

Makalah Tugas Akhir
**ANALISIS KONSUMSI BAHAN BAKAR PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP
DENGAN MENGGUNAKAN METODE *LEAST SQUARE***

Cahyo Adi Basuki^[1], Ir. Agung Nugroho^[2], Ir. Bambang Winardi^[2]

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedharto, S.H., Tembalang, Semarang

Telp/ Fax: +6247460057

Abstrak

Sistem tenaga listrik terdiri atas pembangkitan, penyaluran dan distribusi. Salah satu jenis pembangkit adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Komponen – komponen utama dalam PLTU adalah ketel uap, turbin uap, kondenser dan generator sinkron. Siklus rankine digunakan untuk PLTU secara teoritis. PLTU biasanya digunakan untuk menangani beban dasar, karena waktu penyalaan yang lama sekitar 6 – 8 jam.

Dalam pembangkitan, biaya operasi terbesar adalah biaya konsumsi bahan bakar. Harga bahan bakar minyak yang mahal mengakibatkan biaya produksi energi listrik juga mahal. Konsumsi spesifik bahan bakar sering digunakan untuk mendapatkan gambaran mengenai efisiensi unit pembangkit. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui konsumsi spesifik bahan bakar. Pada tugas akhir ini, pemodelan sistem menggunakan metode least square untuk analisa.

Salah satu usaha yang dilakukan adalah dengan pergantian bahan bakar utama pembangkit. Hasil analisis menunjukkan bahwa pengaruh penambahan daya yang dibangkitkan (beban) mengakibatkan kenaikan laju aliran massa, penurunan konsumsi spesifik bahan bakar, penurunan tara kalor, dan kenaikan efisiensi termal. Laju aliran massa HSD adalah yang terkecil, sedangkan batubara adalah yang terbesar. Selain itu, penambahan daya yang dibangkitkan menyebabkan besarnya biaya penghematan semakin besar.

Kata-kunci : *PLTU, siklus rankine, konsumsi spesifik bahan bakar, efisiensi termal, least square, biaya penghematan*

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan suatu faktor penunjang yang sangat penting bagi perkembangan secara menyeluruh suatu bangsa. Di Indonesia, dengan semakin meningkatnya kegiatan industri dan jumlah penduduknya, maka kebutuhan energi listrik juga mengalami peningkatan. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi ketersediaan listrik di Indonesia, antara lain ketersediaan energi primer, harga bahan bakar, teknologi, dan budaya masyarakat. Beberapa usaha yang dapat di tempuh Perusahaan Listrik Negara dalam mengatasi peningkatan kebutuhan listrik antara lain dengan pembangunan pembangkit baru, pembelian listrik swasta (*independent power producer*), dan sistem sewa pembangkit dengan pemda/ pengusaha. Sedangkan, usaha – usaha yang dapat dilakukan guna mendapatkan biaya operasi yang ekonomis adalah dengan pergantian pemakaian bahan bakar, pengoptimalan efisiensi dan pemeliharaan pembangkit yang sudah ada. Dari beberapa usaha tersebut diatas pergantian pemakaian bahan bakar merupakan alternatif yang dapat ditempuh untuk dilakukan. Hal ini disebabkan berdasarkan data statistik PT. Perusahaan Listrik Negara (PLN) 31

Maret 2007, distribusi bahan bakar untuk suatu pembangkit mencapai 34 % dari total kapasitas pembangkit terpasang. Harga bahan bakar minyak yang mahal, mengharuskan PT PLN mengkaji ulang semua Pembangkit Listrik Tenaga termal yang menggunakan minyak sebagai bahan bakar utama pembangkit uapnya. Selain itu, besarnya subsidi pemerintah ke PT. PLN dalam penyediaan listrik setiap tahunnya terutama pembangkit listrik berbahan bakar minyak. Subsidi tersebut sebagian besar digunakan untuk mengurangi kerugian operasional PLTU yang berbahan bakar minyak. Penyebab kerugian adalah besarnya selisih biaya bahan bakar per kWh daya pembangkitan terhadap harga jual (tarif listrik) ke konsumen. Oleh karena itu, perlunya pergantian bahan bakar sehingga biaya produksi energi listrik lebih ekonomis.

Berdasarkan penjelasan diatas, maka perlunya dilakukan penelitian ini guna mengetahui konsumsi bahan bakar pada pembangkit dalam penyediaan energi listrik secara ekonomis.

1.2 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui, memodelkan, dan menganalisis pengaruh penambahan beban

^[1]Mahasiswa Teknik Elektro UNDIP ^[2] Staf Pengajar Teknik Elektro UNDIP

terhadap laju aliran massa, konsumsi spesifik bahan bakar, *heat rate* (tara kalor), dan efisiensi termal pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

- Membandingkan prakiraan biaya penghematan bahan bakar LNG dan batubara terhadap bahan bakar minyak HSD dan MFO sebagai bahan bakar utama PLTU.

1.3 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

- Pemodelannya menggunakan metode *least square*.
- Bahan bakar yang digunakan sebagai bahan bakar utama PLTU adalah *Main Fuel Oil (MFO)* dan *High Speed Diesel (HSD)*.
- Untuk menghitung konsumsi spesifik bahan bakar, tara kalor (*heatrate*) dan efisiensi termal didasarkan pada SPLN No. 80 Tahun 1989 tentang efisiensi.
- Hanya membahas Pembangkit Listrik Tenaga Uap dan **tidak** membahas pembangkit lainnya.
- Pengambilan data berdasarkan pencatatan/ rekaman operator PLTU Unit 3 PT. Indonesia Power UBP Semarang.
- Pergantian bahan bakar guna penghematan bahan bakar adalah LNG dan batubara terhadap BBM (HSD dan MFO) sebagai bahan bakar utama.
- Menitikberatkan pada segi penghematan operasi (bahan bakar) terutama konsumsi bahan bakar dan **tidak** membahas mekanik, operasional, dan biaya investasi.
- Data harga bahan bakar diambil dari internet. Harga bahan bakar MFO, HSD, batubara, dan LNG berturut – turut adalah Rp. 6822,70/ liter, Rp. 8339,00/ liter, Rp. 35.150,00/ MMBTU, dan Rp. 750,00/ kg^[28]^[29].
- Nilai *Specific Gravity (SG)* MFO, HSD, dan LNG berturut – turut adalah 0,9439, 0,88, dan 0,85. Sedangkan, nilai *Low Heating Value (LHV)* MFO, HSD, batubara, dan LNG berturut – turut adalah 9887,47 kKal/ kg, 10.050 kKal/ kg, 4925 kKal/ kg dan 9.990 kKal/ kg^[11]^[24].

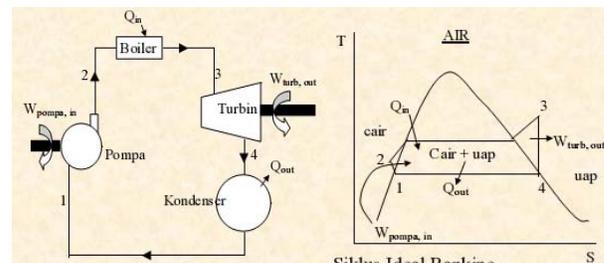
10. Menggunakan program bantu **Chemical Logic SteamTab Companion** guna menentukan besarnya nilai entalpi.

11. Pengolahan data menggunakan *software* Borland Delphi 7.0 dan Microsoft Excel 2007 guna memudahkan perhitungan dan analisis tugas akhir.

II. DASAR TEORI

2.1 Siklus Rankine^[6]^[19]

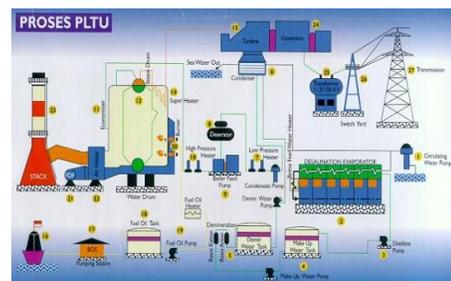
Siklus merupakan rangkaian dari beberapa proses yang dimulai dari suatu tingkat keadaan kemudian kembali ke tingkat keadaan semula dan terjadi secara berulang. Pada pembangkit tenaga uap, fluida yang mengalami proses-proses tersebut adalah air. Air berfungsi sebagai fluida kerja. Air dalam siklus kerjanya mengalami proses – proses pemanasan, penguapan, ekspansi, pendinginan, dan kompresi. Siklus pembangkit tenaga uap yang telah diterima sebagai siklus standarnya adalah siklus *rankine*. Siklus *rankine* sederhana terdiri dari empat komponen utama yaitu pompa, boiler, turbin, dan kondenser. Skematik siklus *rankine* sederhana ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1 Siklus *rankine* ideal

Siklus dengan proses 1-2-3-4 dinamakan siklus *rankine* panas lanjut.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap^[4]^[11]^[19]

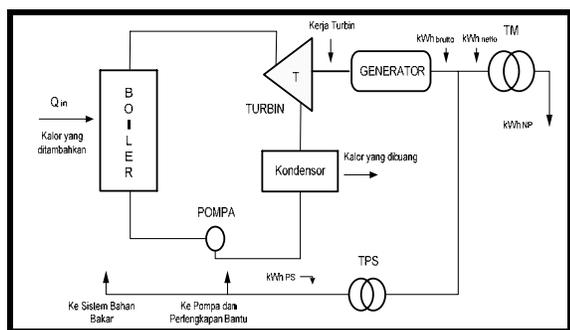


Gambar 2 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pada prinsipnya, PLTU mempunyai proses - proses, yaitu meliputi:

Air laut di pompa menggunakan *Circulating Water Pump* diproses menjadi air murni (*desalination*) dipanaskan pada ketel uap (*boiler*) dengan menggunakan *burner*. Pada proses pemanasan digunakan bahan bakar berupa solar untuk tahap *start up* dan residu untuk operasi normal. Pemanasan air tersebut melalui beberapa tahap pemanasan (*heater*) yaitu *LP heater, daerator, HP heater, economizer, dan superheater* sampai menghasilkan uap panas kering yang bertekanan dan bertemperatur tinggi. Kemudian, uap kering tersebut digunakan untuk memutar sudu-sudu pada turbin melalui 3 tahap turbin yaitu *High Pressure, Intermediate Pressure, dan Low Pressure*. Rotor generator yang dikopel dengan turbin akan ikut berputar sehingga dapat menghasilkan energi listrik dengan bantuan penguat / *exciter* pada rotor generator.

2.3 Perhitungan Konsumsi Spesifik Bahan Bakar, *Heatrate* (Tara Kalor) dan Efisiensi Termal [14] [15]



Gambar 3 Bagan batasan pengukuran

Keterangan gambar:

- Q_{in} : Masukan kalor yang ditambahkan
- kWh_B : kiloWatt jam brutto (energi yang dihasilkan terminal generator)
- kWh_{Nu} : kiloWatt jam netto unit pembangkit (energi bersih yang dihasilkan terminal generator/unit pembangkit)
- kWh_{PS} : kiloWatt jam pemakaian sendiri
- TM : Trafo Mesin (*Generator Transformers*)
- TPS : Trafo Pemakaian Sendiri (*Main Auxillary Transformers*)
- kWh_{NP} : kiloWatt jam pusat pembangkit

Berdasarkan SPLN No. 80 tahun 1989, persamaan yang digunakan untuk menghitung konsumsi spesifik bahan bakar adalah sebagai berikut:

1. Pemakaian bahan bakar spesifik brutto (SFC_B)

$$SFC_B = \frac{Q_f}{kWh_B} \quad (1)$$

2. Pemakaian bahan bakar netto (SFC_N)

$$SFC_N = \frac{Q_f}{kWh_B - kWh_{PS}} \quad (2)$$

Dimana :

- Q_f : Jumlah bahan bakar yang dipakai (dalam liter)
- LHV : Nilai kalor bawah bahan bakar yang digunakan (dalam kJ/ kg atau kKal/ kg).
- HHV : Nilai kalor atas bahan bakar yang digunakan (dalam kJ/ kg atau kcal/ kg).
- kWh_B : Jumlah kWh yang dibangkitkan generator (dalam kWh).
- kWh_{PS} : Jumlah kWh yang dibutuhkan untuk pemakaian sendiri (dalam kWh).
- M_f : Berat bahan bakar selama pengujian (dalam kg)

Sedangkan, persamaan yang digunakan untuk menghitung tara kalor (*heat rate*) sebagai berikut:

1. Tara kalor brutto (HR_B)

$$HR_B = \frac{M_f \times LHV}{kWh_B} \quad (3)$$

2. Tara kalor netto (HR_N)

$$HR_N = \frac{M_f \times LHV}{kWh_B - kWh_{PS}} \quad (4)$$

Dimana:

- Tara kalor unit brutto (HR_B) adalah jumlah kalor bahan bakar dihitung berdasarkan nilai kalor bawah (LHV) untuk menghasilkan setiap kWh brutto.
- Tara kalor unit netto (HR_N) adalah jumlah kalor bahan bakar yang dihitung berdasarkan nilai kalor bawah (LHV) untuk menghasilkan setiap kWh netto.

Sedangkan, persamaan guna menghitung efisiensi termal adalah sebagai berikut:

$$\eta_{th} = \frac{859,845}{Tara\ kalor} \quad (5)$$

Dimana:

η_{th} : efisiensi termal (dalam persen, %)

Tara kalor : dalam kKal/ kWh

Besarnya efisiensi termal tergantung beban, makin tinggi beban makin besar efisiensinya. Efisiensi termal unit (η_{th}) adalah presentase keluaran energi terhadap masukan kalor.

Catatan :

1 kJ = 0,2388 kKal

= 0,2948 BTU

= 0,000277 kWh

1 kcal = 0,001163 kWh = 4,187 kJ

1 kWh = 859,845 kkal (IEC 46 1962)

1 kg = 2,205 lb

2.4 Perhitungan Prakiraan Efisiensi Biaya Bahan Bakar PLTU Berbagai Bahan Bakar^[21]

Langkah – langkah untuk menghitung prakiraan efisiensi biaya bahan bakar PLTU berbagai bahan bakar adalah sebagai berikut:

Langkah pertama adalah menentukan entalpi air umpan masuk *ekonomizer (eco-inlet)* dan entalpi uap panas lanjut keluar *superheater*. Nilai entalpi keduanya dapat dicari menggunakan program **ChemicalLogic SteamTab Companion** dengan cara memasukkan parameter tekanan (dalam bar) dan suhu (dalam derajat celcius). Dengan menggunakan program ini, akan didapatkan entalpi dalam satuan kJ/ kg. Untuk keperluan perhitungan maka dilakukan konversi ke satuan kKal/ kg (catatan: 1 kJ = 0.2388 kKal).

Langkah kedua adalah menghitung jumlah kebutuhan kalor dengan menggunakan persamaan:

Efisiensi boiler didefinisikan sebagai perbandingan antara laju energi yang dibutuhkan air menjadi uap panas lanjut (*superheated*) dengan laju aliran energi bahan bakar.

Persamaan efisiensi *boiler* (pemanas) adalah:

$$\eta = \frac{\text{kalor output}}{\text{kalor input}} \times 100\%$$

$$\eta_{Boiler} = \frac{Q_{uap}}{Q_{bahan\ bakar}}$$

Dimana : $Q_{uap} = m \times \Delta h$

Maka,

$$Q_{bb} = \frac{Q_{uap}}{\eta_{boiler}} = \frac{m_{uap} \Delta h}{\eta_{boiler}}$$

$$Q_{bahan\ bakar} = \frac{m_{uap} (h_{superheater} - h_{air\ umpan\ masuk\ eco-inlet})}{\eta_{boiler}} \quad (6)$$

Dimana :

$Q_{bahan\ bakar}$: jumlah kebutuhan kalor (dalam kKal/ jam)

m_{uap} : laju aliran massa uap (dalam kg/ jam)

$h_{superheater}$: entalpi spesifik *superheater* (dalam kKal/ kg)

$h_{air\ umpan\ masuk}$: entalpi spesifik air umpan masuk *eco-inlet* (dalam kKal/kg)

η_{boiler} : efisiensi *boiler* (dalam persen, %)

Langkah selanjutnya adalah menghitung laju aliran massa bahan bakar:

$$m = \frac{Q_{bahan\ bakar}}{LHV_{bahan\ bakar}} \quad (7)$$

Dimana:

m : laju aliran massa bahan bakar (kg/ jam)

$Q_{bahan\ bakar}$: jumlah kebutuhan kalor (dalam kKal/ jam)

LHV : *Low Heating Value* (dalam kKal/ kg)

2.5 Metode *Least Square*^[23]

Metode *Least Square* menyatakan bahwa “ Jumlah kuadrat selisih dari nilai sebenarnya dengan nilai yang terhitung, dikalikan dengan jumlah pengukuran adalah minimum”.

Metode *Least Square* merupakan metode estimasi parameter sistem yang meminimumkan fungsi kriteria jumlah kuadrat kesalahan prediksi (*least square criterion*) adalah sebagai berikut:

$$J(t) = \sum_{j=1}^t (\varepsilon(j))^2 \quad (8)$$

Dimana:

$$\varepsilon(t) = y(j) - \hat{y}(j) \quad (9)$$

dengan $\varepsilon(t)$: *error* / kesalahan *output* sistem (*output prediction error*).

$y(j)$: *input* sistem.

$\hat{y}(j)$: *output* sistem.

Formula *estimator least square* diatas dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\hat{\theta}_t = (\Phi_{t-1}^T \Phi_{t-1})^{-1} \Phi_{t-1}^T Y_t \quad (10)$$

dengan $\hat{\theta}_t$: vektor parameter sistem

Φ_{t-1} : matrik informasi sistem

Y_t : vektor informasi *output* sistem

Estimator parameter yang telah diturunkan diatas, lebih dikenal sebagai *estimator batch*.

Dimana untuk estimasi parameter pada saat-t, $\hat{\theta}_t$, diperlukan informasi yang meliputi sinyal pengukuran input-output, Φ_{t-1} dan Y_t , hingga pada saat-t pula.

III. PERANCANGAN PERANGKAT LUNAK

3.1 Program Konsumsi Spesifik Bahan Bakar

Algoritma perancangan program adalah sebagai berikut:

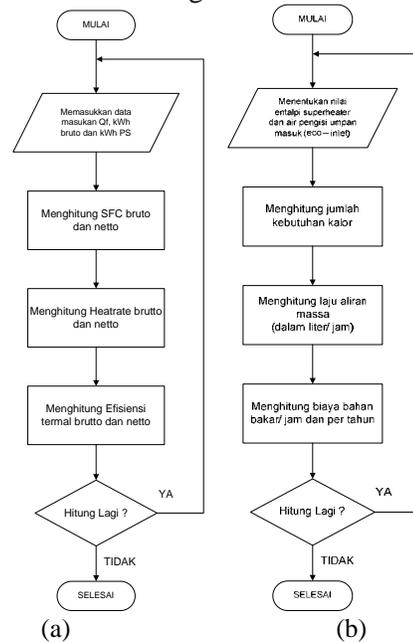
1. Memasukkan parameter – parameter masukan, meliputi Qf, kWh brutto dan pemakaian sendiri.
2. Menghitung kWh netto
3. Menghitung konsumsi bahan bakar brutto dan netto
4. Menghitung tara kalor (*heatrate*) brutto dan netto
5. Menghitung efisiensi termal brutto dan netto
6. Buat grafik hubungan beban vs SFC, beban vs *heatrate*, beban vs efisiensi termal

3.2 Program Efisiensi Bahan Bakar

Algoritma perancangan program adalah sebagai berikut:

1. Menentukan entalpi spesifik uap superheater dan umpan masuk menggunakan program Chemical Logic SteamTab Companion
2. Memasukkan parameter masukan, meliputi entalpi, efisiensi boiler, LHV, SG dan produksi uap.
3. Menghitung laju aliran massa
4. Menghitung biaya bahan bakar per jam
5. Menghitung biaya bahan bakar per tahun
6. Menghitung besar prakiraan biaya penghematan per tahun.
7. Menghitung biaya pembangkitan per kWh
8. Buat Grafik

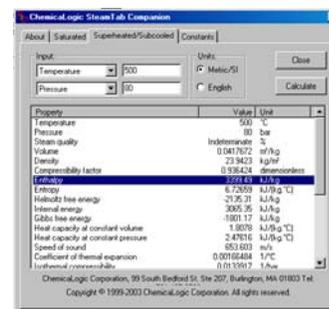
Adapun *flowchart* perhitungan diatas berdasarkan persamaan adalah sebagai berikut:



Gambar 4 *Flowchart* perhitungan
(a) SFC, *heatrate* dan efisiensi termal
(b) Biaya penghematan bahan bakar



Gambar 5 Tampilan Program Konsumsi Bahan Bakar



Gambar 6 Tampilan Program *ChemicalLogic SteamTab Companion*

IV. HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

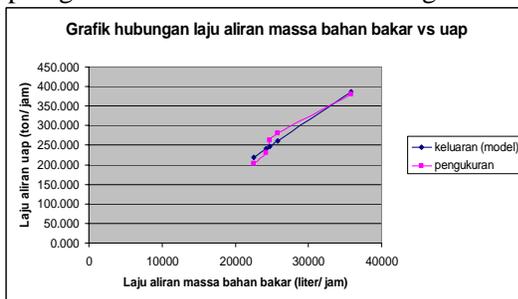
4.1 Analisis Pengaruh Penambahan Beban Terhadap Laju Aliran Massa

Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan perbandingan pengukuran dan model *least square* sebagai berikut:

Tabel 1 Perbandingan keluaran laju aliran massa sistem pengukuran dengan pendekatan linier *least square*

Beban (MW)	Laju aliran massa (liter/ jam)	Laju aliran massa uap (ton/ jam)		Selisih (%)
		Linier <i>least square</i>	Pengukuran	
80	22557.33	219.689	203	8.221293
90	24222.95	240.509	230	4.569337
95	24745.44	247.041	262.625	5.93409
100	25831.5	260.616	280	6.92273
140	35810.52	385.354	380.33	1.320984

Adapun grafik berdasarkan tabel 1 sebagai berikut:



Gambar 7 Grafik laju aliran massa uap terhadap fungsi laju aliran massa bahan bakar

Dari gambar 7, terlihat bahwa penambahan beban/ daya yang dibangkitkan generator sinkron mengakibatkan laju aliran massa bahan bakar/ jumlah bahan bakar yang dikonsumsi pembangkit juga meningkat. Hal ini disebabkan guna menjaga putaran/ kecepatan *angular* rotor generator tetap berada pada kecepatan sinkronnya 3000 rpm (2 kutub) atau frekuensi sistem 50 Hz. Oleh karena itu katup uap (*steam valve*) pada *boiler* memproduksi uap lebih besar seiring dengan kenaikan beban. Artinya, jumlah kebutuhan kalor bahan bakar meningkat (uap mengandung *enthalpy*/ energi), karena produksi uap yang meningkat guna mendorong turbin.

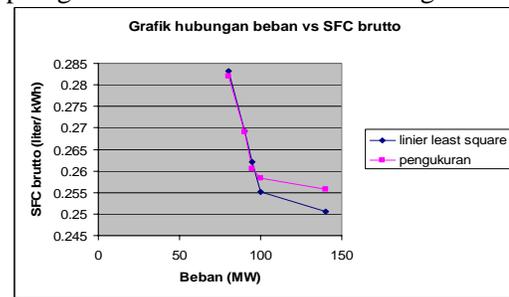
4.1 Analisis Pengaruh Penambahan Beban Terhadap Konsumsi Spesifik Bahan Bakar (SFC)

Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan perbandingan pengukuran dan model *least square* sebagai berikut:

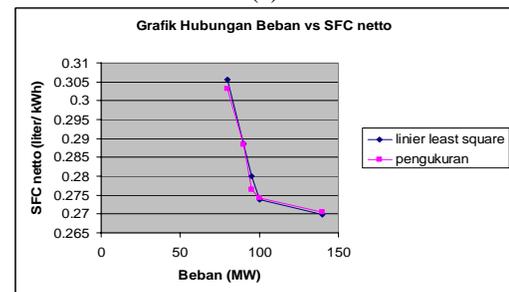
Tabel 2 Perbandingan SFC keluaran sistem pengukuran dengan pendekatan linier *least square*

Masukan Beban (MW)	Konsumsi spesifik bahan bakar bruto (liter/kWh)			Konsumsi spesifik bahan bakar netto (liter/kWh)		
	Linier <i>least square</i>	Pengukuran	Selisih (%)	Linier <i>least square</i>	Pengukuran	Selisih (%)
80	0.2832	0.2819	-0.4374	0.3056	0.3030	-0.8326
90	0.2692	0.2691	-0.0209	0.2886	0.2884	-0.0456
95	0.2622	0.2604	-0.6609	0.2801	0.2765	-1.2764
100	0.2552	0.2583	1.2058	0.2738	0.2743	0.1883
140	0.2506	0.2557	0.02028	0.2698	0.2705	0.2603

Adapun grafik berdasarkan tabel 2 sebagai berikut:



(a)



(b)

Gambar 8 Grafik konsumsi spesifik bahan bakar (SFC) terhadap fungsi beban (a) bruto (b) netto

Pada gambar 8, terlihat bahwa semakin bertambahnya beban atau daya yang dibangkitkan oleh generator sinkron maka konsumsi spesifik bahan bakar semakin menurun baik bruto maupun netto. Artinya, jumlah konsumsi spesifik bahan bakar per kWh yang dikonsumsi pada beban yang relatif kecil lebih besar daripada beban yang relatif besar. Alasannya adalah PLTU yang beroperasi baik

pada beban rendah maupun pada beban tinggi mempunyai kWh pemakaian sendiri yang relatif rata – rata sama yaitu 147,94 kWh guna menjalankan peralatan – peralatan bantu pembangkit seperti motor pompa (*boiler feed pump*), dsb. atau kebutuhan listrik kantor seperti penerangan, komputer dan lain – lain.

Secara umum kurva konsumsi spesifik bahan bakar semakin menurun dengan bertambahnya beban. Pada saat beban nol, nilai konsumsi spesifik bahan bakar mendekati tak terhingga karena bahan bakar yang dikonsumsi hanya untuk melayani beban nol, sedangkan daya keluaran kWh adalah nol. Pada beban rendah, konsumsi spesifik bahan bakar lebih tinggi dari pada beban tinggi. Hal ini terjadi karena pada beban rendah komposisi udara dan bahan bakar tidak sebaik pada beban tinggi sehingga efisiensi pembakarannya juga tidak sebaik pada beban tinggi^[11].

4.2 Analisis Pengaruh Penambahan Beban Terhadap Efisiensi Termal

Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan perbandingan pengukuran dan model *least square* sebagai berikut:

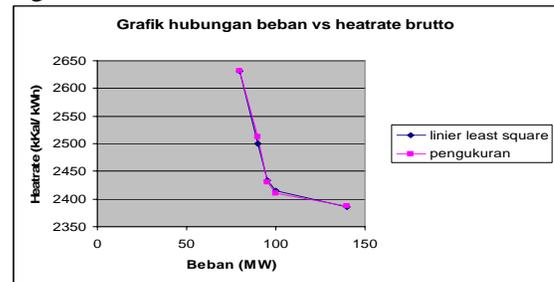
Tabel 3 Perbandingan keluaran *heatrate* sistem pengukuran dengan pendekatan linier *least square*

Masukan Beban (MW)	<i>Heatrate</i> bahan bakar brutto (kKal/ kWh)			<i>Heatrate</i> bahan bakar netto (kKal/kWh)		
	Linier <i>least square</i>	Pengukuran	Selisih (persen, %)	Linier <i>least square</i>	Pengukuran	Selisih (persen, %)
80	2632.1	2631.5	-0.0215	2833.4	2828.5	-0.1715
90	2500.1	2511.8	0.4681	2672.4	2692.2	0.7358
95	2434.1	2430.9	-0.1280	2591.9	2581.1	-0.4159
100	2414.6	2410.7	-0.1577	2560	2560.1	0.0054
140	2385.7	2387.2	0.0639	2523.1	2524.5	0.05772

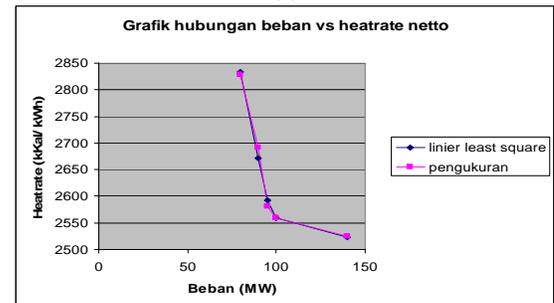
Tabel 4 Perbandingan keluaran efisiensi termal sistem pengukuran dengan pendekatan linier *least square*

Masukan Beban (MW)	Efisiensi termal brutto (persen, %)			Efisiensi termal netto (persen, %)		
	Linier <i>least square</i>	Pengukuran	Selisih (%)	Linier <i>least square</i>	Pengukuran	Selisih (%)
80	32.62	32.67	0.1498	30.31	30.39	0.2773
90	34.38	34.23	0.4594	32.19	31.93	0.8180
95	35.27	35.37	0.2826	33.142	33.31	0.5111
100	35.66	35.66	0.0123	33.58	33.58	0.0049
140	36.01	36.01	0.0015	34.05	34.05	0.0142

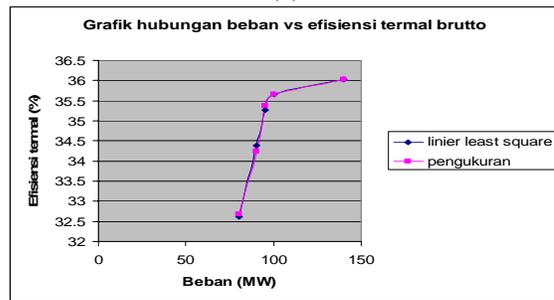
Adapun grafik berdasarkan tabel (3) dan (4) adalah sebagai berikut:



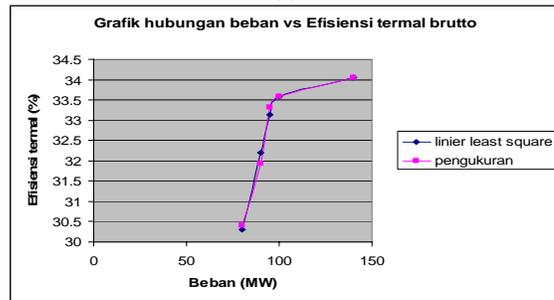
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 9 Grafik *heatrate* dan efisiensi termal (a & b) *Heatrate* terhadap fungsi beban (c & d) Efisiensi termal terhadap fungsi beban

Pada gambar 9 (a) dan (b), terlihat bahwa semakin bertambahnya beban atau daya yang dibangkitkan oleh generator sinkron maka tara kalor (*heatrate*) semakin menurun. Artinya, jumlah kalor

yang ditambahkan, biasanya dalam kKal, untuk menghasilkan satu satuan jumlah kerja, biasanya dalam kiloWatt-jam (kWh) semakin menurun. Tara kalor (*heatrate*) berbanding terbalik dengan efisiensi termal berdasarkan persamaan 5, artinya makin rendah makin baik.

Besarnya laju aliran massa uap lanjut (*superheated*) yang ada dalam *boiler* mengalami perubahan setiap saat. Hal ini mengakibatkan adanya perubahan laju aliran massa bahan bakar yang berbeda – beda setiap saat mengikuti besarnya perubahan beban. Akibat yang ditimbulkan dari peristiwa ini adalah efisiensi termal atau efisiensi siklus juga mengalami perubahan setiap saat sesuai dengan perubahan beban^[20].

Efisiensi termal atau siklus 36.02 % berarti kerja yang dihasilkan turbin (W) sebesar 36.02 % dari kalor yang ditambahkan (Q_{in}). Kesimpulannya, besarnya efisiensi termal tergantung beban, makin tinggi beban makin besar efisiensinya.

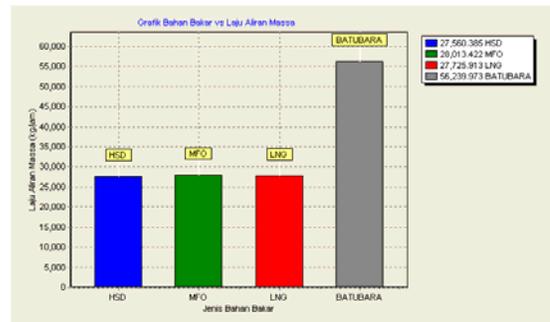
4.3 Prakiraan Efisiensi Biaya Bahan Bakar Untuk Beban 140 MW

Tabel 5 adalah parameter masukan yang digunakan untuk memudahkan dalam perhitungan dan analisis.

Tabel 5 Parameter masukan untuk beban 140 MW

Parameter	Nilai	Satuan
Daya Output Generator	140000	kW
Laju Aliran Massa Uap	380330	kg/ jam
Uap keluar <i>superheater</i>		
Temperatur	537.4867	C
Tekanan	83	bar
Air umpan masuk economizer		
Temperatur	226.002	C
Tekanan	83	bar
Efisiensi <i>Boiler</i>	82.50%	persen

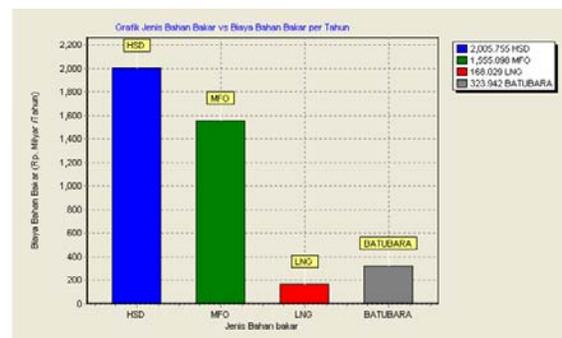
Dengan menggunakan program, hasil perhitungan laju aliran massa dapat ditampilkan dalam grafik adalah seperti terlihat pada gambar 8 dibawah:



Gambar 10 Laju aliran massa HSD, MFO, LNG, dan batubara untuk beban 140 MW

Berdasarkan gambar 10, terlihat bahwa laju aliran massa bahan HSD adalah yang terkecil yaitu sebesar 27.560,385 kg/ jam. Hal ini dikarenakan nilai kalor bawah HSD untuk satuan massa yang sama adalah lebih besar dibanding MFO, LNG dan batubara^[21]. Nilai kalor bawah batubara adalah yang terendah, yaitu sebesar 4925 kKal/ kg, sehingga laju aliran massanya adalah yang terbesar, yaitu sebesar 56.239,973 kKal/ kg dibandingkan yang lainnya.

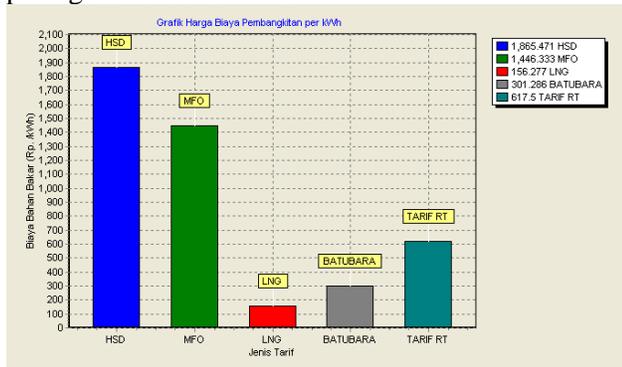
Dengan menggunakan program, hasil perhitungan biaya bahan bakar per tahun (asumsi 1 tahun = 320 hari) dapat ditampilkan dalam grafik adalah seperti terlihat pada gambar 10 dibawah:



Gambar 11 Biaya per tahun bahan bakar HSD, MFO, LNG, dan batubara untuk beban 140 MW

Pada gambar 11, terlihat bahwa biaya operasi tahunan menggunakan bahan bakar HSD dan MFO jauh lebih besar dibandingkan menggunakan LNG dan batu bara. Biaya bahan bakar HSD hanya berkisar Rp. 2,005 Triliyun per tahun, dan biaya bahan bakar MFO berkisar Rp. 1,555 Triliyun per tahun. Sedangkan, biaya bahan bakar batubara berkisar Rp. 323,942 Milyar per tahun dan biaya bahan bakar LNG berkisar Rp. 168,029 Milyar per tahun.

Dengan menggunakan program, hasil perhitungan biaya bahan bakar per kWh dapat ditampilkan dalam grafik adalah seperti terlihat pada gambar 11 dibawah:



Gambar 11 Harga biaya pembangkitan per kWh HSD, MFO, LNG, dan batubara untuk beban 140 MW

Selanjutnya gambar 11 menunjukkan besarnya biaya bahan bakar per kWh (Rp./ kWh) daya *output* generator. Untuk daya yang sama, biaya bahan bakar HSD dan MFO masih berada diatas biaya tarif rumah tangga. Sedangkan, biaya bahan bakar LNG dan batubara masih berada di bawah tarif listrik rumah tangga. Rupiah per kWh terkecil adalah LNG sebesar Rp. 156,277 per kWh, sedangkan HSD adalah yang terbesar sebesar Rp. 1.865,471 per kWh.

Berdasarkan gambar 11 diatas, terlihat bahwa secara operasional PLTU yang beroperasi dengan menggunakan bahan bakar minyak (HSD dan MFO) mengalami kerugian. Hal ini nampak jelas dari selisih harga yang sangat besar antara biaya bahan bakar HSD dan MFO produksi energi listrik dibandingkan harga jual listrik rumah tangga^[21].

Perbandingan prakiraan biaya penghematan bahan bakar berbagai beban ditunjukkan oleh tabel 6, meliputi beban 80 MW, 90 MW, 95 MW, 100 dan 140 MW.

Tabel 6 Besar penghematan (Rp. Milyar/ tahun) macam - macam jenis bahan bakar dan beban

BEBAN (MW)	Besarnya penghematan (Milyar/ tahun)			
	MFO - LNG	MFO - BATUBARA	HSD - LNG	HSD - BATUBARA
80	777.694	690.277	1030.366	942.949
90	871.323	773.381	1154.414	1056.473
95	990.242	878.934	1311.971	1200.663
100	1051.672	933.459	1393.36	1275.146
140	1387.069	1231.155	1837.726	1681.812

Pada tabel 6 terlihat bahwa biaya penghematan terbesar adalah pergantian bahan bakar dari HSD ke LNG. Sedangkan, biaya penghematan terkecil adalah pergantian MFO ke batubara. Semakin besar daya yang dibangkitkan maka semakin besar pula biaya penghematan yang diperoleh dan sebaliknya.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan pembahasan tugas akhir dengan judul Analisis Bahan Bakar Yang Digunakan Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Studi Kasus di PT Indonesia Power UBP Semarang) maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Dengan menggunakan pemodelan metode pendekatan *linier least square* didapatkan *error* antara 0,001 – 8,22 %, sehingga metode tersebut dapat mewakili sistem. Pada grafik yang cenderung berbentuk eksponensial dapat didekati dengan model linier sebagian – sebagian.
2. Konsumsi spesifik bahan bakar semakin menurun seiring dengan penambahan beban/ daya yang dibangkitkan. Dari perhitungan didapatkan, konsumsi bahan bakar bruto dan netto saat beban 80 MW adalah 0,28196667 liter/ kWh dan 0,30307647 liter/ kWh. Sebaliknya, saat beban 140 MW adalah 0,25578946 liter/ kWh dan 0,27050424 liter/ kWh.
3. Semakin besar daya yang dibangkitkan maka efisiensi termal semakin besar. Sebaliknya, tara kalor (*heatrate*) semakin menurun. Dari perhitungan didapatkan efisiensi termal bruto dan netto terbesar adalah 36,01 % dan 34,06 % saat beban 140 MW. Sedangkan, efisiensi termal bruto dan netto terkecil adalah 32,67 % dan 30,398 % saat beban 80 MW.
4. Semakin besar daya yang dibangkitkan pembangkit, maka besarnya biaya penghematan dengan cara pergantian bahan bakar semakin besar. Biaya operasi bahan bakar terkecil per tahun adalah bahan bakar LNG.

5.2 Saran

Berikut ini adalah beberapa saran yang dapat dikemukakan bagi para pembaca yang berminat melanjutkan untuk menyempurnakan penelitian tentang konsumsi bahan bakar di waktu mendatang.

1. Jenis Pembangkit termal yang sebaiknya dibangun untuk rencana ke depan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap dengan menggunakan bahan bakar LNG.
2. Dalam penelitian konsumsi bahan bakar selanjutnya, diperlukan perhitungan efisiensi termal dari segi termodinamika berdasarkan siklus *rankine* non-ideal sehingga hasil perhitungan yang didapatkan lebih realistis atau mendekati kenyataan.
3. Penelitian konsumsi bahan bakar selanjutnya dengan menggunakan alternatif bahan bakar yang lain, misalnya *biofuel*.
4. Perlu memperhitungkan jumlah investasi yang diperlukan sehingga didapatkan harga jual energi listrik per kWh yang realistis. Harga jual listrik terdiri atas 2 variabel, yaitu variabel tetap (biaya investasi) dan variabel tidak tetap (perawatan, bahan bakar, dan transportasi).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abduh, Syamsir, dan Widadi, J.P. "Mencegah Terjadinya Monopoli dengan Menggunakan Metode Price – Cost dalam Pasar Listrik", *Makalah Seminar Nasional Ketenagalistrikan 2005* – Semarang.
- [2] Abdul Wahid, Muh., "Perbandingan Biaya Pembangkitan Pembangkit Listrik di Indonesia".
- [3] Bellman, D.K., "Power Plant Efficiency Outlook", NPC Global Oil and Gas Study, July 18, 2007.
- [4] Basuki, Cahyo Adi. "Proteksi Relai Arus Lebih Tipe CO – 9 pada Motor Induksi 3 Fasa *Boiler Feed Pump* 3A di PLTU Unit 3 PT. Indonesia Power UBP Semarang, Laporan Kerja Praktik Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro, 2007.
- [5] El – Wakil, M.M. "Instalasi Pembangkit Daya", Jilid 1, Erlangga, Jakarta, 1992.
- [6] Kadir, Abdul. "Pembangkit Tenaga Listrik", UI – Press, Universitas Indonesia, Jakarta, 1996.
- [7] Kadir, Abdul. "Pemrograman Database dengan Delphi 7 Menggunakan Access ADO", Andi, Yogyakarta, 2005.
- [8] Klein, Joel B., "The Use Of Heatrates in Production Cost Modeling And Market Modeling", Electricity Analysis Office, California Energy Commission, April 1998.
- [9] Mangkulo, H.A., "Pemrograman Database Menggunakan Delphi 7.0 dengan Metode ADO", PT. Elex Media Komputindo, Gramedia, Jakarta, 2004.
- [10] Marno. "Optimasi Pembagian Beban Pada Unit PLTG Di PLTGU Tambak Lorok Dengan Metode Lagrange Multiplier", Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro, 2001.
- [11] Marsudi, Djiteng. "Pembangkitan Energi Listrik", Erlangga, Jakarta, 2005.
- [12] Moran, M.J., dan Shapiro, H.N. "Termodinamika Teknik", Jilid 1, Edisi 4, Erlangga, Jakarta, 2004.
- [13] Nugroho, Agung. "Metode Pengaturan Penggunaan Tenaga Listrik dalam Upaya Penghematan Bahan Bakar Pembangkit dan Energi", *Majalah Transmisi* Vol. 11, No. 1, Hal. 45 -51, Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Juni 2006.
- [14] Perusahaan Umum Listrik Negara. "Standar Operasi Pusat Listrik Tenaga Gas", SPLN 80: 1989, Desember 1989.
- [15] Perusahaan Umum Listrik Negara. "Standar Operasi Pusat Listrik Tenaga Uap Bagian Dua: Faktor – Faktor Pengusahaan", SPLN 62 - 2: 1987, Oktober 1987.
- [16] Saadat, Hadi. "Power System Analysis". Mc Graw Hill Inc, Singapore, 1999.
- [17] Sudjito, Saifuddin Baedowie, dan Sugeng, Agung. "Diktat Termodinamika Dasar". Program Semi Que IV, Fakultas Teknik Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya.

- [18] Sulasno. “Pengaruh Tarif Dasar Listrik PLN Terhadap Penghematan Energi”. *Makalah Seminar Nasional Ketenagalistrikan 2005* – Semarang.
- [19] Susepto MS, Ade Murti. “Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Program Studi Teknik Elektro, Universitas Bengkulu.
- [20] Setyoko, Bambang. “Analisa Efisiensi Performa HRSG (*Heat Recovery Steam Generation*) pada PLTGU”, PSD III Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Traksi Vol. 4 No. 2, Desember 2006.
- [21] Syukran, dan Suryadi, Dedi., “Estimasi Penghematan Biaya Operasi PLTU dengan Cara Penggantian Bahan Bakar”, *Jurnal Teknik Mesin* Vol. 9, No.2, Hal: 59 - 66, Oktober 2007.
- [22] Wahyudi.” *Bahan Kuliah Termodinamika Dasar*”. Program Semi Que IV. Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. 2002.
- [23] Wibowo, Wisnu dkk., “Laporan Praktikum Estimasi dan Identifikasi Sistem”, Laporan Praktikum Estimasi dan Identifikasi Sistem, Universitas Diponegoro, 2006.
- [24] ..., Formulir Rata – rata TEMP PLTU Unit 3 PT. Indonesia Power UBP Semarang, 2008.
- [25] . . ., Keputusan Presiden Republik Indonesia, Tarif Dasar Listrik 2004 tanggal 31 Desember 2003.
- [26] ..., www.energyefficiencyasia.org, Peralatan Termal: Bahan Bakar dan Pembakaran.
- [27] ..., www.energyefficiencyasia.org, Peralatan Energi Listrik: Listrik.
- [28] ..., http://www.pertamina.com/index.php?option=com_content&task=view&id=4080&Itemid=33
- [29] ..., http://www.pltu3jatim.co.id/index.php?option=com_content&task=view&id=39&Itemid=2
- [30] ..., <http://www.extension.iastate.edu/agdm/whofarm/html/c6-86.html>
- [31] ..., http://www.wikipedia.co.id/tarif_dasar_listrik.html
- [32] ..., <http://www.elektroindonesia.com/meningkatkanefisiensipltubatubara.htm>

BIODATA PENULIS



Cahyo Adi Basuki, lahir di Semarang 27 Juni 1986. Latar belakang pendidikan: menyelesaikan pendidikan SD, SLTP dan SMU di Semarang Saat ini, sedang menyelesaikan pendidikan S1 Jurusan Teknik Elektro Undip mengambil konsentrasi Arus Kuat. Motto: Bekerja, Berdo'a dan

bersyukur.

Menyetujui dan mengesahkan,

Pembimbing I,

Pembimbing II

Ir. Agung Nugroho
NIP. 131 668 508
Tanggal: 23 Desember 2008

Ir. Bambang Winardi
NIP. 132 046 701
Tanggal: 23 Desember 2008