

TAHAPAN MENDISAIN SISTEM PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

Sudirman Palaloi

Balai Besar Teknologi Energi (B2TE) – BPPT
Kawasan Puspiptek Tangerang 15314, Indonesia
Email : palaloi@yahoo.com

ABSTRAK

Perencanaan sistem pembangkit tenaga listrik di pabrik kelapa sawit harus memperhatikan kesinambungan dan kualitas suplai daya, keandalan dan keselamatan peralatan serta nilai keekonomiannya. Tahapan yang perlu dilakukan adalah menghitung kebutuhan beban, menentukan besar volume uap untuk proses produksi, dan menghitung listrik yang dapat dibangkitkan dari volume uap. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa *steam plant* yang menggunakan perangkat *superheater* lebih efisien dan daya listrik yang dibangkitkan lebih tinggi dibanding yang tidak menggunakan perangkat *superheater*.

Kata kunci: Beban, *Superheater*, Parameter kelistrikan, *Steam ratio*

ABSTRACT

Electric power plant system design in oil palm factory should consider the continuity and quality of power supply, reliability of all equipments and its safety and economical value of the system. Steps that must be conducted are to calculate the power need, to determine steam volume for production process, and to calculate the power that can be generated from the steam volume. The result of these calculation found that a steam power plant that use a superheater is more efficient and the generated electricity is higher than that without using a superheater.

Key words: Load, Superheater, Electrical parameter, Steam ratio

1. PENDAHULUAN

Energi listrik di industri minyak kelapa sawit merupakan komponen utama yang sangat penting dalam mendukung proses produksi. Kelebihan energi ini karena dapat dengan mudah diubah ke bentuk energi lain. Beban di industri mempunyai sifat-sifat khusus dibanding dengan beban-beban lain, karena suatu industri memiliki area yang relatif kecil namun membutuhkan energi yang cukup banyak.

Akhir-akhir ini harga listrik terus merambat naik. Sementara suplai dari PLN semakin terbatas dan keandalannya secara penuh belum dapat dijamin. Sehingga para pelaku industri perlu mencari alternatif sumber pembangkitan yang dapat diandalkan untuk mendukung proses produksi. Salah satu langkah nyata yang dapat dilakukan adalah dengan menerapkan teknologi sistem cogenerasi antara pembangkit listrik dan uap untuk proses.

Perencanaan yang baik pada awal *design power plant* merupakan syarat mutlak untuk mendapatkan sistem yang optimum dan ekonomis. Faktor keamanan, keandalan, pengoperasian dan pemeliharaan sedini mungkin perlu untuk dipikirkan.

Pemilihan komponen dan peralatan listrik yang digunakan harus mengacu pada standar sistem kelistrikan, baik Standar Nasional Indonesia (SNI - PUIL) [13] maupun Internasional seperti IEEE [14]. Ini dimaksudkan agar peralatan dan komponen yang digunakan dengan mudah diperoleh di pasaran. Peralatan harus didesain sedemikian rupa agar aman terhadap manusia dan lingkungan, baik pada waktu dioperasikan maupun saat perbaikan. *Spare part* mudah didapat, mudah diganti dan mempertimbangkan pengembangan di masa datang. Semua peralatan yang digunakan harus dari material yang terpilih, dan dibuat oleh perusahaan *manufacturing* yang memiliki kredibilitas baik. Komponen dan material listrik yang dipilih harus sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan untuk lokasi penempatannya. Peralatan-peralatan yang ditempatkan pada daerah hazardous harus dilengkapi label, sertifikat, atau rekomendasi dari pengujian yang berwenang. Pada perencanaan ini diusahakan pula mengoptimalkan penggunaan komponen.

Faktor-faktor yang menjadi dasar dari perencanaan sistem pembangkit listrik adalah :

- 1) **Ketersediaan (*Continuity*)** : Suplai tenaga listrik yang berkesinambungan untuk menyuplai kebutuhan listrik pabrik yang beroperasi terus menerus. Terhentinya suplai tenaga listrik walaupun hanya beberapa saat mampu mengganggu jalannya proses produksi hingga menyebabkan kerugian finansial bagi perusahaan.
- 2) **Kualitas (*Quality*)** : Kualitas atau mutu merupakan tuntutan industri saat ini. Kualitas yang kurang baik dapat mengganggu kinerja peralatan pabrik, yang pada akhirnya mengganggu proses produksi.
- 3) **Keandalan (*Reliability*)** : Merupakan ukuran kemampuan suatu sistem untuk beroperasi tanpa mengalami kegagalan pada saat sistem itu beroperasi. Keandalan merupakan faktor yang menentukan apakah perancangan sistem pembangkit listrik itu dapat diandalkan atau tidak karena menyangkut nilai tegangan dan frekuensi yang dihasilkan.
- 4) **Keamanan (*Safety*)** : Ini menyangkut keselamatan jiwa manusia, peralatan pabrik, dan instalasi sistem kelistrikan itu sendiri serta lingkungan sekitar.
- 5) **Ekonomi (*Economy*)** : Yaitu faktor dimana nilai ekonomis menjadi suatu pertimbangan dalam perancangan sistem. Baik biaya investasi awal, operasi maupun perawatannya.

Dalam perencanaan sistem pembangkit tenaga listrik ada beberapa tahapan disain yang perlu dilakukan antara lain:

- 1) Analisis kebutuhan beban
- 2) Menentukan besar volume uap untuk proses produksi
- 3) Menghitung listrik yang dapat dibangkitkan dari kebutuhan uap
- 4) Menentukan alternatif kapasitas pembangkit listrik utama
- 5) Menentukan kapasitas pembangkit listrik cadangan

- 6) Menentukan besar suplai daya listrik dari PLN (bila diperlukan)
- 7) Pembagian rel beban dan pembagian panel hubung bagi utama
- 8) Perhitungan teknis tentang susunan tegangan dan arus hubung singkat
- 9) Membuat *single line diagram*
- 10) Membuat uraian teknis tentang peralatan-peralatan utama
- 11) Membuat analisis ekonomis harga per kWh dari sistem pembangkitan.

Makalah ini memuat tiga tahapan utama dalam perencanaan pembangkit sistem kelistrikan yakni analisis kebutuhan beban, menentukan besar volume uap untuk proses produksi dan perhitungan daya listrik yang dapat dibangkitkan dan kebutuhan uapnya.

Tahapan berikutnya seperti menentukan alternatif kapasitas pembangkit listrik utama, kapasitas pembangkit listrik cadangan, besar suplai daya listrik dari PLN (bila diperlukan), pembagian rel beban dan pembagian panel hubung-bagi utama, perhitungan teknis tentang susunan tegangan dan arus hubung singkat, *single line diagram* dan uraian teknis tentang peralatan-peralatan utama serta analisis ekonomis harga per kWh dari sistem pembangkitan akan dipaparkan dalam makalah mendatang.

2. ANALISIS KEBUTUHAN LISTRIK

Analisis beban listrik diperlukan dalam perencanaan sistem pembangkit untuk mengelompokkan jenis beban listrik. Pengelompokan beban ini sebagai dasar untuk pembagian rel beban dan pembagian panel hubung-bagi (PHB). Selain itu juga diperlukan untuk menentukan parameter-parameter kelistrikan yang akan dipakai, misalnya : nominal tegangan, besarnya beban puncak, beban dasar, beban rata-rata dan faktor beban.

2.1. Pengelompokan Jenis Beban

Beban listrik dapat digolongkan menjadi dua jenis kelompok beban, yaitu :

a. Kelompok beban untuk peralatan-peralatan listrik

Beban-beban yang termasuk pada kelompok ini antara lain motor-motor listrik, pompa-pompa, pemanas (*heater*), pesawat pengangkat (*crane*), alat pendingin ruangan (AC), dan berbagai jenis peralatan lainnya.

b. Kelompok beban penerangan

Semua jenis beban untuk penerangan seperti lampu-lampu untuk perkantoran, jalan, lampu di pabrik dan power plant.

Untuk membedakan tingkat keandalan masing-masing kelompok beban, dibuat pembagian berdasarkan kelas prioritas beban. Penggolongan kelas prioritas beban ini disesuaikan kepentingan dan akibat yang terjadi apabila sistem kelistrikan mengalami gangguan. Misalkan pompa untuk mensuplai air ke *boiler (feed water pump)* lebih penting dari pada pompa untuk menyuplai air untuk sistem pendingin ruangan (AC).

Ada tiga jenis beban didasarkan pada kelas prioritas beban yaitu:

1) Kelas prioritas beban tingkat keandalan tinggi

Adalah beban-beban listrik yang mendapat prioritas suplai tenaga listrik paling tinggi (*Critical Load*). Beban ini diharapkan tidak boleh terputus sulai daya, walaupun terjadi interupsi waktu pemutusan maksimum 6 cycle (0,12) detik.

2) Kelas prioritas beban tingkat keandalan sedang

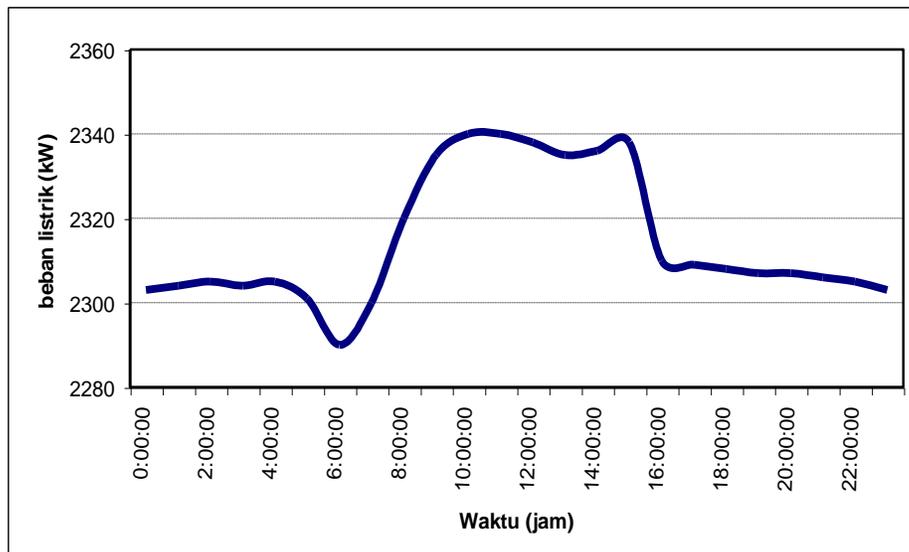
Adalah beban-beban listrik yang mendapat prioritas kedua setelah beban-beban kritis (*essential load*). Waktu interupsinya maksimu 25 cycle (0,5 detik).

3) Kelas prioritas beban tingkat keandalan normal

Adalah beban-beban yang mendapat prioritas rendah bila dibanding dengan dua jenis beban di atas. Beban-beban yang termasuk pada kelas ini disebut juga beban normal, artinya pada operasi normal beban-baban ini harus tersuplai listrik.

2.2. Penentuan Parameter-parameter Kelistrikan

Parameter-parameter kelistrikan seperti beban dasar, beban puncak, faktor beban, arus hubung singkat, rugi-rugi saluran, nilai teggangan nominal, kuat arus, dan jumlah fasa maupun besarnya faktor daya yang dipakai masing-masing peralatan sangat dibutuhkan untuk menentukan jenis dan kapasitas pembangkit. Berikut ini dijelaskan variabel untuk menentukan kapasitas pembangkit yang diperlukan dalam perencanaan.



Gbr. 1. Kurva beban harian pada waktu pemakaian 24 jam

a. Kurva beban

Kurva beban memperlihatkan fluktuasi beban yang terjadi pada waktu tertentu, biasanya 24 jam. Berikut ini diuraikan kurva beban dalam **Gbr. 1**.

Beban puncak

Beban puncak atau beban maksimum adalah total pemakaian listrik terbesar pada suatu periode tertentu. Metode yang digunakan untuk menentukan beban puncak yakni :

- Dengan perhitungan
- Dengan penaksiran
- Dengan pengukuran

Untuk kasus ini besar beban puncak adalah 2340 kW, terjadi pada pukul 10:00 – 16:00.

Beban dasar

Beban dasar atau beban minimum adalah total pemakaian beban listrik terendah yang terjadi pada periode waktu tertentu. Beban terendah sebesar 2290 kW terjadi pada pukul 6:00 pagi.

Beban rata-rata

Beban rata-rata adalah jumlah keseluruhan beban listrik dalam suatu periode tertentu dibagi dengan jam atau waktu pemakaian.

$$P_R = \frac{E_P}{h} \tag{1}$$

dimana :

P_R = beban rata-rata

$E_P = \int_0^{t=h} P(t) dt$ = jumlah energi listrik yang digunakan

$P(t)$ = daya sebagai fungsi waktu

h = jumlah jam atau waktu pemakaian

diperoleh harga P_R

$$P_R = \frac{55549}{24} = 2314,5 \text{ kW}$$

b. Faktor beban

Faktor beban (*load factor*) adalah perbandingan antara beban rata-rata dalam suatu jangka waktu tertentu dan beban maksimum dalam jangka waktu tersebut. Jangka waktu tertentu mungkin sehari, sebulan atau setahun. Sehingga dikenal faktor beban harian, faktor beban bulanan dan faktor beban tahunan. Faktor beban dipengaruhi oleh jenis beban dan pola operasi pada umumnya.

$$\begin{aligned} \text{Faktor beban harian} &= \frac{\text{Total energi yang digunakan}}{\text{Beban puncak} \times 24 \text{ jam}} \times 100\% \\ &= \frac{55549}{2340 \times 24} \times 100\% = \frac{55549}{56160} \times 100\% = 98,9\% \end{aligned}$$

c. Faktor kebutuhan

Karena tidak semua unit-unit pembangkit tenaga listrik itu dijalankan untuk melayani beban dan tidak semua daya yang terpasang dipakai semua oleh beban pada saat yang bersamaan. Maka perbedaan antara daya maksimum yang dipakai oleh beban dibandingkan dengan daya terpasang inilah yang disebut faktor kebutuhan (*demand factor*). Idealnya faktor kebutuhan bernilai lebih kecil dari satu.

Apabila faktor kebutuhan = 1, berarti pada waktu mencapai beban puncak seluruh daya dipakai oleh beban dan semua unit pada pembangkit tenaga listrik bekerja pada keadaan nominal.

Bila faktor kebutuhan > 1, berarti unit-unit pembangkit listrik mengalami beban lebih (*overload*). Hal ini tidak boleh terjadi. Apabila ini terjadi maka unit cadangan harus segera dioperasikan. Beban-beban listrik yang masuk klasifikasi prioritas normal dan sedang serta beban dengan tingkat keandalan rendah secara bertahap harus segera dilepas.

Untuk lebih menjamin tingkat kontinuitas suplai tenaga listrik, sebelum terjadi beban lebih, unit pembangkit cadangan harus segera dioperasikan saat faktor kebutuhan > 0,95. Bila faktor kebutuhan sangat kecil dapat dikatakan pemakaian unit pembangkit listrik kurang efisien, artinya daya tersambungannya terlalu besar.

$$\text{Faktor kebutuhan} = \frac{\text{beban puncak}}{\text{Kapasitas terpasang}} \times 100\% \tag{2}$$

Dari kurva beban diketahui bahwa beban puncak adalah 2340 kW dan kapasitas terpasang 5000 kW

$$\text{Faktor kebutuhan} = \frac{2340kW}{3500kW} \times 100\% = 66,88\%$$

d. Faktor diversitas

Dari suatu kelompok beban yang terdiri dari bermacam-macam jenis beban yang mempunyai karakteristik beban berbeda-beda, misalnya beban penerangan dan beban alat-alat penggerak (motor-motor listrik) pada mesin-mesin proses produksi. Beban penerangan mencapai beban maksimum pada malam hari antara jam 18:00 – 06:00, sedang beban motor-motor listrik beroperasi kontinyu selama proses produksi berlangsung. Pada saat yang bersamaan daya listrik yang digunakan kedua jenis beban tersebut dapat mencapai beban puncak. Pemakaian dua jenis beban yang berbeda (beban penerangan dan beban penggerak) dalam waktu operasi yang bersamaan disebut faktor diversitas (*diversity factor*).

Faktor diversitas merupakan perbandingan kebutuhan daya maksimum masing-masing beban dengan daya maksimum bila kelompok beban tersebut beroperasi bersamaan.

$$\text{Faktor diversifikasi} = \frac{\text{Jumlah maksimum daya masing - masing beban}}{\text{Daya masing masing kelompok beban}} \times 100\% \quad (3)$$

Faktor diversitas nilainya > 1 akan berpengaruh pada faktor beban (*load factor*). Makin besar faktor diversitas, makin besar pula load faktor-nya demikian juga sebaliknya, makin kecil faktor diversitas, maka makin kecil pula besarnya faktor beban daro kelompok beban berbeda.

3. KEBUTUHAN UAP UNTUK PROSES PRODUKSI DI PABRIK MINYAK SAWIT

Pabrik minyak sawit memerlukan uap dalam jumlah yang cukup besar untuk beberapa stasiun proses produksinya. Masing-masing stasiun proses produksi memerlukan uap (dalam satuan volume/jam), tekanan dan temperatur yang berbeda-beda. Peralatan proses produksi yang menggunakan uap untuk proses produksi adalah:

- stasiun *pre treatment*,
- stasiun fraksinasi,
- tangki-tangki timbun dan
- fasilitas-fasilitas produksi lainnya.

Besarnya volume, tekanan dan temperatur yang dibutuhkan ditampilkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Kebutuhan volume uap untuk proses produksi

No.	Stasiun Proses	Volume Uap (kg/jam)	Temperatur (°C)	Tekanan (Psi)
1	<i>Pre refining</i>	24000	240	140
2	<i>Physical refining</i>	21000	200	110
3	<i>Fractionation</i>	15000	180	100
4	<i>Store tank</i>	7500	160	80
5	<i>Other facilities</i>	6000	150	80
Σ uap		73500		

Total kebutuhan uap untuk proses produksi di pabrik minyak sawit adalah 73500 kg uap/jam. Jika efisiensi saluran dalam sistem perpipaan adalah 92,5%, maka kapasitas output boiler (m_{boiler}) minimal harus sebesar :

$$\begin{aligned} m_{boiler} &= 73500 \times 100/92,5 \\ &= 79459,5 \text{ kg uap/jam} = 79,5 \text{ ton uap /jam} = 22,08 \text{ kg uap/detik.} \end{aligned}$$

Dari kondisi pabrik minyak sawit yang sudah beroperasi (*steam plant*) dan prakiraan kebutuhan uap untuk proses, diperoleh data-data sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Volume output boiler } (m_{boiler}) &= 22,08 \text{ kg/detik, kapasitas maksimum} \\ \text{Tekanan uap output boiler } (P_B) &= 14 \text{ kg/cm}^2 = 199,08 \text{ psi} = 14 \text{ atm} \\ \text{Temperatur uap jenuh output boiler } (T_B) &= 194,1 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Temperatur uap output } superheater (T_S) &= 500 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Efisiensi Boiler (η_{Boiler})	= 90%
Kadar uap residu boiler (<i>blow down</i>)	= 5%
Kandungan uap jenuh output boiler (x)	= 95% (100% - % <i>blow down</i>)
Efisiensi Turbin (η_{Turbin})	= 90%
Efisiensi mekanik turbin ($\eta_{mekanik}$)	= 93%
Efisiensi total generator (η_G)	= 92% (rugi gesek tembaga, angin)

4. LISTRIK YANG DIBANGKITKAN BILA SISTEM BOILER MEMAKAI DAN TIDAK MEMAKAI SUPERHEATER

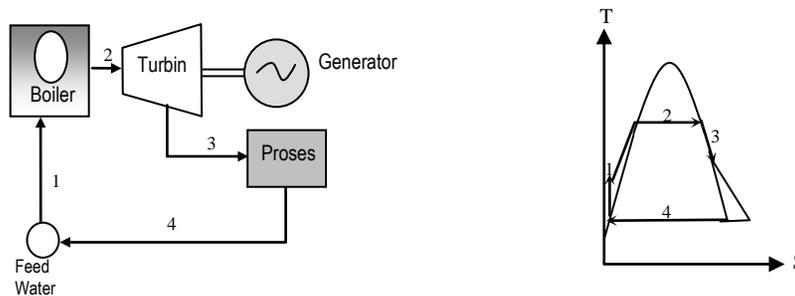
Perhitungan seberapa besar listrik yang mampu dibangkitkan bila sistem *boiler* memakai *superheater* dan bila sistem tidak memakai *superheater* diuraikan berikut ini:

Langkah awal perhitungan adalah dengan menentukan entalpi masing-masing kondisi sesuai dengan siklus pembangkit cogen yang dipakai. Selanjutnya dihitung efisiensi termal (η_{Th}) dan efisiensi plant (η_{plant}).

Entalpi air (h) adalah kandungan panas atau jumlah panas yang dinyatakan dalam kkal/kg yang diperlukan oleh 1 kg air dari 0 °C untuk dinaikkan temperaturnya hingga mencapai temperatur T_1 °C pada tekanan P_1 atm. Untuk membangkitkan listrik ada dua jenis alternatif ketel uap yang bisa dipakai, yaitu ketel uap yang memakai perangkat *superheater* dan ketel uap yang tidak memakai *superheater*.

4.1. Boiler Tanpa Superheater

Steam ratio di atas adalah nilai maksimum, artinya nilai tersebut dapat dicapai jika *boiler* beroperasi pada kapasitas kerja maksimum. Untuk lebih jelasnya, perbandingan ini dapat dilihat pada **Gbr. 2 kiri**, gambar kanan adalah grafik *steam ratio* tanpa *superheater*.



Gbr. 2. Diagram *steam plant* tanpa *superheater* (kiri), Diagram T-S (kanan)

Untuk industri minyak sawit, biasanya digunakan jenis turbin satu tingkat. Dari **Gbr. 2** terlihat ada 4 proses yang dijelaskan sebagai berikut.

• **Proses 1 ke 2**

Proses penambahan temperatur air umpan, sehingga mencapai temperatur penguapan. Proses penguapan dalam ketel terjadi pada temperatur dan tekanan konstan. Proses ini dapat dituliskan dengan rumus termodinamika:

$$(Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) = \text{Massa uap} (h_{akhir} - h_{awal}) \quad (3)$$

dimana :

Q_{in} adalah panas masuk, Q_{out} adalah panas keluar, W_{out} adalah kerja yang dihasilkan dan W_{in} adalah kerja yang diperlukan.

h_{awal} adalah entalpi air saat awal masuk kondensor

h_{akhir} adalah entalpi uap keluar kondensor

Bila $Q_{out} = 0$, $W_{out} = 0$ dan $W_{in} = 0$, maka panas yang diserap oleh air adalah :

$$Q_{in} = \text{Massa uap} (h_{akhir} - h_{awal}) \quad (4)$$

• **Proses 2 ke 3**

Proses ekspansi uap ideal yang terjadi dalam turbin satu tingkat.

Pada proses ekspansi, harga $Q_{in} = 0$, $Q_{out} = 0$ dan $W_{in} = 0$, sehingga dari persamaan (3) didapat nilai kerja yang dihasilkan turbin adalah :

$$W_{out} = \text{Massa uap} (h_2 - h_3) \quad (5)$$

• **Proses 3 ke 4**

Proses pengembunan terjadi setelah panas dipakai untuk keperluan proses, temperatur < 100 °C, proses ini dinyatakan dengan rumus :

$$(Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) = m_{fluida} (h_{akhir} - h_{awal}) \quad (6)$$

dimana : $Q_{in} = 0$, $W_{out} = 0$, $W_{in} = 0$, sehingga

$$-Q_{out} = m_{fluida} (h_{akhir} - h_{awal}) \quad (7)$$

atau :

$$-Q_{out} = m_{fluida} (h_3 - h_4) \quad (8)$$

• **Proses 4 ke 1**

Pada proses ini, $Q_{in} = 0$, $Q_{out} = 0$, $W_{out} = 0$, sehingga persamaan (6) berubah menjadi :

$$W_{in} = m_{fluida} (h_{akhir} - h_{awal}) \quad (10)$$

atau :

$$W_{in} = m_{fluida} (h_1 - h_4) \quad (11)$$

Kerja yang diperlukan oleh pompa diabaikan, sehingga $h_1 = h_4$, maka efisiensi termal (η_{Th}) dari sistem pembangkit listrik *cogen* adalah :

$$\eta_{Th} = \frac{W_{out} - W_{in}}{Q_{in}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (12)$$

Efisiensi *plant* pembangkit listrik cogen adalah :

$$\eta_{plant} = \eta_{Th} \times \eta_{mekanikal} \times \eta_{generator} \quad (13)$$

Dengan mengasumsikan dan berpedoman pada kondisi pabrik minyak sawit yang sudah beroperasi (*steam plant*) dimana volume *output boiler* (m_{boiler}) = 22,08 kg/detik, kapasitas maksimum, tekanan uap output boiler (P_B) = 14 kg/cm² = 199,08 psi = 14 atm Dan temperatur uap jenuh output *boiler* (T_B) = 194,1 °C maka nilai entalpi dapat ditentukan dengan menggunakan **Tabel 2**. Dalam **Tabel 2** diberikan data tekanan, suhu uap jenuh, kalor fasa cair dan kalor penguapan, serta entalpi pada tekanan dan temperatur tertentu. Data dalam **Tabel 2** akan digunakan menentukan harga parameter-parameter yang dihitung.

Langkah I

Tekanan dan temperatur akan menentukan besarnya entalphi (kandungan panas) pada tiap-tiap kondisi uap h_1 , h_2 , h_3 dan h_4 yang terlihat pada **Gbr. 2** kanan yaitu:

- Tekanan di titik 2 (P_2) = 14 atm, temperatur dititik 2 (T_2) = 194,1 °C dan entalpi = 666 kkal/kg.
- Untuk titik 1, tekanan = 0,2 atm, kandungan panas air pengisian boiler $h_1 = Q_w = 59,7$ °C (temperatur feed water boiler), dan nilai panas penguapan (r) = 563,5 kkal/kg.
- Besar h_3 (di titik 3) = $x \cdot r + (1 - x) Q_w$, maka $h_3 = (0,95 \times 563,5) + (1 - 0,95) \times 59,7 = 538,31$ kkal/kg.
- Entalpi $h_1 = h_4$ = kandungan panas air pengisian *boiler* = 59,7 °C (uap yang dikembalikan ke *water inlet boiler*)

Langkah II

Tingkat efisiensi termal (η_{Th}) dan efisiensi dari seluruh *power plant* (η_{plant}) yang dipanaskan lanjut (*super heated*) adalah:

$$\eta_{Th} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - Q_w} \times 100\% \quad (14)$$

$$\eta_{Th} = \frac{666 - 538,31}{666 - 59,7} \times 100\% = 21,06\% \quad (15)$$

Tabel 2. Kalor fasa cair dan kalor penguapan, serta entalpi pada tekanan dan temperatur tertentu

Tekanan (atm)	Suhu uap jenuh (°C)	Kalor, phase cair (kkal/kg)	Kalor penguapan (r) (kkal/kg)	Entalpi (kkal/kg)
0,01	6,6	6,6	591,4	598,0
0,02	17,1	17,1	585,8	602,9
0,03	23,7	23,7	582,3	606,0
0,04	28,6	28,6	579,6	608,2
0,05	32,6	32,6	578,9	611,5
0,07	38,5	38,5	574,2	612,7
0,10	45,5	45,4	571,6	617,0
0,15	53,6	53,5	567,0	620,5
0,20	59,7	59,6	563,5	623,1
0,30	68,7	68,6	558,2	626,8
0,40	75,4	75,4	554,1	629,5
0,50	80,9	80,9	550,6	631,5
0,60	85,4	85,4	548,0	633,4
0,70	89,5	89,5	545,6	635,1
0,80	93,0	93,0	543,2	636,2
1,0	99,1	99,1	539,4	638,5
1,5	100,8	110,9	531,9	642,8
2	119,6	119,9	525,9	645,8
3	132,9	133,4	516,9	650,3
4	142,9	143,6	509,8	653,4
5	151,1	152,1	503,7	655,8
6	158,1	159,3	498,5	657,8
7	164,2	165,6	493,8	659,4
8	169,6	171,3	489,5	660,8
9	174,5	176,4	485,6	662,2
10	179,0	181,2	481,8	663,3
12	187,1	189,7	475,0	664,7
14	194,1	197,1	468,9	666,0
16	200,4	203,9	463,2	667,1
18	206,1	210,1	457,8	667,9
20	211,4	215,8	452,7	668,5
25	222,9	228,5	440,9	669,4
30	232,6	239,5	430,2	669,7
40	249,2	258,2	410,8	669,0
50	262,7	274,2	393,1	667,3
60	274,3	288,4	376,6	665,0
70	284,5	300,9	361,2	662,1
80	293,6	312,6	346,3	658,9
90	301,9	323,6	331,5	655,1
100	309,5	334,0	317,1	651,1
120	323,2	353,9	288,0	641,9
140	331,1	372,4	258,6	631,0
160	345,7	390,3	227,5	617,8

Langkah III

Menentukan daya yang mampu dihasilkan oleh turbin uap (P_T) dan daya yang dihasilkan oleh generator (P_G).

$$P_T = \Delta h \cdot m_{boiler} \cdot \eta_{Th} \cdot \eta_{mekanikal} \quad (16)$$

dimana $\Delta h = h_2 - h_3$ (kkal /kg)= $666 - 538,31 = 127,69$ (kkal /kg), maka
 $= 127,69 \times 22,08 \times 0,2106 \times 0,93 \text{ kW} = 552,20 \text{ kW}$, sehingga

$$P_G = P_T \times \eta_G \text{ kW} \quad (17)$$

$$= 552,20 \times 0,92 = 905,024 \text{ kW}$$

Rasio antara uap yang dihasilkan boiler untuk proses dengan energi listrik yang mampu dibangkitkan (*steam ratio*)

$$Steam \ ratio = \frac{\text{kapasitas output maksimum boiler}}{\text{daya yang mampu dibangkitkan generator}} \quad (18)$$

$$Steam \ ratio = \frac{79500 \text{ kg / jam}}{508,024 \text{ kW}} = 156,488 \text{ kg / kWh}$$

Konsumsi Uap Spesifik atau *Specific Steam Consumption* (SSC)

$$SSC = \frac{3600}{h_2 - h_3} \quad (19)$$

$$SSC = \frac{3600}{666 - 538,31} = 28,19 \text{ kg / kWh}$$

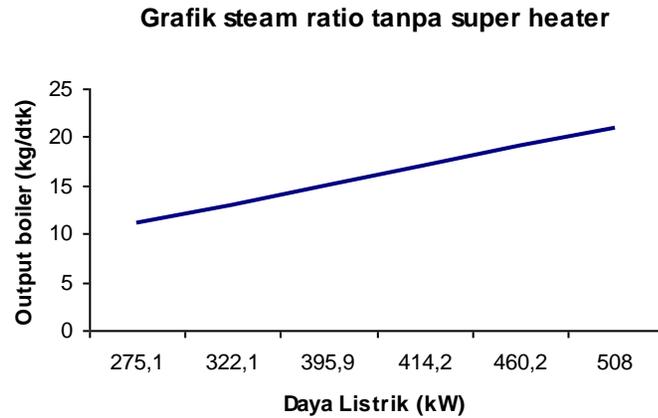
Konsumsi Bahan Bakar (*Gas Fuel Consumption* /GFC)

$$GFC = \frac{P_T}{\eta_{boiler} - \text{Nilai bakar}} \quad (20)$$

$$GFC = \frac{552,20 \text{ kW}}{0,9 - 0,885} = 693,28 \text{ kg gas alam / jam}$$

Steam ratio di atas adalah nilai maksimum, artinya nilai tersebut dapat dicapai jika boiler beroperasi pada kapasitas kerja maksimum.

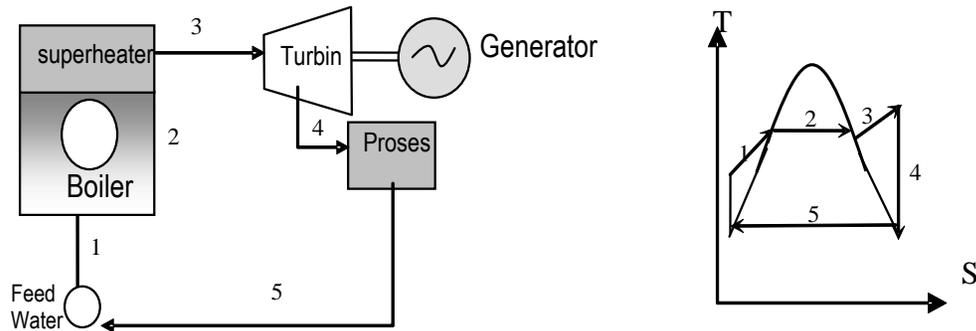
Grafik *steam ratio* pembangkit cogen tanpa *superheater* diberikan pada **Gbr. 3**.



Gbr. 3. Grafik *steam ratio* pembangkit cogen tanpa *superheater*

4.2. Boiler dengan *Superheater*

Diagram siklus dengan *superheater* dapat dilihat pada **Gbr. 4**. Sedikit berbeda dengan siklus yang tidak memakai *superheater*. Ada 5 kondisi, sehingga perhitungan efisiensi termalnya juga berbeda. Menentukan besarnya entalphi (kandungan panas) pada tiap-tiap kondisi uap h_1 , h_2 , h_3 dan h_4 dari gambar diagram siklus power plant bisa mengambil data uap jenuh dalam **Tabel 3**.



Gbr. 4. Diagram *power plant* dengan *superheater* (kiri), Diagram T-S (kanan)

Dengan menggunakan *superheater*, maka tekanan dan temperatur dapat dinaikkan masing-masing menjadi 14 atm dan 500 °C. Nilai entalphi pada masing-masing kondisi dapat diketahui dengan menggunakan **Tabel 3**.

Langkah I*

- Tekanan di titik 2 (P_2) = 14 atm, temperatur di titik 2 (T_2) = 194,1 °C dan entalpi (h_2) = 666 kkal/kg.
- Untuk titik 3, Tekanan (P_3) = 14 atm, dan temperatur di titik 3 (T_3) = 500 °C, dan entalpi (h_3) = 828,8 kkal/kg.
- Untuk titik 1, Tekanan = 0,2 atm, kandungan panas air pengisian boiler $h_1 = Q_w = 59,7$ °C (temperatur *feed water boiler*), dan nilai panas penguapan (r) = 563,5 kkal/kg
- Besar h_4 (di titik 4) = $x \cdot r + (1 - x) Q_w$, maka
 $H_4 = (0,95 \times 563,5) + (1 - 0,95) \times 59,7 = 538,31$ kkal/kg
- Entalpi $h_1 = h_5 =$ (temperatur *feed water*)

Tabel 3. Nilai entalpi pada tekanan dan temperatur uap jenuh dan uap lanjut

Tekanan uap absolut, P (atm)	Suhu, T (°C)	h = kandungan panas = Entalpi uap (kkal/kg. uap)							
		Uap jenuh	Uap dipanaskan lanjut pada suhu						
			200 ^o	250 ^o	300 ^o	350 ^o	400 ^o	450 ^o	500 ^o
1,0	99,1	638,5	686,5	709,9	733,5	757,5	781,9	806,7	832,1
1,2	104,3	640,3	686,3	709,7	733,4	757,4	781,8	806,7	832,1
1,4	108,7	642,0	686,1	709,6	733,3	757,3	781,7	806,6	832,0
1,6	112,7	643,5	685,8	709,4	733,2	757,2	781,6	806,6	832,0
1,8	116,3	644,7	685,6	709,3	733,0	757,1	781,6	806,5	831,9
2,0	119,6	645,8	685,4	709,1	732,9	757,0	781,5	806,4	831,9
2,5	126,8	648,3	684,9	708,7	732,6	756,8	781,3	806,3	831,7
3,0	132,9	650,3	684,4	708,3	732,3	756,5	781,1	806,1	831,6
4,0	142,9	653,4	683,3	707,5	731,7	756,1	780,7	805,8	831,4
5,0	151,1	655,8	682,2	706,8	731,1	755,6	780,4	805,5	831,1
6,0	158,1	657,8	681,1	706,0	730,5	755,1	780,0	805,2	830,9
7,0	164,2	659,4	679,9	705,2	729,9	754,6	779,6	804,9	830,6
8,0	169,6	660,8	678,7	704,4	729,3	754,2	779,2	804,6	830,4
9,0	174,5	662,0	677,4	703,5	728,7	753,7	778,8	804,3	830,1
10	179,0	663,0	676,1	702,8	728,1	753,3	778,4	804,0	829,8
12	187,1	664,7	673,3	701,1	726,8	752,3	777,7	803,3	829,4
14	194,1	666,0	670,2	699,4	725,6	751,3	776,9	802,7	828,8
16	200,4	667,1	-	697,6	724,4	750,4	776,2	802,1	828,3
18	206,1	669,1	-	695,7	723,2	749,4	775,4	801,5	827,8
20	211,4	668,5	-	694,0	721,9	748,5	774,7	800,8	827,3
25	222,9	669,4	-	688,9	718,6	746,0	772,7	799,3	826,0
30	232,8	669,7	-	683,3	715,2	743,6	770,8	797,7	824,7
35	241,4	669,5	-	676,9	711,6	741,0	768,8	796,1	823,4

Langkah II*

Menentukan tingkat efisiensi termal (η_{Th}) dan efisiensi dari seluruh *power plant* (η_{plant}) yang dipanaskan lanjut / *superheater* bisa menggunakan data dalam **Tabel 3**.

$$\eta_{Th} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - Q_w} \times 100\%$$

$$\eta_{Th} = \frac{828,8 - 538,31}{828,8 - 59,7} \times 100\% = 37,77\%$$

sehingga efisiensi *plant* pembangkit listrik cogen adalah :

$$\eta_{plant} = \eta_{Th} \times \eta_{mekanikal} \times \eta_{generator}$$

$$= 0,3777 \times 0,95 \times 0,92 \times 100\% = 33,01 \%$$

Langkah III*

Menentukan daya yang mampu dihasilkan oleh turbin uap (P_T) dan daya yang dihasilkan oleh generator (P_G).

$$P_T = \Delta h \cdot m_{boiler} \cdot \eta_{Th} \cdot \eta_{mekanikal}$$

dimana : $\Delta h = h_3 - h_4$ (kkal /kg) = 828,8 – 538,31 = 290,49 (kkal /kg), maka

$$P_T = 290,49 \times 22,08 \times 0,3777 \times 0,93 \text{ kW} = 2253 \text{ kW}, \text{ sehingga didapat}$$

$$P_G = P_T \cdot \eta_G \text{ kW} = 2253 \times 0,92 = 2072,76 \text{ kW}$$

Steam ratio, rasio antara uap yang dihasilkan boiler untuk proses dengan energi listrik yang dibangkitkan dituliskan sebagai berikut:

$$\text{Steam ratio} = \frac{\text{kapasitas output maksimum boiler}}{\text{daya yang mampu dibangkitkan generator}}$$

$$\text{Steam ratio} = \frac{79500 \text{ kg / jam}}{2073 \text{ kW}} = 38,35 \text{ kg / kWh}$$

Konsumsi Uap Spesifik atau *Specific Steam Consumption* (SSC)

$$SSC = \frac{3600}{h_3 - h_4}$$

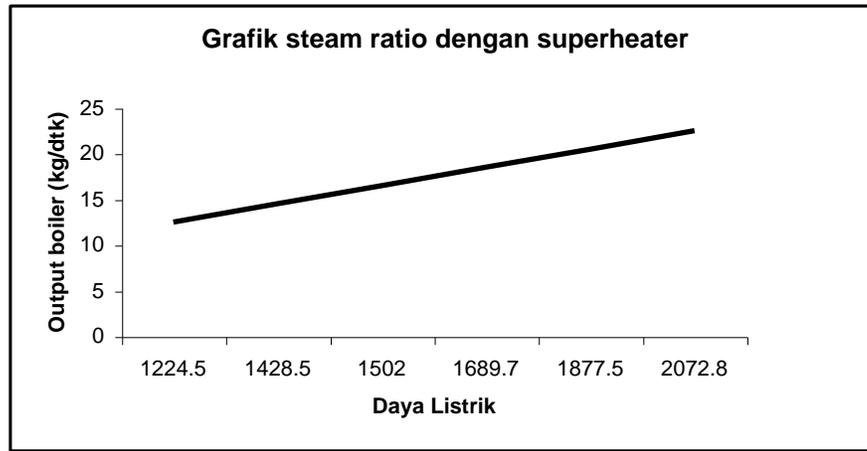
$$SSC = \frac{3600}{828,8 - 538,31} = 12,39 \text{ kg / kWh}$$

Konsumsi Bahan Bakar (*Gas Fuel Consumption* /GFC)

$$GFC = \frac{P_T}{\eta_{boiler} \cdot \text{Nilai bakar}}$$

$$GFC = \frac{2253 \text{ kW}}{0,9 - 0,885} = 2828,63 \text{ kg gas alam / jam}$$

Steam ratio di atas adalah nilai maksimum, artinya nilai tersebut dapat dicapai jika *boiler* beroperasi pada kapasitas kerja maksimum, lihat **Gbr. 4**.



Gbr. 4. Grafik *steam ratio* pembangkit cogen dengan *superheater*

Dari hasil perhitungan di atas dapat dilihat bahwa steam plant yang menggunakan perangkat *superheater* jauh lebih tinggi efisiensinya maupun jumlah listrik yang dibangkitkan, bahkan bisa 3 kali lebih besar dari pada yang tidak menggunakan perangkat *superheater*.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

- Perencanaan pembangkit listrik harus memperhatikan :
 - Ketersediaan (*Continuity*) daya,
 - Kualitas (*Quality*) daya listrik,
 - Keandalan (*Reliability*) sistem ,
 - Keamanan (*Safety*) peralatan bagi manusi dan
 - Harga ekonomi (*Economy*).
- Dalam perencanaan, beban-beban yang termasuk beban kritis harus lebih diutamakan dibandingkan dengan beban-beban esensial dan beban normal.
- *Steam plant* yang menggunakan perangkat *superheater*, memiliki efisiensi dan daya listrik yang dibangkitkan lebih tinggi hingga 3 kali lebih besar dari pada yang tidak menggunakan perangkat *superheater*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Agus P Nugroho, "Pra Rancangan Sistem Pembangkit Listrik Co-Generation pada Pabrik Minyak Nabati", ITI, Serpong, Jakarta, 2001.
- [2] Djokosetyardjo, M.J.Ir., "Ketel Uap", Cetakan kedua. Pradnya Paramita, Jakarta, 1989.
- [3] Wai-Kai Chen, "Electrical Engineering Handbook", Elsevier Academic Press, 2005.
- [4] Fluor Daniel, "Generator and Motors", Design and Engineering Practice. Netherland, 1992.
- [5] Kadir, Abdul, Ir., "Pembangkit Tenaga Listrik", UI Jakarta Press, 1996.
- [6] Kleinpeter, Maxime, "Energy Planning and Policy", John Wiley & Sons Ltd. England, 1995.
- [7] Kontra, Ketut, Ir., "Perencanaan Sistem Tenaga Listrik", Diktat Teknik Elektro UI, Jakarta, 2000.
- [8] Marsudi, Jiteng, "Operasi Sistem Tenaga Listrik", Balai Penerbit dan Humas ISTN, Jakarta, 1990.
- [9] PTP Nusantara IV, "Pedoman Pengoperasian Sistem Pembangkit Listrik Fraksinasi dan Rafinari", Bagian Teknik dan Teknologi, 1992.
- [10] Sriyono, Dakso, "Turbin, Pompa dan Kompresor", Cetakan ketiga. Erlangga. Jakarta, 1992.
- [11] Weedy, B.M., "Electric Power System", Third Edition, John Wil, 1980.
- [12] Zuhail, "Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya", PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta, 1992.
- [13] SNI 04-0225-2000, "Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000)", BSN, Jakarta, 2000.
- [14] IEEE Std 141-1993 (Revision of IEEE Std 141-1986) "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants" The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 45 East 47th Street, New York, NY 10017-2394, USA, 1993.
- [15] IEEE Std 399-1990, "IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (IEEE Brown Book)", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 345 East 47th Street, New York, NY 10017-2394, USA, 1990.