

ANALISIS PENGARUH KANDUNGAN KARBON TETAP PADA BATUBARA TERHADAP EFISIENSI KETEL UAP PLTU TANJUNG JATI B UNIT 2

Mulyono, Sudjito

Program Studi Teknik Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Semarang
Jl. Prof. H. Sudarto, S.H., Tembalang, Semarang, 50275, PO BOX 6199/SMS
Telp. (024)7473417, 7499585, Faks. (024) 7472396
<http://www.polines.ac.id>, e-mail : sekretariat@polines.ac.id

ABSTRAK

Ketel uap merupakan komponen utama dalam sistem pembangkit yang digunakan untuk mengubah fasa cair menjadi fasa uap. Agar pembangkit dapat dioperasikan secara kontinue ketel uap harus menggunakan jenis batu bara yang tepat sehingga efisiensi ketel uap tetap terjaga tinggi dan produksi listrik dapat terpenuhi. Penulisan artikel ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kandungan dari karbon tetap pada batu bara terhadap efisiensi dari ketel uap pada PLTU Tanjung Jati B Unit 2 antara tanggal 28 Juni 2012 hingga 20 Februari 2014. Untuk menghitung efisiensi ketel uap menggunakan metode kehilangan panas yang berdasarkan American Society of Mechanical Engineers Power Test Codes (ASME PTC) 4.1 Steam Generating Units dan 19.10 Flue And Exhaust Gasses Analyses. Hasil analisis menunjukkan bahwa karakteristik efisiensi ketel uap terhadap kandungan karbon tetap semakin menaik. Efisiensi ketel uap tertinggi adalah 89,91% pada saat nilai karbon tetap 44,84% dan efisiensi ketel uap terendah adalah 88,36% pada saat nilai karbon tetap 38,38%. Kenaikan efisiensi ketel uap rata-rata tiap 1% kenaikan karbon tetap adalah 0,2678%.

Kata kunci: efisiensi, ketel uap, metode kehilangan panas

I. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B Unit 1-4 merupakan pembangkit yang dapat memasok tenaga listrik sebesar 11,5 % dari kebutuhan sistem Jawa-Madura-Bali. Untuk memproduksi tenaga listrik tersebut pembangkit ini menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya. PLTU Tanjung Jati B menggunakan dua jenis batu bara, yaitu nilai kalor menengah (*medium calorie value*) yang mempunyai nilai kalori lebih dari 5600 kkal/kg dan nilai kalor rendah (*low calorie value*) yang mempunyai nilai kalori 5100 sampai 5600 Kcal/Kg.

Pada PLTU Tanjung Jati B adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas dari uap untuk memutar turbin sehingga dapat digunakan untuk membangkitkan energi listrik melalui generator. Uap ini dihasilkan dari batu bara yang dibakar di ketel uap yang akan menghasilkan panas yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap kering. Jadi sistem PLTU pada umumnya menggunakan beberapa peralatan utama, yaitu: ketel uap, turbin, generator dan kondensor.

Pemakaian berbagai jenis batu bara yang berbeda – beda akan menyebabkan efisiensi dari ketel uap berubah - ubah. Karena pada jenis – jenis batu bara yang berbeda itulah

memiliki nilai kandungan karbon tetap yang berbeda pula tiap batu bara yang digunakan. Sebab apabila kandungan karbon tetap pada batu bara semakin besar, maka semakin besar pula energi panas yang dapat dihasilkan pada saat terjadi pembakaran. Hal tersebut akan menyebabkan efisiensi ketel uap meningkat.

II. LANDASAN TEORI

2.1 Ketel uap

Ketel uap atau yang biasanya disebut ketel uap merupakan salah satu peralatan yang sangat penting di dalam suatu pembangkit tenaga listrik. Alat ini merupakan alat penukar panas (*heat exchanger*), dimana energi panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar batu bara akan digunakan untuk mengubah fase air menjadi uap. Uap yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi inilah yang nantinya digunakan sebagai media penggerak utama turbin uap dan diteruskan ke generator untuk pembangkitan tenaga listrik.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Jati B Unit 1-2 merupakan pembangkit yang dapat menghasilkan daya bersih sebesar 2 x 660 MW. Pada unit tersebut terdapat beberapa komponen penting untuk menghasilkan energi listrik, salah satunya adalah ketel uap. Ketel uap pada PLTU

Tanjung Jati B merupakan ketel uap yang menggunakan jenis ketel uap pipa air dimana air atau fluida kerja berada didalam pipa-pipa yang dipanasi oleh gas hasil pembakaran dari batu bara yang terjadi dibagian luar. Ketel uap pipa air mempunyai efisiensi total yang lebih besar dari ketel uap pipa api. Selain itu sistem pembakaran yang digunakan adalah front and rear dimana alat pembakar (burner) yang berjumlah 36 buah diposisikan berhadapan untuk mendapatkan aliran yang berlapis (laminar).

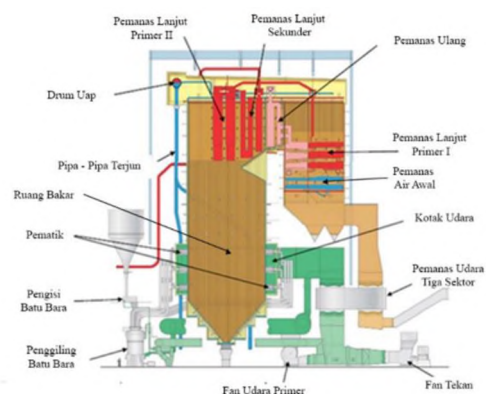
Berikut ini adalah spesifikasi dari ketel uap yang digunakan pada PLTU Tanjung Jati B unit 1-2.

Tabel 2.1 Spesifikasi ketel uap PLTU Tanjung Jati B Unit 1-2

Jenis	Sub kritis
Tekanan saat operasi	175 bar a
Aliran uap utama	2.313 ton/jam
Temperatur uap utama	541 °C
Tekanan uap utama	174.2 bar
Aliran uap pemanas ulang	1.895 ton/jam
Temperatur uap pemanas ulang	539 °C
Temperatur air pengisi	288 °C
Penggilingan batu bara	5 operasi 1 standby
Laju aliran batu bara	263,58 ton/jam
Bahan bakar penyalaan awal	HSD (<i>High Speed Diesel</i>)
Sistem pembakaran	36 pembakar batu bara rendah Nox

Ketel uap PLTU Tanjung Jati B Unit 1-2 merupakan ketel uap yang direncanakan oleh *Babcock & Wilcox Company* dengan tipe *Radiant Boiler*. *Radiant Boiler* merupakan jenis ketel uap yang perpindahan panas yang terjadi sebagian besar secara radiasi dari api di ruang bakar ke pipa – pipa yang berisi air pada ketel uap. Ketel uap pada PLTU Tanjung Jati B menggunakan bahan bakar batu bara yang dihaluskan (*pulverized coal*) terlebih dahulu agar pembakaran batu bara menjadi lebih sempurna.

Berikut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 merupakan bagian-bagian utama pada ketel uap PLTU Tanjung Jati B Unit 1-2.



Gambar 2.6 Bagian – bagian utama ketel uap (sumber: The Babcock & Wilcox Company. 2004. Tanjung Jati B Training Boiler Overview)

Keterangan:

1. Ruang bakar (*furnace*), merupakan tempat terjadinya pembakaran batu bara untuk memanaskan air di dalam pipa – pipa ketel uap.
2. Pemanas air awal (*economizer*), berfungsi sebagai pemanas air pengisi ketel uap sebelum masuk ke drum uap yang memanfaatkan panas dari gas buang untuk memanaskan air.
3. Drum uap (*steam drum*), berfungsi sebagai penampung air pengisi ketel uap setelah melewati *economizer* dan juga memisahkan antara fasa cair dan gas. Dimana fasa cair akan diteruskan ke *downcomer* dan fasa gas akan diteruskan ke pemanas lanjut primer I (*primary superheater I*).
4. Pipa – pipa saluran air turun (*downcomer pipes*), merupakan pipa aliran dari steam drum yang akan melewati ruang bakar sehingga air tersebut berubah fasanya menjadi gas dan selanjutnya akan diteruskan ke *primary superheater I* agar menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*).
5. Pemanas lanjut primer I (*primary superheater I*), berfungsi meningkatkan suhu uap hingga menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*). Pemanasan yang uap yang terjadi secara radiasi langsung dari pembakaran di dalam ruang bakar yang akan diteruskan menuju ke pemanas lanjut primer II.
6. Pemanas lanjut primer II (*primary superheater II*), berfungsi menerima uap dari pemanas lanjut primer I untuk dilakukan pemanasan lanjutan.

7. Pemanas lanjut sekunder (*secondary superheater*), berfungsi melakukan pemanasan terhadap uap setelah melewati pemanas lanjut primer II. Uap yang keluar memiliki temperatur 541 °C dan tekanan 170 bar absolute yang selanjutnya akan digunakan untuk memutar turbin tekanan tinggi (*high pressure turbine*).
8. Pemanas ulang (*reheater*), berfungsi untuk memanaskan kembali uap yang setelah digunakan untuk memutar turbin tekanan tinggi hingga mencapai temperatur sekitar 539 °C dan tekanan 38 bar gauge, yang selanjutnya akan digunakan kembali untuk memutar turbin tekanan menengah (*intermediate pressure turbine*).
9. Pemanas udara tiga sektor (*tri-sector air heater*), berfungsi untuk menukarkan panas dari gas buang yang keluar dari ketel uap ke sistem aliran udara primer dan sekunder.
10. Fan udara primer (*primary air fan*), berfungsi menyediakan suplai 33% udara pembakaran menuju ke penghancur batu bara sehingga dapat menghembuskan serbuk batu bara menuju ke pembakar dan membantu mengurangi kadar air (*moisture*) batu bara.
11. Fan Tekan (*force draught fan*), berfungsi untuk menyediakan suplai udara sekunder (*secondary air*) pembakaran ke ruang bakar sebesar 66% dari kebutuhan udara total.
12. Penggiling batu bara (*coal pulverizer*), berfungsi untuk menghancurkan batu bara hingga menjadi serbuk batu bara yang mempunyai ukuran 200 mesh yang selanjutnya akan diteruskan untuk dilakukan pembakaran batu bara di ruang bakar.
13. Pengisi batu bara (*coal feeder*), berfungsi untuk mengatur jumlah aliran batu bara yang akan masuk ke dalam penghancur batu bara, didesain dengan keluaran maksimum 68,5 ton/jam.
14. Pematik (*ignitor*), berfungsi menyediakan sumber pengapian dan membantu menstabilkan nyala api ketika masukan batu bara relatif sedikit.
15. Kotak udara (*windbox*), merupakan tempat untuk mengarahkan udara sekunder yang akan dihembuskan ke pembakar.

2.2 Analisis batu bara

“Ada dua basis analisis batu bara, yakni analisis proksimasi dan analisis ultimasi. Kedua sistem analisis ini memberikan fraksi – fraksi massa dari komponen–komponen didalam batu bara. Oleh karena kadar abu dan kebasahan suatu batu bara tertentu sangat bervariasi maka biasanya laporan analisis batu bara dibuat dengan basis bebas abu dan bebas kebasahan, baik secara proksimasi maupun secara ultimasi. Namun untuk perhitungan pembakaran dan pengangkutan batu bara, analisis ini harus dikonversi ke dalam basis ketika dibakar atau ketika diterima, yang mengikutsertakan kedua fraksi abu dan kebasahan dalam batu bara tersebut.”(Prasetyo, 1996).

Analisis proksimasi adalah analisis batu bara yang paling sederhana dan menghasilkan fraksi masa dari karbon tetap (FC), bahan mudah menguap (VM), kandungan air (mf), dan abu (A) dalam batu bara. Analisis ini dapat dilakukan dengan menimbang, memanaskan dan membakar sebuah sampel kecil batu bara. Suatu sampel batu bara yang dihaluskan, ditimbang lalu dipanaskan dengan temperatur mencapai 110 °C selama 20 menit. Sampel ini kemudian ditimbang kembali dan kehilangan massa dibagi dengan massa semula akan memberikan fraksi massa dari kandungan air sampel batu bara. Sampel kembali dipanaskan dengan temperatur 954 °C dalam sebuah tabung tertutup selama 7 menit, dan sesudah itu kembali ditimbang. Massa yang hilang akan dibagi dengan massa semula akan menghasilkan fraksi massa dari bahan yang mudah menguap didalam sampel. Sampel kemudian dipanaskan hingga temperatur 732 °C dalam sebuah cawan peleburan hingga terbakar sempurna. Sisa dari sampel tersebut kemudian ditimbang dan berat terakhir dibagi dengan berat semula maka akan menghasilkan fraksi abu. Fraksi massa dari karbon tetap diperoleh dengan cara menguraikan fraksi kebasahan, bahan yang mudah menguap dan abu dari kesatuan. Sebagai tambahan terhadap

FC, VM, mf, dan A, kebanyakan analisis proksimasi juga memuat nilai pembakaran tinggi (HHV) batu bara.

Analisis ultimasi batu bara adalah suatu analisis laboratorium yang memuat fraksi massa karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), sulfur (S) dan nitrogen (N) didalam batu bara. Analisis ultimasi diperlukan untuk menentukan kebutuhan udara pembakaran untuk suatu sistem tertentu, pada gilirannya digunakan untuk mengukur sistem aliran bagi dapur pembakaran.

III. PENGAMBILAN DATA

Proses pengambilan data untuk memperoleh efisiensi ketel uap yang dilakukan pada saat PKL (Praktek Kerja Lapangan) yang dilaksanakan di PLTU Tanjung Jati B unit 1 dan 2 mulai tanggal 26 Januari 2015 hingga 24 April 2015. Sedangkan paramater data yang diambil guna menentukan efisiensi ketel uap adalah pada saat beban bersih maksimal 660 MW dengan variasi kandungan pada batu bara khususnya nilai karbon tetap. Parameter data perhitungan yang didapatkan pada unit 1 dan 2 PLTU Tanjung Jati B pada saat operasi tanggal 28 Juni 2012 (Data 1), 27 November 2012 (Data 2), 27 November 2013 (Data 3), 25 November 2013 (Data 4), 12 Februari 2013 (Data 5), 18 Februari 2014 (Data 6), 19 Februari 2014 (Data 7) dan 20 Februari 2014 (Data 8).

Pengambilan data yang dilakukan guna mengetahui efisiensi ketel uap adalah pengambilan data secara langsung dengan mencatat data hasil dari *performance test*. *Performance test* merupakan kegiatan yang dilakukan oleh Litbang PT PLN (Persero) untuk mengetahui prestasi dari PLTU Tanjung Jati B. Berikut ini adalah tahapan pengambilan data yang diperlukan untuk proses perhitungan efisiensi ketel uap.

- a. Komposisi batu bara
- b. Kandungan O₂ dan CO gas buang
- c. Temperatur gas buang
- d. Temperatur dan kelembaban udara sekitar
- e. Kandungan karbon abu

IV. PEMBAHASAN DAN ANALISIS DATA

Pembahasan data menggunakan salah satu contoh perhitungan data 1 dengan kondisi beban maksimal bersih sebesar 660 MW pada PLTU Tanjung Jati B Unit 2 yang digunakan untuk menganalisa data yang telah didapatkan. Pada pembahasan ini menggunakan perhitungan yang menggunakan persamaan ASME PTC 19.10 *Flue And Exhaust Gas Analyses* dan ASME PTC 4.1 *Steam Generating Units* untuk mengetahui nilai efisiensi ketel uap.

- a. Perhitungan kehilangan panas karena karbon yang tidak terbakar (L_{UC})

$$\begin{aligned} L_{UC} &= UBC \times 14500 \times 2,326 \\ &= 0,00156 \times 14500 \times 2,326 \\ &= 52,63 \text{ kJ/kg batu bara} \end{aligned}$$

Atau dalam % HHV

$$\begin{aligned} L_{UC} (\%) &= \frac{L_{UC}}{HHV} \times 100\% \\ &= \frac{52,63}{25119,13} \times 100\% = 0,21 \% \end{aligned}$$

- b. Perhitungan kehilangan panas pada gas buang (L_G)

Kehilangan panas ini terjadi karena temperatur gas buang yang masih tinggi walaupun telah melewati pemanas udara dan ekonomiser namun tidak dapat digunakan lagi untuk ketel uap.

$$\begin{aligned} L_G &= W_{g15} \times C_{pG} \times (t_{G15} - t_{RA}) \\ &= 9,76 \times 1,016 \times (152,27 - 39,27) \\ &= 1040,43 \text{ kJ/kg batu bara} \end{aligned}$$

Atau dalam % HHV

$$\begin{aligned} L_G (\%) &= \frac{L_G}{HHV} \times 100\% \\ &= \frac{1040,43}{25119,13} \times 100\% = 4,14 \% \end{aligned}$$

- c. Perhitungan kehilangan panas akibat kandungan air dalam batu bara (L_{mf})

Kehilangan panas ini dikarenakan terdapat kandungan air (moisture) yang terdapat pada batu bara. Hal ini menyebabkan batu bara ketika dibakar pada ruang bakar (*furnace*) akan berlangsung lebih lama.

$$\begin{aligned} L_{mf} &= \frac{mf \times (h_{l5} - h_{Rw})}{100} \\ &= \frac{15,86 \times (2763,58 - 147,93)}{100} \\ &= 395,22 \text{ kJ/kg batu bara} \end{aligned}$$

Atau dalam % HHV

$$L_{mf} (\%) = \frac{L_{mf}}{HHV} \times 100\% = \frac{395,22}{25119,13} \times 100\% = 1,57 \%$$

- d. Perhitungan kehilangan panas akibat air yang terbentuk pada pembakaran hidrogen (L_H)

Kehilangan panas ini dikarenakan saat proses pembakaran, kandungan hidrogen pada batu bara bereaksi dengan Oksigen pada udara pembakaran yang menyebabkan terbentuknya kandungan uap air (H_2O) sehingga mengurangi nilai kalori dari batu bara dan menyebabkan pembakaran menjadi lebih lama.

$$L_H = \frac{8,936 \times H \times (h_{15} - h_{Rw})}{100} = \frac{8,936 \times 4,73 \times (2763,58 - 147,93)}{100} = 932,60 \text{ kJ/kg batu bara}$$

Atau dalam % HHV

$$L_H (\%) = \frac{L_H}{HHV} \times 100\% = \frac{932,60}{25119,13} \times 100\% = 3,71 \%$$

- e. Perhitungan kehilangan panas akibat kandungan air di udara (L_{mA})

Kehilangan panas ini dikarenakan adanya kandungan air (*moisture*) di udara pembakaran, yang menyebabkan pembakaran akan berlangsung lebih lama karena panas yang ada akan digunakan terlebih dahulu untuk menguapkan air yang terkandung pada udara tersebut.

$$L_{mA} = W_{mA} \times WA_{15} \times (h_{15} - h_{Rv}) = 0,0176 \times 9,62 \times (2787,61 - 2565,11) = 32,47 \text{ kJ/kg batu bara}$$

Atau dalam % HHV

$$L_{mA} (\%) = \frac{L_{mA}}{HHV} \times 100\% = \frac{32,47}{25119,13} \times 100\% = 0,13 \%$$

- f. Perhitungan kehilangan panas akibat konveksi dan radiasi pada ketel uap (L_B)

Kehilangan panas ini terjadi dikarenakan perpindahan panas secara radiasi dan konveksi pada pipa – pipa

pada ruang bakar maupun pada aliran gas buang. Prosentase kehilangan panas ini nilainya ditentukan berdasarkan ABMA curve yang nilainya selalu tetap dari waktu ke waktu sesuai dengan kondisi pada saat commissioning yaitu 0,17%.

$$L_B = \frac{ABMA \text{ curve} \times HHV}{100} = \frac{0,17 \times 25119,13}{100} = 42,70 \text{ kJ/kg batu bara}$$

- g. Perhitungan kehilangan panas yang tidak dapat diukur (L_{un})

Kehilangan panas ini tidak dapat dihitung, hal tersebut dikarenakan kehilangan ini terlalu kecil nilainya ataupun tidak terukur. Oleh sebab itu prosentase kehilangan panas ini ditetapkan nilainya berdasarkan model ketel uap yang digunakan oleh PLTU Tanjung Jati B Unit 2, yaitu 0,15 %.

$$L_{un} = \frac{0,15 \times HHV}{100} = \frac{0,15 \times 25119,13}{100} = 37,68 \text{ kJ/kg}$$

- h. Perhitungan efisiensi ketel uap

Efisiensi ketel uap adalah perbandingan antara panas yang dibutuhkan untuk merubah air menjadi uap terhadap panas yang dihasilkan oleh pembakaran.

$$\eta_B = 100\% - L (\%) = 100\% - 10,09\% = 89,91 \%$$

Berikut merupakan tabel hasil perhitungan sesuai dengan contoh perhitung efisiensi ketel uap :

Tabel 4.1 Hasil perhitungan total kehilangan panas

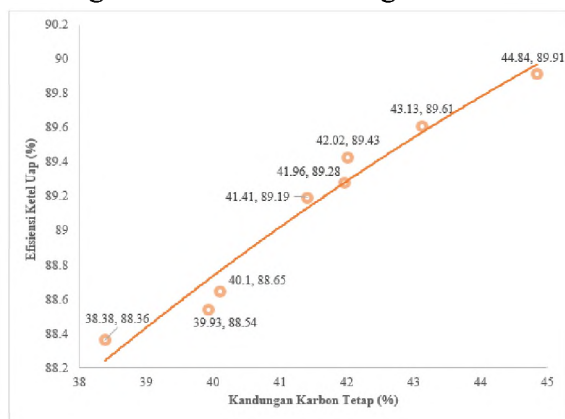
Data	Kehilangan Panas							Total Kehilangan Panas
	LUC	L _G	L _{mf}	L _H	L _{mA}	L _B	L _{un}	
1	52,63	1040,43	395,22	932,60	32,47	42,70	37,68	2533,74
2	3,70	1049,57	420,41	1052,36	32,67	43,20	48,12	2640,03
3	15,53	1091,55	386,00	1044,39	34,30	42,66	37,64	2652,06
4	24,	1095,	427,	1003,	34,	42,	37,	2664,

	87	35	71	08	23	27	29	81
5	30,99	1104,26	444,38	942,2	34,56	41,44	16,57	2634,41
6	15,73	1048,79	473,68	1020,02	32,80	39,92	35,22	2666,16
7	13,26	1033,76	498,31	1007,85	32,32	38,83	34,26	2658,59
8	17,45	1041,37	505,70	1018,04	32,62	39,91	35,21	2690,31

Tabel 4.2 Hasil perhitungan prosentase efisiensi ketel uap terhadap nilai karbon tetap

Data	Karbon Tetap	Kehilangan Panas							Kehilangan Panas Total	ηb
		LUC	I _G '	L _{mf}	L _H	L _{ma}	L _B	L _{un}		
1	44,84	0,21	4,14	1,57	3,71	0,13	0,17	0,15	10,09	89,91
2	43,13	0,01	4,13	1,65	4,14	0,13	0,17	0,15	10,39	89,61
3	42,02	0,06	4,35	1,54	4,16	0,14	0,17	0,15	10,57	89,43
4	41,96	0,10	4,41	1,72	4,03	0,14	0,17	0,15	10,72	89,28
5	41,41	0,13	4,53	1,82	3,87	0,14	0,17	0,15	10,81	89,19
6	40,10	0,07	4,47	2,02	4,34	0,14	0,17	0,15	11,35	88,65
7	38,38	0,06	4,53	2,18	4,41	0,14	0,17	0,15	11,64	88,36
8	39,93	0,07	4,44	2,15	4,34	0,14	0,17	0,15	11,46	88,54

Berdasarkan data perhitungan, maka dapat dibuat grafik dan analisa sebagai berikut:



Gambar 4.1 Grafik Hubungan Antara Efisiensi Ketel Uap Terhadap Karbon Tetap

Kandungan karbon tetap adalah karbon yang terdapat di dalam batu bara setelah bahan mudah menguap, abu dan kandungan air dihilangkan. Dalam analisis proksimasi karbon tetap dapat ditentukan dengan perhitungan: 100% dikurangi prosentase bahan mudah menguap abu dan kandungan air. Dapat terlihat bahwa kandungan kalor pembakaran batu bara (HHV) akan naik tiap kandungan dari karbon tetap (FC) naik pula.

Pada grafik terlihat bahwa efisiensi ketel uap terbaik 89,91 % adalah ketika nilai karbon tetap terbaik pula, yaitu 44,84 %. Hal ini dikarenakan seiring bertambahnya nilai karbon tetap maka kehilangan panas total pada ketel uap akan semakin kecil sehingga akan menyebabkan efisiensi ketel uap akan menjadi naik. Sedangkan efisiensi terendah 88,36% ketika nilai karbon tetap terendah pula yaitu 38,38%.

Efisiensi ketel uap adalah perbandingan antara panas yang dibutuhkan untuk merubah air menjadi uap terhadap panas yang dihasilkan oleh pembakaran. Berdasarkan grafik diatas dapat diketahui bahwa nilai karbon tetap pada batu bara dapat mempengaruhi efisiensi boiler. Terlihat bahwa semakin besar nilai karbon tetap maka akan semakin besar pula efisiensi ketel uap. Hal tersebut dikarenakan apabila kandungan karbon tetap pada batu bara besar maka proses pembakaran batu bara akan berlangsung lebih cepat dan mengurangi kehilangan panas yang ada.

V. PENUTUP

Setelah menganalisa perhitungan dan grafik, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Efisiensi ketel uap tertinggi yaitu 89,91% pada saat nilai karbon tetap tertinggi pula, yaitu 44,84% dan efisiensi ketel uap terendah yaitu 88,36% pada saat nilai karbon tetap terendah, yaitu 38,38%. Kenaikan efisiensi ketel uap rata-rata tiap 1% kenaikan karbon tetap adalah 0,2678%.
2. Trendline dari hubungan antara efisiensi ketel uap terhadap kandungan karbon tetap menunjukkan kenaikan, seperti pada Gambar 4.1. Jadi semakin bertambahnya kandungan karbon tetap mengakibatkan efisiensi dari ketel uap semakin baik.

DAFTAR PUSTAKA

.....*Boilers circulation systems: natural circulation and forced circulation.*
<http://www.enggcyclopedia.com/2012/01/boilers-circulation-systems-natural-circulation-forced-circulation/>. Diakses 06 Juni 2015

-*Fly Ash: Overview*. <http://artikel-teknologi.com/pengertian-boiler-ketel-uap/>. Diakses 06 Juni 2015
-*Pengertian Boiler(Ketel Uap)*. <http://artikel-teknologi.com/pengertian-boiler-ketel-uap/>. Diakses 06 Juni 2015
- American Society of Mechanical Engineers (ASME). 1981. *Flue and Exhaust Gas Analyses, ASME PTC 19.10-1981*. New York : ASME.
- American Society of Mechanical Engineers (ASME). 1999. *Steam Generating Units, ASME PTC 4.1-1964*. New York : ASME.
- Djokosetyoarjo, M.J. 1999. *Ketel Uap*. Jakarta : Pradnya Paramita.
- El-Wakil, M. M. 1992. *Instalasi Pembangkit Daya. Jilid 1*. Terjemahaan Ir. E. Jasjifi. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- Prasetyo, Eri. 1996. *Fisika Energi*. Seri Diktat Kuliah Gunadarma.
- Kadir, Abdul. 2010. *Pembangkit Tenaga Listrik*. Jakarta : Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press).
- The Babcock & Wilcox Company. 2004. *Tanjung Jati B Training Boiler Overview*.