunakan turbin gas. Turbin Gas MS 6001B adalah sebagai penggerak generator yang keberadaan dan kehandalannya harus tetap terjaga sehingga mampu beroperasi secara terus menerus. Upaya pemeliharaan serta perbaikan yang sesuai tetap selalu ditingkatkan agar diperoleh hasil kerja turbin gas yang optimal. Salah satunya adalah dengan bentuk perawatan yang dilakukan pada kompresor aksial adalah dengan metode *chemical washing*. Peran kompresor pada sistem turbin gas sangatlah penting yaitu sebagai penyuplai dan mengkompresikan udara hingga bertekanan tinggi, jika kinerja kompresor tidak optimal maka akan mengakibatkan pembakaran yang tidak sempurna pada ruang bakar yang secara otomatis energi yang dihasilkan juga kecil. Salah satu bentuk perawatan pada kompresor itulah untuk mengurangi kegagalan atau penurunan unjuk kerja

dari suatu sistem. Metode *chemical washing* pada kompresor aksial adalah salah satu bentuk dari perawatan preventif.

Udara yang telah dikompresikan tersebut masuk ke ruang bakar. Gas hasil pembakaran dialirkan ke turbin melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Turbin dibuat dengan beberapa tingkat karena keterbatasan kemampuan satu tingkat turbin untuk menyerap semua energi gas yang tersedia itu sekaligus secara efisien. Jenis turbin yang digunakan dalam sistem turbin gas MS6001 B ini adalah turbin impuls 3 tingkat. Dalam setiap tingkat terjadi perubahan temperatur, tekanan, kecepatan serta karakteristik lainnya. Untuk mengetahuinya maka perlu dilakukan analisa karakteristik setiap tingkat di turbin.

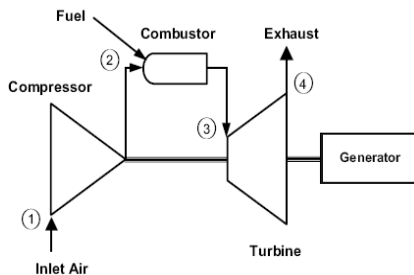
2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. TERMODINAMIKA SIKLUS TURBIN GAS-DAYA POROS

ALIRAN ISENTROPIK PADA TURBIN IMPULS
GE MS 6001B di PERTAMINA UP III PLAJU

Analisis termodinamika siklus turbin gas yang ideal digunakan sebagai pedoman keberhasilan turbin gas pada keadaan sebenarnya dalam usaha peningkatan prestasi setiap komponen dan sistem turbin gas secara keseluruhan. Dalam kaitan ini keberhasilan mendekati proses ideal akan diukur dengan efisiensinya atau efisiensi merupakan parameter yang menyatakan derajat keberhasilan komponen atau sistem turbin gas mendekati desain atau proses yang ideal.

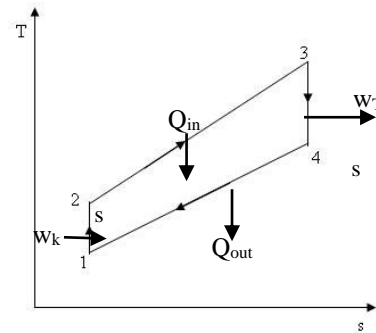
2.1.1. Siklus Ideal Turbin Gas



Gambar 1: Siklus Turbin Gas Sederhana

Pada siklus ideal turbin gas berlaku asumsi berikut ini:

- Fluida kerja dianggap gas ideal dengan panas spesifik yang konstan.
- Laju aliran massa gas adalah konstan sepanjang siklus berlangsung, dan tidak merubah komposisi dan sifat kimianya.
- Proses siklus berlangsung adiabatik; selisih energi potensial antara fluida masuk dan keluar setiap komponen dan sistem turbin gas diabaikan karena relatif sangat kecil.
- Proses kompresi di dalam kompresor, dan proses ekspansi di dalam turbin dan nosel dianggap isentropik.
- Proses pembakaran berlangsung kontinu pada tekanan konstan dan adiabatik. Proses pembakaran dapat pula dianggap sebagai proses kenaikan temperatur yang terjadi oleh pemanasan fluida kerja dengan sejumlah panas yang sama dengan panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar.
- Tidak ada kerugian tekanan pada aliran gas dalam saluran isap, ruang bakar, *intercooler*, saluran buang dan dalam saluran antara setiap komponen.



Gambar 2: Diagram T-s Siklus Turbin Gas Sederhana

Siklus Brayton terdiri dari proses :

- 1 – 2s proses kompresi isentropik di dalam kompresor
- 2s – 3 proses pemasukan kalor pada tekanan konstan di dalam ruang bakar
- 3 – 4s proses ekspansi isentropik di dalam turbin
- 4s – 1 proses pembuangan kalor tekanan konstan

2.1.2. Siklus Turbin Gas Sebenarnya

Pada kenyataannya tidak ada proses yang ideal, tetap terjadi kerugian-kerugian yang dapat menyebabkan turunnya daya yang dihasilkan turbin gas dan berakibat pada menurunnya performansi turbin gas itu sendiri. Sebab-sebab terjadinya kerugian antara lain :

- Kompresi dan proses ekspansi adiabatik takmampu-balik yang menyebabkan penambahan entropi.
- Adanya gesekan fluida yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan di ruang bakar
- Berubahnya nilai kalor spesifik, c_p dari fluida kerja akibat terjadinya perubahan temperatur dan perubahan komposisi kimia dari fluida kerja.

2.1.2.1. Proses Isentropik

Untuk sebuah proses isentropik ($s_2 = s_1$), persamaan gas sempurna akan menjadi:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\gamma/\gamma-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{\gamma}$$

2.1.2.2. Properti Stagnasi

Kondisi stagnasi merupakan kondisi yang akan dicapai oleh suatu fluida jika berada pada keadaan mampu balik, adiabatik dan tanpa perpindahan kerja. Kondisi stagnasi pada suatu fluida juga tercapai jika kecepatan aliran fluida menurun menjadi kecepatan nol secara isentropik. Dari

persamaan aliran energi tanpa adanya efek gravitasi dapat diketahui persamaan untuk temperatur stagnasi dan entalpi stagnasi :

Entalpi stagnasi
$$h_t = h + \frac{V^2}{2g_c}$$

Temperatur stagnasi
$$T_t = T + \frac{V^2}{2g_c c_p}$$

2.1.2.3. T/T_t dan P/P_t sebagai Fungsi dari Bilangan Mach

Dengan menggunakan penggambaran untuk Bilangan Mach, dapat ditentukan beberapa hubungan untuk memberikan rasio sifat-sifat aliran gas termasuk aliran Bilangan Mach itu sendiri. Dua diantaranya adalah rasio untuk T/T_t dan P/P_t.

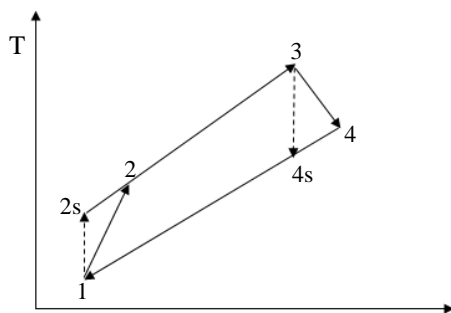
Pers.2.18 (lit. 3 hal 101)

$$\frac{T}{T_t} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)}$$

$$\frac{P}{P_t} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}$$

2.1.2.4. Efisiensi Kompresor dan Turbin

Efisiensi kompresor bisa digambarkan sebagai rasio dari kerja (W) yang dibutuhkan untuk kompresi isentropik dari input kerja yang aktual. Pada analisa siklus ideal, diasumsikan bahwa energi kinetik bernilai sama sebelum dan sesudah proses. Akan tetapi pada siklus turbin gas yang sebenarnya perubahan energi kinetik berpengaruh dan oleh karena itu asumsi ini tidak berlaku. Oleh karena itu pada kondisi yang sebenarnya harus dipikirkan properti stagnasi untuk menghitung kerja pada berbagai komponen. Gambar 3, menunjukkan diagram untuk siklus sederhana.



Gambar 3: Diagram T-s untuk Siklus Sederhana Turbin Gas Aktual

Efisiensi kompresor dilambangkan oleh

$$\eta_k = \frac{\text{kerja isentropik kompresor}}{\text{kerja aktual kompresor}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{c_{pa} (T_{2s} - T_1)}{c_{pa} (T_2 - T_1)}$$

Efisiensi dari turbin dapat ditulis sebagai

$$\eta_T = \frac{\text{kerja aktual turbin}}{\text{kerja isentropik turbin}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = \frac{c_{pg} (T_3 - T_4)}{c_{pg} (T_3 - T_{4s})}$$

Efisiensi siklus dirumuskan

$$\eta = \frac{W_N}{f LHV_{fuel}}$$

2.2. TURBIN

Karena proses aliran gas di dalam turbin adalah ekspansi, sudu turbin dapat dibuat dengan sudut belok lebih besar daripada sudu kompresor. Pada unit daya tinggi, turbin dibuat dengan beberapa tingkat karena keterbatasan kemampuan satu tingkat turbin untuk menyerap semua energi gas yang tersedia itu sekaligus secara efisien.

Satu tingkat turbin terdiri dari satu baris sudu tetap atau nosel dan satu baris gerak berikutnya. Proses ekspansi dapat terjadi di dalam sudu tetap ataupun di dalam sudu gerak. Apabila ekspansi hanya terjadi di dalam sudu tetap maka tingkat yang bersangkutan dinamai tingkat impuls. Sedangkan apabila ekspansi terjadi baik di dalam sudu tetap maupun sudu gerak, tingkat tersebut dinamai tingkat reaksi.

2.2.1. Turbin Impuls

Jenis turbin yang digunakan pada turbin gas MS 6001B adalah turbin impuls. Pada tingkat impuls, tidak terjadi penurunan tekanan pada sudu gerak (rotor). Gas diekspansikan di sudu tetap (stator), yang mengubah energi panas menjadi energi kinetik. Kecepatan gas yang tinggi mengenai sudu dimana sebagian besar energi kinetik diubah menjadi kerja poros turbin. Penurunan tekanan statis terjadi di stator. Kecepatan absolut kemudian berkurang di rotor, tetapi tekanan statis dan kecepatan relatif tetap, kecepatan relatif masuk rotor sama dengan kecepatan relatif keluar rotor.

Aliran geometri masuk dan keluar tingkat diuraikan dengan segitiga kecepatan (Lihat gambar 3). Segitiga kecepatan mempunyai tiga komponen:

- (i) kecepatan aksial rotor, (u)
- (ii) kecepatan absolut gas, (c)
- (iii) kecepatan relatif gas, (w)

Asumsi aliran-aliran yang terjadi untuk jenis turbin impuls adalah :

1. sudut-sudut yang dibentuk

$$\beta_2 = \beta_3 ; \alpha_3 = \alpha_2' ; \beta_2' = \beta_3'$$

2. kecepatan-kecepatan yang terjadi

$$w_2 = w_3 ; c_3 = c_2' ; w_2' = w_3'$$

Untuk faktor pemanfaatan maksimum , $c_{3'} = 0$ dan

$$P_2 = 5,66 \text{ bar} = 566 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$\bar{m}_a = 132,723 \text{ kg/s}$$

$$\bar{m}_f = 3,65 \text{ ton/jam} = 1,014 \text{ kg/s}$$

$$\text{LHV} = 42207,596 \text{ kJ/kg}$$

b. Turbin

Dari data lapangan diperoleh

$$P_3 = P_2 = 5,66 \text{ bar} = 566 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$T_3 = 859^\circ\text{C} = 1132,15 \text{ K}$$

$$T_4 = 547^\circ\text{C} = 820,15 \text{ K}$$

$$P_4 = 1,03 \text{ bar} = 103 \times 10^3 \text{ Pa}$$

3.2. Sesudah *Chemical Wash*

a. Kompresor

Dari data lapangan diperoleh

$$P_1 = 14,7 \text{ psi} = 101,325 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$T_1 = 29^\circ\text{C} = 302,15 \text{ K}$$

$$T_2 = 295^\circ\text{C} = 568,15 \text{ K}$$

$$P_2 = 5,94 \text{ bar} = 594 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$\bar{m}_a = 132,723 \text{ kg/s}$$

$$\bar{m}_f = 3,47 \text{ ton/jam} = 0,964 \text{ kg/s}$$

$$\text{LHV} = 42207,596 \text{ kJ/kg}$$

b. Turbin

$$P_3 = P_2 = 5,94 \text{ bar} = 594 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$T_3 = 800^\circ\text{C} = 1073,15 \text{ K}$$

$$T_4 = 497^\circ\text{C} = 770,15 \text{ K}$$

$$P_4 = 1,03 \text{ bar} = 103 \times 10^3 \text{ Pa}$$

4. PERHITUNGAN dan ANALISA

Perhitungan dilakukan pada siklus turbin gas dengan menghitung kerja aktual, kerja isentropis dan efisiensi tiap komponen serta efisiensi siklus sebelum dan sesudah kompresor dilakukan perawatan dengan metode *chemical wash*, hasil perhitungan seperti pada tabel 1:

Tabel 1: Hasil Perhitungan Siklus Antara Sebelum dan Sesudah *Chemical Wash* di Kompresor

Properti		Sebelum <i>Chemical Wash</i>	Sesudah <i>Chemical Wash</i>
wK	(kJ/kg)	282,26	270,79
wKs	(kJ/kg)	191,1	197,92
NK	(kW)	37462,394	35940,061
η_K	(%)	68	73
Qin	(kJ/kg)	42798,502	40688,123
wT	(kJ/kg)	358,18	347,844
wTs	(kJ/kg)	450,44	436,98
T	(kW)	47900,486	46502,221
η_T	(%)	79,5	79,6
N	(kW)	10438,092	10562,160
η_{Th}	(%)	24	26

4.1. Pengaruh *Chemical Wash* Terhadap Kerja Aktual

Kerja aktual kompresor menurun sebesar 11,47 kJ/kg. Hal ini disebabkan oleh temperatur keluar kompresor sesudah *chemical wash* menurun 11 °K dibandingkan sebelum *chemical wash* debu dan zat pengotor lainnya yang ikut masuk ke dalam kompresor yang mengendap pada sudu-sudu tersebut telah bersih sehingga aliran udara pada setiap tingkat akan lebih optimal dan gaya gesekan udara juga menjadi berkurang.

Pengaruh terhadap kerja aktual turbin mengakibatkan kerja aktual turbin menurun 10,336 kJ/kg, karena kerja aktual yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor sesudah *chemical wash* menurun.

4.2. Pengaruh *Chemical Wash* Terhadap Kerja Isentropik

Kerja isentropik kompresor karena *chemical wash* ini mengakibatkan kerja isentropik kompresor meningkat sebesar 6,82 kJ/kg. Hal ini disebabkan oleh rasio kompresi kompresor meningkat.

Pengaruh *Chemical Wash* terhadap kerja isentropik turbin mengakibatkan kerja isentropik turbin menurun 13,460 kJ/kg.

4.3. Pengaruh *Chemical Wash* Terhadap Efisiensi

Efisiensi kompresor meningkat sebesar 5 %. Hal yang mempengaruhi adalah kerja aktual dan kerja isentropik kompresor tersebut. Dalam perhitungan efisiensi kompresor berbanding lurus dengan kerja isentropik kompresor dan berbanding terbalik dengan kerja aktual kompresor.

Untuk turbin hampir tidak ada pengaruh sama sekali terhadap efisiensinya, hanya sedikit kenaikan efisiensi sebesar 0,1 %.

Efisiensi termal siklus mengalami kenaikan sebesar 2 %, hal ini karena konsumsi bahan bakar menurun sedangkan daya yang dihasilkan siklus meningkat sebesar 124,068 kW.

Perhitungan juga dilakukan pada tiap tingkat turbin untuk mengetahui perbedaan nilai karakteristik aliran isentropik sebelum dan sesudah *chemical wash* di kompresor. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel 2 dan 3.

Tabel 2: Hasil Perhitungan Karakteristik Aliran Isentropis pada Turbin Sebelum *Chemical Wash* di Kompresor

Pro perti	Tingkat 1			
	Station a		Station b	
	a	aR	bR	b
V (m/s)	777,767	682,816	682,816	594,071
W (m/s)	673,566	561,305	561,305	449,044
A (°)	60			49,11
B (°)		55,29	55,29	
Tt (°K)	1132,15	1071,79	1071,79	1022,454
T (°K)	868,880	868,880	868,880	868,880

ALIRAN ISENTROPIK PADA TURBIN IMPULS
GE MS 6001B di PERTAMINA UP III PLAJU

Pt(x10 ³ Pa)	566,000	454,540	454,540	376,394
P(x10 ³ Pa)	196,198	196,198	196,198	196,198

Pro perti	Tingkat 2			
	Station c		Station d	
	c	cR	dR	d
V (m/s)	594,071	514,419	514,419	449,045
W (m/s)	449,044	336,783	336,783	224,522
A (°)	49,11			30
B (°)		40,89	40,89	
Tt (°K)	934,697	896,270	896,270	868,880
T (°K)	781,101	781,101	781,101	781,101
Pt(10 ³ Pa)	262,805	222,153	222,153	196,198
P(x10 ³ Pa)	128,099	128,099	128,099	128,099

Pro perti	Tingkat 3			
	Station e		Station f	
	e	eR	fR	f
V(m/s)	449,045	404,759	404,759	388,884
W(m/s)	224,522	224,522	112,261	0
A (°)	30			0
B (°)		16,1	16,1	
Tt(°K)	825,002	808,546	808,546	803,603
T (°K)	737,245	737,245	737,245	737,245
Pt(10 ³ Pa)	159,444	147,087	147,087	143,523
P(x10 ³ Pa)	101,644	101,644	101,644	101,644

Tabel 3: Hasil Perhitungan Karakteristik Aliran Isentropis pada Turbin Sesudah *Chemical Wash* di Kompresor

Pro perti	Tingkat 1			
	Station a		Station b	
	a	aR	bR	b

4.4. Pengaruh *Chemical Wash* Terhadap Kecepatan Aliran Gas di Turbin

Kecepatan aliran gas sebelum *chemical wash* kompresor yang terjadi pada tiap tingkat di turbin lebih tinggi karena selisih antara temperatur stagnasi dan temperatur statisnya lebih besar.

4.5. Pengaruh *Chemical Wash* Terhadap Temperatur Stagnasi dan Statis di Turbin

Temperatur stagnasi sesudah *chemical wash* kompresor yang terjadi tiap tingkat turbin lebih rendah karena temperatur stagnasi masuk ke turbin lebih rendah daripada temperatur stagnasi sebelum perawatan dan juga dipengaruhi oleh temperatur statis dan kecepatan aliran yang terjadi pada tiap tingkat.

Temperatur statis berbanding lurus terhadap temperatur stagnasi.

V(m/s)	757,231	664,787	664,787	578,385
W(m/s)	655,782	546,485	546,485	437,188
A (°)	60			49,11
B (°)		55,29	55,29	
Tt(°K)	1073,15	1015,938	1015,938	969,170
T (°K)	823,599	823,599	823,599	823,599
Pt(10 ³ Pa)	594,000	477,026	477,026	395,013
P(x10 ³ Pa)	205,903	205,903	205,903	205,903

Pro perti	Tingkat 2			
	Station c		Station d	
	c	cR	dR	d
V (m/s)	578,385	500,836	500,836	437,188
W (m/s)	437,188	327,891	327,891	218,594
A (°)	49,11			30
B (°)		40,89	40,89	
Tt (°K)	885,986	849,561	849,561	823,598
T (°K)	740,394	740,394	740,394	740,394
Pt(10 ³ Pa)	243,668	205,976	205,976	181,910
P(x10 ³ Pa)	118,771	118,771	118,771	118,771

Pro perti	Tingkat 3			
	Station e		Station f	
	e	eR	fR	f
V(m/s)	437,188	437,188	437,188	378,616
W(m/s)	218,594	109,297	109,297	0
A (°)	30			0
B (°)		16,1	16,1	
Tt (°K)	782,006	782,006	782,006	761,210
T (°K)	698,822	705,163	705,163	705,163
Pt(10 ³ Pa)	147,832	147,832	147,832	132,712
P(x10 ³ Pa)	94,243	94,243	94,243	94,243

4.6. Pengaruh *Chemical Wash* Terhadap Tekanan Stagnasi dan Statis di Turbin

Tekanan stagnasi dan statis sesudah *chemical wash* kompresor yang terjadi tiap tingkat turbin lebih tinggi karena rasio kompresi di kompresor meningkat yang diakibatkan proses penaikan tekanan yang dilakukan kompresor dapat lebih optimal karena debu dan zat pengotor lainnya yang ikut masuk ke dalam kompresor yang mengendap pada sudu-sudu tersebut telah bersih maka *clearance* antara sudu rotor dan stator menjadi lebih besar sehingga proses penaikan tekanan pada setiap tingkat lebih optimal.

5. KESIMPULAN dan SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan dan analisa yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Perawatan kompresor dengan metode *chemical wash* akan mempengaruhi peningkatan efisiensi siklus turbin gas. Dengan kerja aktual yang lebih rendah dapat menghasilkan daya yang lebih tinggi.
2. Karena debu dan zat pengotor lainnya yang ikut masuk ke dalam kompresor yang mengendap pada sudu-sudu tersebut telah bersih mengakibatkan temperatur udara keluar menurun, tekanan naik dan densitas udara (dari hubungan Hukum Gas Ideal; $P V = n R T$) naik. Densitas udara naik menyebabkan bahan bakar yang dipakai untuk pembakaran berkurang.

5.2. Saran

Salah satu indikasi bahwa kompresor mulai kotor adalah temperatur gas masuk turbin telah mendekati batas atas temperatur yang telah ditetapkan, maka harus tetap dipantau oleh operator di ruang kendali, dan juga untuk menjaga agar umur pakai turbin lebih panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arismunandar, Wiranto. *Pengantar Turbin Gas dan Motor Propulsi*. Jakarta : Dirjen Dikti Depdiknas. 2002.
- [2] Ganesan, V. *Gas Turbine 2nd Edition*. New Delhi : Tata McGraw-Hill. 2003.
- [3] Mattingly, Jack.D. *Element of Propulsion : Gas Turbine and Rockets*. Reston, Virginia : The American Institute of Aeronautics, Inc. 2006.