

SIMULASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS DAN UAP TANJUNG PRIUK

**Engkos Achmad Kosasih, Mahasiswa Jurusan Mesin
Fakultas Pasca Sarjana, Institut Teknologi Bandung
Aryadi Suwono, Lab. Termodinamika, PAU - Ilmu Rekayasa ITB**

ABSTRAK

Pencocokan setiap komponen PLTGU bisa dilakukan dengan suatu program simulasi. Pada penelitian ini, simulasi keadaan tunak dibuat untuk PLTGU Tanjung Priuk dengan beberapa penyederhanaan. Tiap blok PLTGU tersebut terdiri dari 3 buah siklus gas dan 1 buah siklus uap dengan 3 buah HRSG. Data yang diambil dari ruang kontrol diolah untuk mendapatkan persamaan karakteristik garis operasi dari setiap komponen. Selanjutnya program simulasi dibuat berdasarkan persamaan-persamaan tersebut bersama-sama dengan persamaan persamaan fisik lainnya sehingga terbentuk sistem persamaan simultan 47 persamaan dengan 47 variabel. Program simulasi ternyata bisa mencapai nilai konvergen untuk berbagai input beban (daya total) serta menunjukkan kecenderungan yang sama dengan data ruang kontrol, khususnya dalam hal efisiensi siklus kotor (bruto).

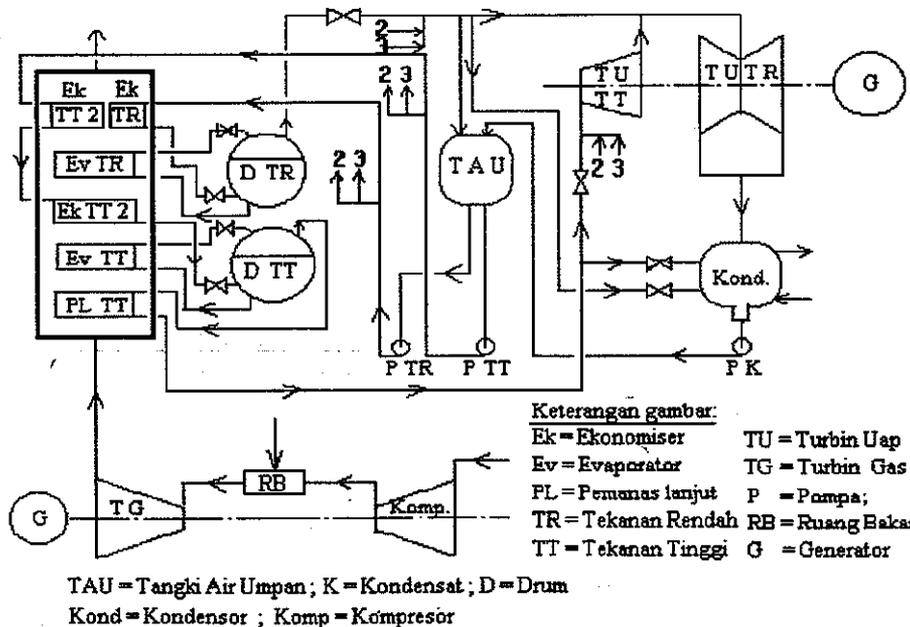
1. PENDAHULUAN

Yang dimaksud dengan simulasi sistem disini adalah perhitungan variabel-variabel operasi (seperti tekanan, temperatur, dan aliran energi dan fluida) pada suatu sistem termal dalam keadaan tunak⁽⁹⁾. Dalam simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU), variabel-variabel tersebut dihitung untuk berbagai beban, baik dititik rancang maupun diluar titik rancang (*off design conditions*). Secara matematis simulasi PLTGU tidak lain merupakan penyelesaian sistem persamaan yang diantaranya adalah persamaan karakteristik dari tiap komponennya.

Dari waktu ke waktu, kebutuhan energi listrik di Indonesia makin meningkat sesuai dengan laju pertumbuhan industri. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, baik pihak P.T. PLN (Persero) maupun kalangan industri banyak menggunakan PLTGU.

Perangkaian atau pencocokan setiap unsur (komponen) PLTGU bisa dilakukan dengan metode pendekatan simulasi. Simulasi ini bahkan bisa digunakan untuk optimasi sistem PLTGU tersebut, sehingga simulasi merupakan bagian yang penting dalam perancangan.

Artikel ini bermaksud mencoba membuat program simulasi untuk sistem PLTGU Tanjung Priuk, serta menguji kovergensi dan kelayakannya.



Gambar 1 Diagram alir PLTGU

Pengujian hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data dari ruang kontrol untuk berbagai nilai daya (beban) total, yaitu dalam dua variabel berikut:

- Efisiensi siklus bruto.
- Konsumsi bahan bakar spesifik (SFC).

Sistem PLTGU Tanjung Priuk, seperti pada umumnya sistem PLTGU, merupakan sistem yang kompleks. Untuk penyederhanaan maka pembahasan simulasi dibatasi untuk sistem pada Gb.1. Simulasi juga dibatasi untuk sistem dalam keadaan tunak.

2. LANDASAN TEORI

Untuk membuat simulasi PLTGU, terdapat cukup banyak teori dasar yang harus dibahas. Namun disini hanya akan dibicarakan beberapa saja, yaitu meliputi penyelesaian sistem persamaan, penukar panas dan persamaan keadaan air-uap air.

2.1 Sistem Persamaan

Persamaan persamaan yang terdapat dalam suatu sistem PLTGU umumnya bukan persamaan linier. Jadi untuk menyelesaikan sistem persamaan tersebut diperlukan metode linierisasi, yang akan digunakan disini adalah metode Newton-Raphson.

2.1.1 Sistem Persamaan Linier

Penyelesaian suatu sistem persamaan linier sering kali dilakukan dengan bantuan aljabar matrik. Suatu sistem persamaan linier dapat dituliskan sebagai berikut:

$$[A][X] = [C] \quad (1)$$

dengan

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad [X] = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix}$$

Matrik [A] adalah matrik koefisien sistem persamaan. Jelas bahwa matrik [A] dan [C] diketahui dan matrik [X] adalah matrik yang dicari. Terdapat beberapa cara untuk menyelesaikan persamaan ini, dan cara yang akan digunakan di sini adalah langkah-langkah sebagai berikut:

1. Melakukan operasi baris elementer sampai [A] menjadi matrik 'segitiga atas, sehingga sistem persamaan menjadi:

$$\begin{bmatrix} a_{11}^1 & a_{12}^1 & \dots & a_{1n}^1 \\ 0 & a_{22}^1 & \dots & a_{2n}^1 \\ 0 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1^1 \\ c_2^1 \\ \dots \\ c_n^1 \end{bmatrix}$$

2. Melakukan substitusi mundur yaitu menghitung nilai x_n dimulai dari $x_n = c_n^1 / a_{nn}^1$ dan seterusnya sampai dengan :

$$x_1 = \frac{c_1^1 - \sum_{i=2}^n a_{1i}^1 x_i}{a_{11}^1}$$

2.1.2 Metode Newton Raphson

Metode linierisasi ini didapat dengan menguraikan fungsi multi-variabel melalui bantuan ekspansi deret Taylor dan melakukan pemotongan mulai dari suku turunan kedua. Dengan cara ini maka sistem persamaan tak-linier:

$$f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$

menjadi

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \dots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

dengan

$$\Delta x_i = x_{it} - x_{ic}$$

atau

$$x_{ic} = x_{it} - \Delta x_i \quad (3)$$

Jika x_{it} adalah nilai x_i pada suatu langkah iterasi maka dengan menyelesaikan pers. (2) di atas untuk Δx_i , akan didapat nilai x_{ic} dengan pers. (3). Nilai x_{ic} ini adalah nilai x_i pada iterasi berikutnya. Iterasi dilakukan terus sampai kesalahan relatif cukup kecil.

Turunan parsial dilakukan dengan pendekatan numerik sebagai berikut:

$$\frac{\partial f_j}{\partial x_i} = \frac{f_j(x_{1i}, x_{2i}, \dots, (1 + 1.10^{-7})x_{ii}, \dots, x_{ni}) - f_j(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ii}, \dots, x_{ni})}{(1.10^{-7}x_{ii})} \quad (4)$$

2.2 Penukar Panas

Dalam sistem PLTGU, seperti sistem pada Gb. (1), terdapat beberapa alat penukar panas sebagai penghasil (*generator*) uap dengan pemanfaatan panas yang dikandung gas buang dari turbin gas yang disebut Heat Recovery Steam Generator (HRSG). HRSG ini terdiri dari-3 bagian yaitu ekonomiser, evaporator dan pemanas lanjut. Alat penukar panas yang lain adalah kondenser (*condensor*).

2.2.1 Ekonomiser dan Pemanas Lanjut

Dalam HRSG pada Gb.1 terdapat ekonomiser dan pemanas lanjut dari jenis *Multipass Overall-Counter Flow*. Tiap laluan merupakan alat penukar kalor dari jenis *cross flow, one fluid "mixed"*.

Efektivitas satu laluan adalah: [6:21]

$$\epsilon_p = \frac{C_{max}}{C_{min}} \left(1 - e^{-\tau \cdot C_{min} / C_{max}} \right) \quad (5)$$

dengan

$$\tau = 1 - e^{-AU/C_{min}}$$

AU = luas x koefisien perpindahan panas menyeluruh.

C_{max} = laju aliran x panas jenis gas = $m_g \cdot c_{pg}$

Untuk ekonomiser:

C_{min} = laju aliran x panas jenis air = $m_a \cdot c_{pa}$

Untuk pemanas lanjut:

C_{min} = laju aliran x panas jenis uap = $m_u \cdot c_{pu}$

Efektivitas menyeluruh untuk n laluan adalah: [6: 21]

$$\epsilon = \frac{[(1 - \epsilon_p C_{min} / C_{max}) / (1 - \epsilon_p)]^n - 1}{[(1 - \epsilon_p C_{min} / C_{max}) / (1 - \epsilon_p)]^n - C_{min} / C_{max}} \quad (6)$$

2.2.2 Evaporator dan Kondenser

Rumus efektivitas yang berlaku untuk evaporator dan kondenser adalah sama yaitu :

$$\epsilon = 1 - e^{-AU/C_{min}} \quad (7)$$

Untuk evaporator:

C_{min} = laju aliran x panas jenis gas = $m_g \cdot c_{pg}$

Untuk kondenser:

C_{min} = laju aliran x panas jenis air pendingin = $m_g \cdot c_{pp}$

2.3 Persamaan Tingkat Keadaan

Persamaan tingkat keadaan yang berlaku untuk air, uap dan campurannya dapat diturunkan dari hubungan tekanan-temperatur jenuh dan fungsi Gibbs sebagai berikut

Hubungan tekanan-temperatur jenuh:

$$p = p_s(T) \quad (8)$$

Fungsi Gibbs:

untuk air:

$$g = g_1(p, T) \quad (9)$$

untuk uap:

$$g = g_2(p, T) \quad (10)$$

Dari fungsi Gibbs diatas dapat diturunkan fungsi tingkat keadaan lain. Yang akan digunakan disini adalah entropi dan entalpi.

Entropi:

untuk air:

$$s = s_1(p, T) = - \left(\frac{\partial g_1(p, T)}{\partial T} \right)_p \quad (11)$$

untuk uap:

$$s = s_2(p, T) = - \left(\frac{\partial g_2(p, T)}{\partial T} \right)_p \quad (12)$$

Entalpi:

untuk air:

$$h = h_1(p, T) = g_1(p, T) + T \cdot s_1(p, T) \quad (13)$$

untuk uap:

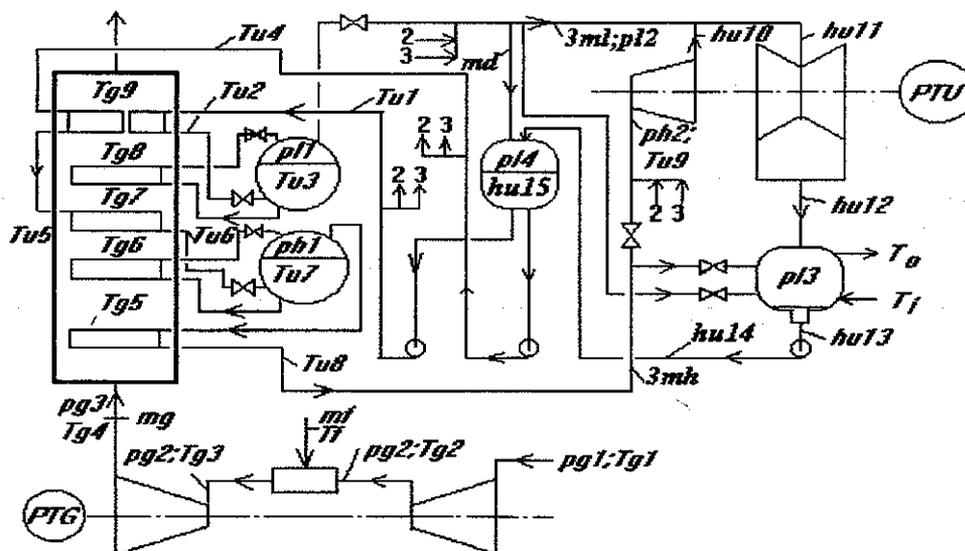
$$h = h_2(p, T) = g_2(p, T) + T \cdot s_2(p, T) \quad (14)$$

Dari Pers. (11) sampai dengan Pers. (14) kita bisa menurunkan suatu fungsi yang memberikan nilai entalpi sebagai fungsi entropi dan tekanan:

$$h = h(s, p) \quad (15)$$

3. PENGOLAHAN DATA DAN REGRESI

Dari Gb. (1) terlihat bahwa untuk membuat simulasi sistem tersebut diperlukan data karakteristik individu tiap-tiap komponen.



Gambar 2 Penamaan variabel

Beberapa penamaan variabel adalah seperti ditunjukkan dalam Gb. (2).

Data yang didapat di ruang kontrol memiliki kelemahan, yaitu: alat-alat ukur belum dikalibrasi lagi, keadaan tunak tidak pernah dicapai, spesifikasi alat ukur tidak lengkap, serta tidak semua variabel yang dibutuhkan bisa didapat. Kendala tersebut tidak semuanya bisa diatasi, misalnya kendala yang pertama. Kendala kedua dicoba untuk diatasi dengan mengambil nilai rata-rata perjam dari tiap variabel. Kendala ketiga memaksa kita untuk menggunakan variabel terukur dan bukan variabel stagnasi dalam membuat persamaan karakteristik, misalnya untuk kompresor. Sedangkan kendala keempat bisa diatasi dengan melakukan beberapa perhitungan untuk melengkapi data dan pada akhirnya mendapatkan parameter-parameter karakteristik. Untuk itu, pengolahan data akan dibagi menjadi 3 bagian yaitu bagian turbin uap - kondenser, bagian HRSG, dan bagian turbin gas.

Pembahasan bagian turbin uap - kondenser mencakup proses uap keluar HRSG sampai air kembali ke HRSG. Pembahasan bagian HRSG mencakup proses air memasuki HRSG sampai dengan uap keluar dari HRSG, juga mulai gas memasuki HRSG sampai dengan gas keluar dari HRSG. Pembahasan bagian turbin gas mencakup proses udara memasuki kompresor dan bahan bakar gas memasuki ruang bakar sampai dengan gas pembakaran keluar dari turbin gas, memasuki HRSG.

3.1. Turbin Uap - Kondenser

Data dari ruang kontrol yang digunakan dalam perhitungan pada bagian ini adalah, lihat Gb. (2):

$$P_{TU}, m_1, m_h, t_{p1}, p_{11}, p_{12}, p_{h2}, T_{u9} \text{ dan } T_{u1}.$$

Dan yang dihitung adalah, lihat Gb. (2):

$$m_d, T_{u3}, T_{u4}, \eta_{TU}, h_{u1}, h_{u3}, h_{u4} \text{ dan } h_{u9}.$$

Langkah selanjutnya, setelah penghitungan tersebut, adalah membuat persamaan karakteristik, sbb:

Hubungan antara laju aliran uap m_1 dan m_h dengan tekanan masuk turbin uap p_{12} , dan p_{h2} :

Karena hubungan ini bisa dianggap linier dan melalui titik (0,0) [8:160], maka koefisien-nya hanya merupakan rata-rata aljabar dari koefisien untuk semua data. Dengan cara ini akan didapat hubungan berikut:

$$m_h = 1,0568 \cdot 10^{-5} \cdot p_{h2} \quad (16)$$

$$p_{12} = 4,5715 \cdot 10^3 \cdot (m_1 + m_h) \quad (17)$$

Hubungan antara laju aliran uap untuk deaerator dengan laju aliran kondensat:

Dengan cara regresi, didapat:

$$m_d = 1,8848 \cdot 10^{-3} \cdot (m_1 + m_h) + 5,3286 \quad (18)$$

Hubungan antara efisiensi turbin uap dengan laju aliran uap:

Dengan cara regresi, didapat:

$$\eta_{TU} = 1,5234 \cdot 10^{-3} (m_1 + m_h) + 7,1957 \cdot 10^{-1} \quad (19)$$

Hubungan antara laju aliran uap dengan jatuh tekanan sebelum masuk turbin uap:

Dari hubungan antara parameternya maka persamaan didekati dengan suatu fungsi pangkat dua, sehingga dengan cara regresi, didapat:

$$p_{h1} - p_{h2} = 3,803 \cdot 10^2 \cdot m_h^2 - 2,3161 \cdot 10^4 \cdot m_h + 7,6571 \cdot 10^5 \quad (20)$$

$$p_{11} - p_{12} = -1,0689 \cdot 10^3 \cdot (m_1 + m_d / 3)^2 + 4,5817 \cdot 10^4 \cdot (m_1 + m_d / 3) - 4,2153 \cdot 10^5 \quad (21)$$

3.2 HRSG

Tujuan dari perhitungan dalam bagian ini adalah untuk menghitung hasil kali luas perpindahan panas dengan koefisien perpindahan panas menyeluruh (AU) tiap tiap alat penukar panas dalam HRSG. Nilai-nilai AU yang akan digunakan dalam simulasi adalah nilai rata-rata dari semua data yang diperoleh.

Masukan untuk perhitungan ini adalah: $T_{g4}, T_{g9}, T_{u1}, T_{u2}, T_{u5}, T_{u6}, T_{u9}, m_1, m_h, p_{11}$ dan p_{h1} yang didapat dari ruang kontrol serta $m_d, T_{u3}, T_{u4}, h_{u1}, h_{u3}, h_{u4}$ dan h_{u9} dari hasil perhitungan seperti diuraikan pada sub-bab.3.1.

Nilai-nilai AU yang didapat dari hasil perhitungan adalah sebagai berikut:

- ◇ $AUL = 3,6290 \cdot 10^4$ [W/K] untuk satu laluan ekonomiser tekanan rendah.
- ◇ $AUHI = 4,9054 \cdot 10^4$ [W/K] untuk satu laluan ekonomiser tekanan tinggi tingkat ke-1.
- ◇ $AUEL = 6,0498 \cdot 10^5$ [W/K] untuk evaporator tekanan rendah.
- ◇ $AUH2 = 7,6520 \cdot 10^4$ [W/K] untuk ekonomiser tekanan tinggi tingkat ke-2.
- ◇ $AUEH = 1,0765 \cdot 10^6$ [W/K] untuk evaporator tekanan tinggi.
- ◇ $AUSH = 7,3200 \cdot 10^4$ [W/K] untuk pemanas lanjut.

3.3 Turbin Gas

Tujuan utama bagian ini adalah menghitung parameter-parameter karakteristik tiap komponen turbin gas. Sehingga pada akhirnya bisa didapatkan suatu fungsi yang menghubungkan parameter-parameter tersebut, dengan metoda regresi.

Masukan yang diperlukan pada perhitungan dalam bagian ini adalah: $T_{g1}, T_{g3}, T_{g4}, T_{g9}$, daya generator turbin gas P_{TG} , debit bahan bakar $Q_f, p_{g1}, p_{g2}, p_{g3}, m_1$, dan m_h yang semuanya didapat dari ruang kontrol, serta $m_d, h_{u1}, h_{u3}, h_{u4}$, dan h_{u9} yang didapat dari hasil perhitungan seperti diuraikan pada sub-bab.3.1.

Langkah selanjutnya, setelah penghitungan tersebut, adalah membuat persamaan karakteristik, sbb:

Hubungan antara efisiensi dan rasio kompresi dengan laju aliran udara dalam kompresor:

Hasil regresi memberikan:

$$K_{C2} = 0,012127 \cdot \exp(72,0059 \cdot K_{C1}) + 7,0 \quad (22)$$

$$\eta_C = -361,6858 \cdot K_{C1}^2 + 63,1271 \cdot K_{C1} - 1,8557 \quad (23)$$

dengan

- η_C = efisiensi kompresor
- $K_{C1} = \frac{m_u \sqrt{T_{g1}}}{P_{g1}}$
- $K_{C2} = P_{g2} / P_{g1}$ = rasio kompresi

Hubungan antara efisiensi ruang bakar dengan rasio bahan bakar-udara:

Hasil regresi memberikan:

$$\eta_{RB} = 1,0957 \cdot \exp(-8,3537 \cdot f_{\alpha}) \quad (24)$$

Hubungan antara efisiensi dan laju aliran gas dengan rasio ekspansi dalam turbin gas:

Hasil regresi memberikan:

$$K_{T2} = 0,020586 \cdot \exp(-0,027832 \cdot K_{T1}) \quad (25)$$

$$\eta_{TG} = 0,94886 \cdot \exp(-0,006462 \cdot K_{T1}) \quad (26)$$

dengan:

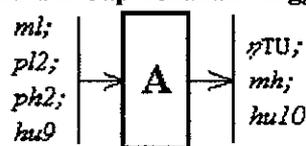
- η_{TG} = efisiensi turbin gas
- $K_{T1} = P_{g2} / P_{g3}$ = rasio ekspansi
- $K_{T2} = \frac{m_g \sqrt{T_{g3}}}{P_{g3}}$

4. SIMULASI

Untuk mengurangi jumlah persamaan dalam simulasi maka beberapa persamaan digabungkan menjadi satu persamaan. Hal ini disebabkan tidak semua variabel didalam blok diperlukan oleh blok yang lain. Dengan demikian maka secara keseluruhan simulasi merupakan penyelesaian 47 persamaan dengan 47 variabel. Variabel-variabel tersebut adalah:

$x_1 = m_h$	$x_2 = \eta_{TU}$	$x_3 = T_{u9}$	$x_4 = s_{u10i}$
$x_5 = h_{u10i}$	$x_6 = h_{u11}$	$x_7 = p_{12}$	$x_8 = h_{u12}$
$x_9 = T_{u13}$	$x_{10} = p_{13}$	$x_{11} = h_{u13}$	$x_{12} = P_{TU}$
$x_{13} = m_d$	$x_{14} = h_{u15}$	$x_{15} = T_{u15}$	$x_{16} = h_{u1}$
$x_{17} = T_{u1}$	$x_{18} = h_{u4}$	$x_{19} = T_{u4}$	$x_{20} = T_{u2}$
$x_{21} = T_{u5}$	$x_{22} = T_{u3}$	$x_{23} = p_{11}$	$x_{24} = h_{u3}$
$x_{25} = T_{g8}$	$x_{26} = T_{u6}$	$x_{27} = T_{g7}$	$x_{28} = T_{u7}$
$x_{29} = p_{h1}$	$x_{30} = h_{u7}$	$x_{31} = T_{g6}$	$x_{32} = T_{u8}$
$x_{33} = T_{g5}$	$x_{34} = h_{u9}$	$x_{35} = m_1$	$x_{36} = p_{h2}$
$x_{37} = p_{g2}$	$x_{38} = \eta_C$	$x_{39} = T_{g2}$	$x_{40} = f$
$x_{41} = \eta_{RB}$	$x_{42} = m_f$	$x_{43} = m_g$	$x_{44} = \eta_{TG}$
$x_{45} = T_{g4}$	$x_{46} = P_{TG}$	$x_{47} = T_{g3}$	

4.1 Blok A: Turbin Uap Tekanan Tinggi



Gambar 3 Blok A: Turbin uap tekanan tinggi

Dari Pers. (16) didapat:

$$f_1 = m_h - 1,0568 \cdot 10^{-5} \cdot p_{h2} \quad (27)$$

Dari Pers. (19) didapat:

$$f_2 = \eta_{TU} - 1,5234 \cdot 10^{-3} (m_i + m_h) - 7,1957 \cdot 10^{-1} \quad (28)$$

Entalpi uap yang memasuki turbin sebagai fungsi tekanan dan temperatur:

$$f_3 = h_{u9} - h_2(p_{h2}, T_{u9}) \quad (29)$$

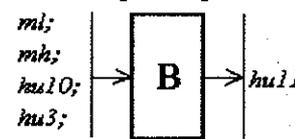
Entropi uap memasuki turbin sama dengan entropi uap keluar turbin jika ekspansi terjadi secara isentropis, maka:

$$f_4 = s_{u10i} - s_2(p_{h2}, T_{u9}) \quad (30)$$

Hubungan jatuh entalpi dengan efisiensi isentropis adalah:

$$f_5 = h_{u10} - h_{u9} + \eta_{TU} [h_{u9} - h(s_{u10i}, p_{12})] \quad (31)$$

4.2 Blok B: Titik Campur Uap

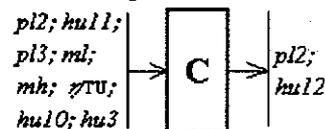


Gambar 4 Blok B: Titik campur uap

Neraca energi pada titik campur uap memberikan:

$$f_6 = h_{u11} - \frac{m_h \cdot h_{u10} + m_1 \cdot h_{u3}}{m_1 + m_h} \quad (32)$$

4.3 Blok C: Turbin Uap Tekanan Rendah



Gambar 5 Blok C: Turbin uap tekanan rendah

Dua variabel tambahan yaitu h_{u12i} dan s_{u12i} menghasilkan dua persamaan tambahan. Namun dengan menggabungkannya maka jumlah persamaan tetap hanya dua persamaan saja.

Dari pers. (17) didapat:

$$f_7 = p_{12} - 4,5715 \cdot 10^3 \cdot (m_i + m_h) \quad (33)$$

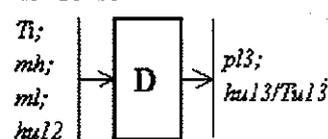
Hubungan jatuh entalpi dengan efisiensi isentropis turbin uap tekanan rendah, yang diasumsikan sama dengan efisiensi isentropis turbin uap tekanan tinggi, dinyatakan oleh 3 persamaan berikut:

$$f_8 = h_{u12} - h_{u11} + \eta_{TU} \cdot (h_{u11} - h_{u12i}) \quad (34)$$

dengan $h_{u12i} = h(s_{u12i}, p_{13})$

dan $s_{u12i} = s_2(p_{12}, T_{u11})$

4.4 Blok D: Kondenser



Gambar 6 Blok D: Kondenser

Persamaan neraca energi di kondenser:

$$f_9 = T_{u13} - T_i - \frac{3(m_i + m_h)(h_{u12} - h_{u13})}{2.1877 \cdot 10^8 \cdot 0.518} \quad (35)$$

Pada persamaan di atas terdapat $m_p c_{pp}$ dan ε_c , berturut-turut adalah kapasitas panas air pendingin dan efektivitas kondenser, yaitu:

$m_p c_{pp} = 2,1877 \cdot 10^8$ [W/K] dan $\varepsilon_c = 0,518$ dan diasumsikan tetap.

Tekanan kondenser sebagai fungsi temperatur:

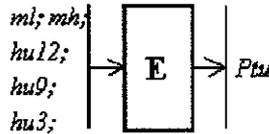
$$f_{10} = P_B - P_s(T_{u13}) \quad (36)$$

Entalpi air jenuh yang keluar dari kondenser sebagai fungsi tekanan dan temperatur jenuh:

$$f_{11} = h_{u13} - h_1(P_B, T_{u13}) \quad (37)$$

4.5 Blok E: Persamaan Daya Generator Turbin Uap

Blok ini tidak mewakili komponen tertentu, tetapi lebih merupakan suatu persamaan neraca energi yang meliputi energi uap, kerugian-kerugian mekanik dan generator turbin uap, serta daya generator listrik.



Gambar 7 Blok E: Persamaan daya generator turbin uap

Persamaan neraca energi tersebut adalah:

$$f_{12} = P_{TU} - \eta_{GTU} [3 \cdot m_i \cdot h_{u3} + 3 \cdot m_h \cdot h_{u9} - 3 \cdot (m_i + m_h) \cdot h_{u12} - 3,954 \cdot 10^5] \quad (38)$$

Angka $0,3954 \cdot 10^6$ adalah kerugian mekanik dalam MW serta efisiensi generator turbin uap adalah:

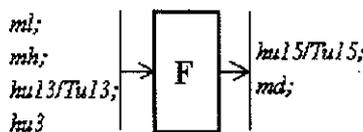
$$\eta_{GTU} = 9,3484 \cdot 10^{-9} \cdot (P_{TU} \cdot 10^{-6})^3 - 4,7199 \cdot 10^{-6} \cdot (P_{TU} \cdot 10^{-6})^2 + 8,1682 \cdot 10^{-4} \cdot (P_{TU} \cdot 10^{-6}) + 0,93881$$

Persamaan ini adalah hasil interpolasi data berikut :

Tabel 1 Hubungan Daya-Efisiensi Generator Turbin Uap

Daya Generator (MW)	Efisiensi (%)
200,7	98,82
150,6	98,67
100,4	98,27
50,2	96,91

4.6 Blok F: Pompa Kondensat dan Tangki Air Uman



Gambar 8 Blok F: Pompa kondensat dan tangki air umpan

Dari pers. (18):

$$f_{13} = m_d - 1,8848 \cdot 10^{-3} \cdot (m_i + m_h) - 5,3286 \quad (39)$$

Persamaan-persamaan berikutnya adalah neraca energi pada pencampuran air kondensat dengan uap tekanan rendah didalam deaerator yang terdapat pada tangki air umpan:

$$f_{14} = h_{u15} - \frac{3 \cdot (m_i + m_h) \cdot h_{u14} + m_d \cdot h_{u3}}{3 \cdot (m_i + m_h) + m_d} \quad (40)$$

dengan entalpi kondensat yang keluar dari pompa kondensat:

$$h_{u14} = h_{u13} + 9,806 \cdot [-2 \cdot 10^{-4} \cdot (Q_i + Q_h)^2 + 1,10^{-2} \cdot (Q_i + Q_h) + 127,0] / \eta_p$$

Efisiensi pompa kondensat:

$$\eta_p = -4 \cdot 10^{-6} \cdot (Q_i + Q_h)^2 + 3 \cdot 10^{-3} \cdot (Q_i + Q_h) + 0,2$$

Persamaan ini adalah hasil interpolasi data berikut :

Tabel 2 Data Pompa Kondensat

$Q_i + Q_h$ [m ³ /h]	η_p	Tinggi tekan [m]
250	0,7	117
300	0,74	112
400	0,76	99

debit air kondensat dari uap tekanan rendah:

$$Q_i = 0,5333 \cdot 6 \cdot m_i / 0,992$$

debit air kondensat dari uap tekanan tinggi:

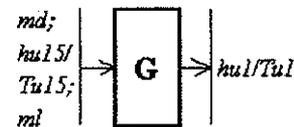
$$Q_h = 0,5333 \cdot 6 \cdot m_h / 0,992$$

Angka 0,5 berarti pompa kondensat yang digunakan adalah 2 buah, sedangkan angka 3 berarti penggabungan aliran dari 3 buah HRSG.

Persamaan-persamaan perubahan entalpi kondensat sebagai perkalian panas jenis air dengan perubahan temperatur kondensat yaitu mulai dari kondensat meninggalkan kondenser sampai kondensat berada di dalam tangki air umpan.

$$f_{15} = T_{u15} - T_{u13} - (h_{u15} - h_{u13}) / c_{pc} \quad (41)$$

4.7 Blok G: Pompa Air Uman Tekanan Rendah



Gambar 9 Blok G: Pompa air umpan tekanan rendah

Entalpi air masuk ke HRSG sebagai entalpi air pada tangki air umpan ditambah dengan kerja pompa air umpan:

$$f_{16} = h_{u1} - h_{u15} - h_{ip} \quad (42)$$

dengan kerja pompa air umpan:

$$h_{ip} = 9,806 \cdot (-1,10^{-3} \cdot Q_{u1}^2 - 3,10^{-2} \cdot Q_{u1} + 142) / \eta_{pi}$$

Efisiensi pompa air umpan:

$$\eta_{pi} = -3,3333 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{u1}^2 + 9,10^{-3} \cdot Q_{u1} + 0,0333$$

dan $Q_u = 0,5x3x3,6.(m_1 + m_d / 3) / 0,992$

Persamaan ini adalah hasil interpolasi data berikut :

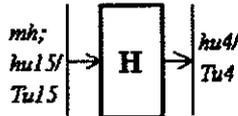
Tabel 3 Data Pompa Air Umpan Tekanan Rendah

Q_u [m ³ /h]	η_{pl}	Tinggi tekan [m]
50	0,4	138
70	0,5	135
100	0,6	129

Temperatur air sebelum HRSG:

$$f_{17} = T_{u1} - T_{u15} - (h_{u1} - h_{u15}) / c_{pl} \quad (43)$$

4.8 Blok H: Pompa Air Umpan Tekanan Tinggi



Gambar 10 Blok H: Pompa air umpan tekanan tinggi

Entalpi air masuk ke HRSG sebagai entalpi air pada tangki air umpan ditambah dengan kerja pompa air umpan:

$$f_{18} = h_{u4} - h_{u15} - h_{hp} \quad (44)$$

dengan kerja pompa air umpan:

$$h_{hp} = 9,806.(-2,857.10^{-4} Q_h^2 - 8,771.10^{-1} Q_h + 1176,9) / \eta_{ph}$$

efisiensi pompa air umpan:

$$\eta_{ph} = -8,571.10^{-6} Q_h^2 + 5,686.10^{-3} Q_h - 0,1543$$

dan $Q_h = 0,5.3.3,6.m_h / 0,992$

Persamaan ini adalah hasil interpolasi data berikut:

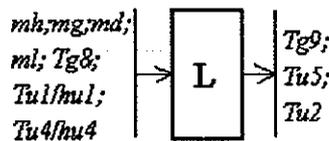
Tabel 4 Data Pompa Air Umpan Tekanan Tinggi

Q_h [m ³ /h]	η_{ph}	Tinggi tekan [m]
200	0,64	990
230	0,70	960
300	0,78	888

Temperatur air sebelum HRSG memberikan:

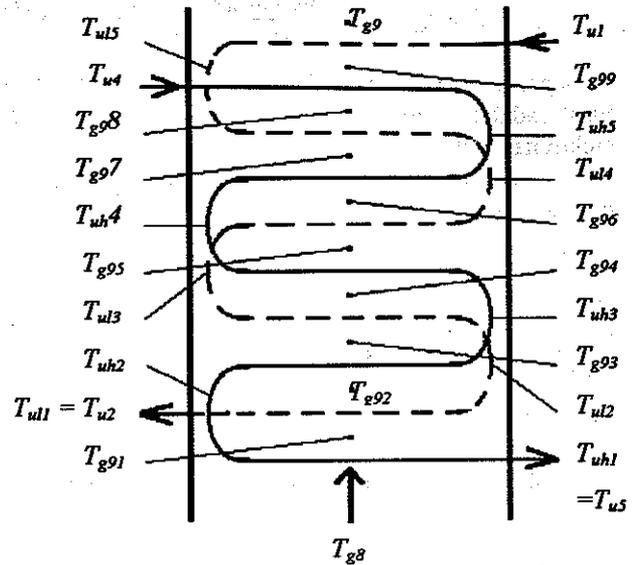
$$f_{19} = T_{u4} - T_{u15} - (h_{u4} - h_{u15}) / C_{pl} \quad (45)$$

4.9 Blok L: Ekonomiser Tekanan-Rendah dan Tinggi Tingkat ke-1



Gambar 11 Blok L: Ekonomiser tekanan rendah dan tekanan tinggi tingkat ke-1

Terdapat 2 persamaan dengan 2 variabel (karena T_{g9} tidak dimasukkan dalam sistem persamaan tapi bisa dihitung sesudah sistem persamaan diselesaikan) dalam blok ini yaitu:



Gambar 12 Ekonomiser tekanan rendah dan tekanan tinggi tingkat ke-1.

$$f_{20} = T_{u2} - T_{u1} \quad (46)$$

dan

$$f_{21} = T_{u5} - T_{u1} \quad (47)$$

Persamaan f_{20} dan f_{21} didapat dengan terlebih dulu menyelesaikan sistem persamaan berikut, untuk mendapatkan nilai-nilai T_{u11} dan T_{u1} :

$$\begin{aligned} g_1 &= m_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g8} - T_{g91}) - m_u \cdot c_{pue} \cdot (T_{uh1} - T_{uh2}) \\ g_2 &= m_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g91} - T_{g92}) - m_u \cdot c_{pue} \cdot (T_{u11} - T_{u12}) \\ g_3 &= m_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g92} - T_{g93}) - m_u \cdot c_{pue} \cdot (T_{uh2} - T_{uh3}) \\ g_4 &= m_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g93} - T_{g94}) - m_u \cdot c_{pue} \cdot (T_{u12} - T_{u13}) \\ g_5 &= m_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g94} - T_{g95}) - m_u \cdot c_{pue} \cdot (T_{uh3} - T_{uh4}) \\ g_6 &= m_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g95} - T_{g96}) - m_u \cdot c_{pue} \cdot (T_{u13} - T_{u14}) \\ g_7 &= m_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g96} - T_{g97}) - m_u \cdot c_{pue} \cdot (T_{uh4} - T_{uh5}) \\ g_8 &= m_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g97} - T_{g98}) - m_u \cdot c_{pue} \cdot (T_{u14} - T_{u15}) \\ g_9 &= m_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g98} - T_{g99}) - m_u \cdot c_{pue} \cdot (T_{uh5} - T_{u4}) \\ g_{10} &= \epsilon_{h1} \cdot (T_{g8} - T_{uh2}) - (T_{uh1} - T_{uh2}) \\ g_{11} &= \epsilon_l \cdot (T_{g91} - T_{u12}) - (T_{u11} - T_{u12}) \\ g_{12} &= \epsilon_{h1} \cdot (T_{g92} - T_{uh3}) - (T_{uh2} - T_{uh3}) \\ g_{13} &= \epsilon_l \cdot (T_{g93} - T_{u13}) - (T_{u12} - T_{u13}) \\ g_{14} &= \epsilon_{h1} \cdot (T_{g94} - T_{uh4}) - (T_{uh3} - T_{uh4}) \\ g_{15} &= \epsilon_l \cdot (T_{g95} - T_{u14}) - (T_{u13} - T_{u14}) \\ g_{16} &= \epsilon_{h1} \cdot (T_{g96} - T_{uh5}) - (T_{uh4} - T_{uh5}) \\ g_{17} &= \epsilon_l \cdot (T_{g97} - T_{u15}) - (T_{u14} - T_{u15}) \\ g_{18} &= \epsilon_{h1} \cdot (T_{g98} - T_{u4}) - (T_{uh5} - T_{u4}) \\ g_{19} &= \epsilon_l \cdot (T_{g99} - T_{u1}) - (T_{u15} - T_{u1}) \end{aligned}$$

dengan $m_u = m_h$ untuk uap tekanan tinggi dan $m_u = m_l + m_d / 3$ untuk uap tekanan rendah

serta

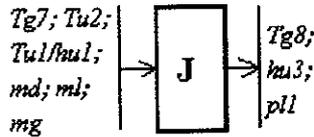
$$\begin{aligned} \varepsilon_l &= [1 - \exp(-\tau_l \cdot c_l)] / c_l \\ \tau_l &= 1 - \exp\{- (AUL) / [(m_l + m_d / 3) \cdot c_{pl}] \} \\ c_l &= \frac{(m_l + m_d / 3) \cdot c_{pl}}{m_g \cdot c_{pg}} \end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned} \varepsilon_{h1} &= [1 - \exp(-\tau_h \cdot c_h)] / c_h \\ \tau_h &= 1 - \exp\{- (AUH1) / (m_h \cdot c_{ph}) \} \\ c_h &= \frac{m_h \cdot c_{ph}}{m_g \cdot c_{pg}} \end{aligned}$$

Dalam sistem 19 persamaan tersebut ada 19 variabel yang belum diketahui, yaitu T_{g91} sampai dengan T_{g99} , T_{u11} sampai dengan T_{u15} dan T_{uh1} sampai dengan T_{uh5} . Dalam hal ini ε_l adalah efektifitas ekonomiser tekanan rendah untuk satu laluan, ε_{h1} adalah efektifitas ekonomiser tekanan tinggi tingkat satu untuk satu laluan. Nilai nilai efektifitas ε_l dan ε_{h1} dianggap sama untuk tiap laluan.

4.10 Blok J: Evaporator Tekanan Rendah



Gambar 13 Blok J: Evaporator tekanan rendah

$$f_{22} = T_{u3} - T_{g7} + (T_{g7} - T_{g8}) / \varepsilon_d \quad (48)$$

dengan
$$\varepsilon_{el} = 1 - \exp\{- (AUEL) / (m_g \cdot c_{pg}) \}$$

Hubungan antara tekanan dan temperatur jenuh dalam tangki tekanan rendah:

$$f_{23} = p_{l1} - p_s(T_{u3}) \quad (49)$$

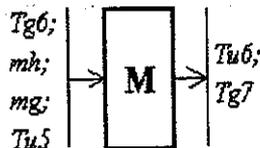
Entalpi uap jenuh yang keluar dari tangki tekanan rendah sebagai fungsi dari tekanan dan temperatur jenuh:

$$f_{24} = h_{u3} - h_2(p_{l1}, T_{u3}) \quad (50)$$

Neraca energi dalam evaporator adalah:

$$f_{25} = T_{g8} - T_{g7} + \frac{(m_l + m_d / 3) \cdot (h_{u3} - h_{u2})}{m_g \cdot c_{pg}} \quad (51)$$

4.11 Blok M: Ekonomiser Tekanan Tinggi Tingkat ke-2



Gambar 14 Blok M: Ekonomiser tekanan tinggi tingkat ke-2

Hubungan efektifitas dengan temperatur:

$$f_{26} = T_{u6} - T_{u5} - \varepsilon_{h2} \cdot (T_{g6} - T_{u5}) \quad (52)$$

dengan
$$\varepsilon_{h2} = \frac{[(1 - \varepsilon_{p2} \cdot c_h) / (1 - \varepsilon_{p2})]^6 - 1}{[(1 - \varepsilon_{p2} \cdot c_h) / (1 - \varepsilon_{p2})]^6 - c_h}$$

$$\varepsilon_{p2} = [1 - \exp(-\tau_{h2} \cdot c_h)] / c_h$$

$$\tau_{h2} = 1 - \exp\{- (AUH2) / (m_h \cdot c_{ph}) \}$$

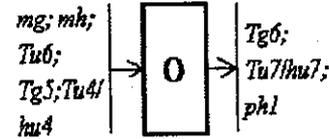
dan

$$c_h = \frac{m_h \cdot c_{ph}}{m_g \cdot c_{pg}}$$

Neraca energi dalam ekonomiser:

$$f_{27} = T_{g7} - T_{g6} + \frac{m_h \cdot c_{ph} \cdot (T_{u6} - T_{u5})}{m_g \cdot c_{pg}} \quad (53)$$

4.12 Blok O: Evaporator Tekanan Tinggi



Gambar 15 Blok O: Evaporator tekanan tinggi

Hubungan efektifitas dengan temperatur:

$$f_{28} = T_{u7} - T_{g5} + (T_{g5} - T_{g6}) / \varepsilon_{eh} \quad (54)$$

dengan

$$\varepsilon_{eh} = 1 - \exp\{- (AUEH) / (m_g \cdot c_{pg}) \}$$

Hubungan antara tekanan dan temperatur jenuh dalam tangki tekanan tinggi:

$$f_{29} = p_{h1} - p_s(T_{u7}) \quad (55)$$

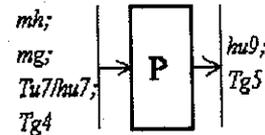
Entalpi uap jenuh yang keluar dari tangki tekanan tinggi sebagai fungsi dari tekanan dan temperatur jenuh:

$$f_{30} = h_{u7} - h_2(p_{h1}, T_{u7}) \quad (56)$$

Neraca energi dalam evaporator adalah:

$$f_{31} = T_{g6} - T_{g5} + \frac{m_h \cdot (h_{u7} - h_{u6})}{m_g \cdot c_{pg}} \quad (57)$$

4.13 Blok P: Pemanas Lanjut



Gambar 16 Blok P: Pemanas lanjut

Hubungan efektifitas dengan temperatur:

$$f_{32} = T_{u8} - T_{u7} - \varepsilon_{sh} \cdot (T_{g4} - T_{u7}) \quad (58)$$

dengan
$$\varepsilon_{sh} = \frac{[(1 - \varepsilon_{ps} \cdot c_{sh}) / (1 - \varepsilon_{ps})]^5 - 1}{[(1 - \varepsilon_{ps} \cdot c_{sh}) / (1 - \varepsilon_{ps})]^5 - c_{sh}}$$

$$\varepsilon_{ps} = [1 - \exp(-\tau_{sh} \cdot c_{sh})] / c_{sh}$$

$$\tau_{sh} = 1 - \exp\{- (AUSH) / (m_h \cdot c_{ph}) \}$$

dan

$$c_{sh} = \frac{m_h \cdot c_{ph}}{m_g \cdot c_{pg}}$$

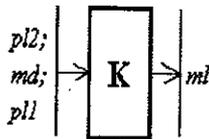
Neraca energi, untuk menghitung temperatur:

$$f_{33} = T_{g5} - T_{g4} + \frac{m_h \cdot c_{psh} \cdot (T_{u8} - T_{u7})}{m_g \cdot c_{pg}} \quad (59)$$

Neraca energi, untuk menghitung entalpi:

$$f_{34} = h_{u8} - h_{u7} - c_{psh} (T_{u8} - T_{u7}) \quad (60)$$

4.14 Blok K: Jatuh Tekanan Uap Tekanan Rendah

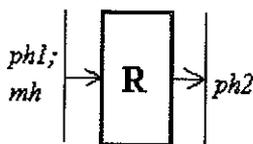


Gambar 17 Blok K: Jatuh tekanan uap tekanan rendah

Persamaan jatuh tekanan didapat dari pers. (21) yaitu:

$$f_{35} = p_{11} - p_{12} - (-1,0689 \cdot 10^3 \cdot (m_1 + m_d / 3)^2 + 4,5817 \cdot 10^4 (m_1 + m_d / 3) - 4,2153 \cdot 10^5) \quad (61)$$

4.15 Blok R: Jatuh Tekanan Uap Tekanan Tinggi

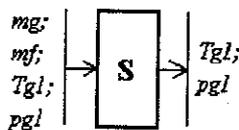


Gambar 18 Blok R: Jatuh tekanan uap tekanan tinggi

Persamaan jatuh tekanan didapat dari pers. (20) yaitu:

$$f_{36} = p_{h1} - p_{h2} - (3,8031 \cdot 10^2 \cdot m_h^2 - 2,3161 \cdot 10^4 \cdot m_h + 7,6571 \cdot 10^5) \quad (62)$$

4.16 Blok S: Kompresor



Gambar 19 Blok S: Kompresor

Dari pers. (22) didapat:

$$f_{37} = K_{C2} - (0,012127 \cdot \exp(72,0059 \cdot K_{C1}) + 7,0) \quad (63)$$

Dari pers. (23) didapat hubungan efisiensi isentropis kompresor berikut:

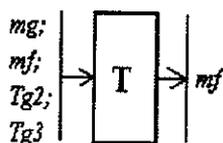
$$f_{38} = \eta_c - (-361,6858 \cdot K_{C1}^2 + 63,1271 \cdot K_{C1} - 1,8557) \quad (64)$$

Persamaan kompresi memberikan:

$$f_{39} = T_{g2} - T_{g1} - T_{g1} \left[(p_{g2} / p_{g1})^u - 1 \right] / \eta_c \quad (65)$$

dengan
$$u = \frac{\gamma_u - 1}{\gamma_u} = 0,28571$$

4.17 Blok T: Ruang Bakar



Gambar 20 Blok T: Ruang Bakar

Rumus efisiensi ruang bakar [1]:

$$f_{40} = f_{ar} - f_{art} / \eta_{RB} \quad (66)$$

dengan

$$f_{ar} = \frac{c_{pg} (T_{g3} - 288,75) - c_{pu} (T_{g2} - 288,75)}{LHV + c_{pf} (303,15 - 288,75) - c_{pg} (T_{g3} - 288,75)}$$

= rasio bahan bakar - udarateoritis

dan: LHV = nilai kalor bawah bahan bakar pada temperatur 288,75 K

$$= 1043,0 \text{ [Btu/scft]} \quad 35,31467 \text{ [scft/scm]}$$

$$0,29307 \text{ [Wh/Btu]} \quad 3600 \text{ [s/h]} \cdot 1 / \rho_f \text{ [scm/kg]}$$

Angka 303,15 adalah temperatur bahan bakar gas sebelum masuk ruang bakar dalam K.

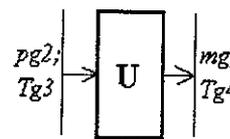
Efisiensi ruang bakar dari pers. (24)

$$f_{41} = \eta_{RB} - 1,0957 \cdot \exp(-8,3537 \cdot f) \quad (67)$$

Persamaan laju aliran bahan bakar:

$$f_{42} = m_f - \frac{f_{ar} m_g}{1 + f_{ar}} \quad (68)$$

4.18 Blok U: Turbin Gas



Gambar 21 Blok U: Turbin gas

Dari pers. (25) didapat:

$$f_{43} = K_{T2} - 0,020586 \cdot \exp(-0,027832 \cdot K_{T1}) \quad (69)$$

Dari pers. (26) didapat hubungan efisiensi isentropis turbin gas sebagai berikut:

$$f_{44} = \eta_{TG} - 0,94886 \cdot \exp(-0,006462 \cdot K_{T1}) \quad (70)$$

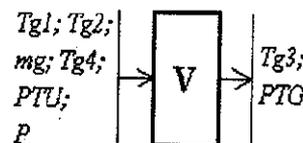
Persamaan ekspansi memberikan:

$$f_{45} = T_{g3} - T_{g4} - T_{g3} \left[1 - (p_{g3} / p_{g2})^g \right] / \eta_{TG} \quad (71)$$

dengan

$$g = \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g} = 0,25$$

4.19 Blok V: Persamaan Daya Generator Turbin Gas



Gambar 22 Blok V: Persamaan daya generator turbin gas

Daya yang dihasilkan oleh 3 buah generator turbin gas ditambah dengan daya yang dihasilkan oleh sebuah generator turbin uap adalah sama dengan daya total:

$$f_{46} = 3P_{TG} + P_{TU} - P \quad (72)$$

Kerja turbin gas dikurangi kerja kompresor, kerugian mekanik dan kerugian dalam generator adalah sama dengan daya generator:

$$f_{47} = T_{g3} - T_{g4} - \frac{(m_g - m_f) c_{pu} (T_{g2} - T_{g1}) + P_{TG} / (0,99 \cdot \eta_{GTG})}{m_g c_{pg}} \quad (73)$$

dengan efisiensi generator:

$$\eta_{GTG} = 1,7772 \cdot 10^{-8} (P_{TG} \cdot 10^{-6})^3 - 7,483 \cdot 10^{-6} (P_{TG} \cdot 10^{-6})^2 + 1,0806 \cdot 10^{-3} (P_{TG} \cdot 10^{-6}) + 0,9322$$

Persamaan ini adalah hasil interpolasi data berikut:

Tabel 5 Hubungan Daya-Efisiensi Generator Turbin Gas

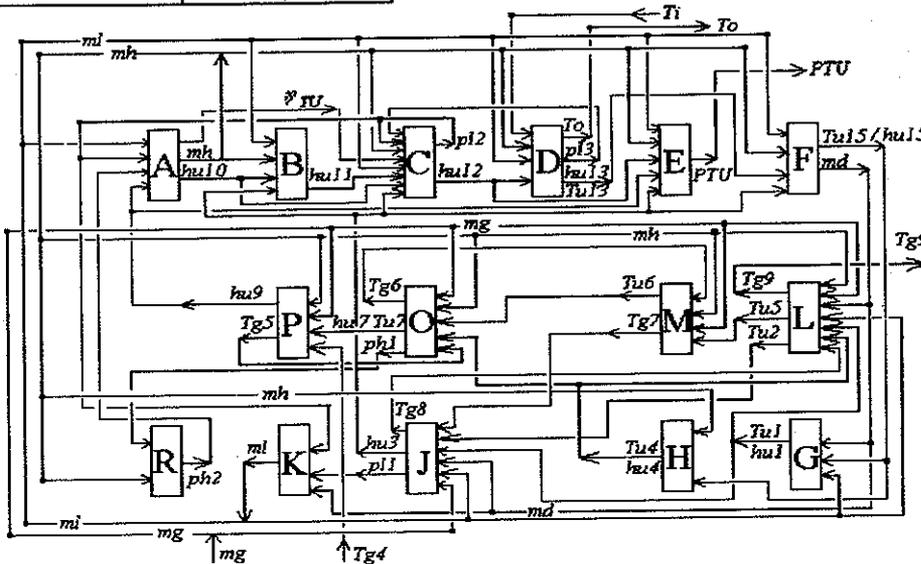
Daya Generator (MW)	Efisiensi (%)
168	98,68
126	98,51
84	98,07
42	96,57

4.20 Diagram Blok Simulasi

Diagram blok simulasi didapat dengan cara menggabungkan semua blok diatas. Diagram blok simulasi akan dibagi menjadi dua bagian besar, yaitu:

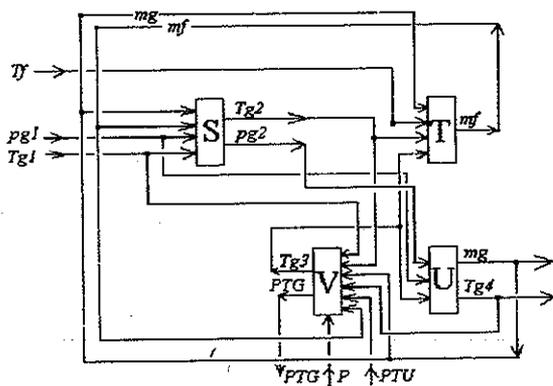
- ◊ Bagian pertama Gb. (23), mewakili siklus uap serta termasuk pula HRSG.
- ◊ Bagian kedua Gb. (24), mewakili siklus gas.

Hal ini dilakukan hanya dalam gambar, yaitu supaya jelas, sedangkan dalam simulasi semua sistem tersebut adalah simultan.



Gambar 23 Diagram blok simulasi siklus uap

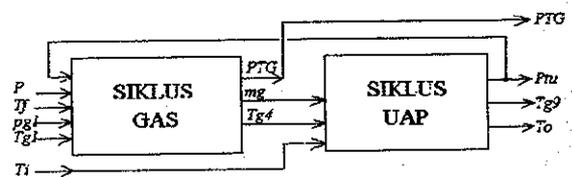
atau bisa juga merupakan fungsi dari waktu, dalam simulasi diambil tetap.



Gambar 24 Diagram blok simulasi siklus gas

Kedua diagram blok diatas digabungkan menjadi diagram blok berikut:

Dari Gb. (25) jelas bahwa simulasi hanya membutuhkan masukan daya total PLTGU P saja sedangkan masukan yang lain bisa merupakan tetapan

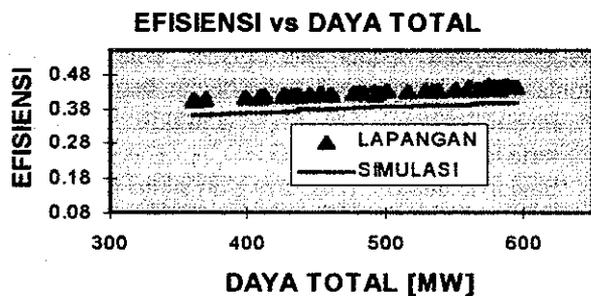


Gambar 25 Diagram blok gabungan

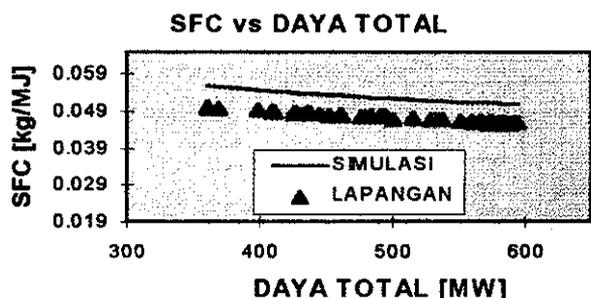
4.21 Pengujian Simulasi dan Analisa Hasil

Pembahasan simulasi diatas menunjukkan hal yang logis bahwa simulasi adalah penyelesaian sistem persamaan dengan jumlah variabel sama dengan jumlah persamaan. Namun untuk mengetahui kelayakannya maka simulasi perlu diuji.

Meskipun terjadi penyimpangan, namun simulasi menunjukkan kecenderungan yang sama dengan data lapangan. Misalnya efisiensi siklus bruto mula-mula naik dengan naiknya beban, dari ± 60 %, kemudian laju kenaikan (gradien) tersebut berkurang.



Gambar 26 Kurva efisiensi siklus kotor vs daya total



Gambar 27 Kurva SFC vs daya total

Pengujian akan dilakukan untuk beban $\pm 60\%$ sampai $\pm 100\%$ sesuai dengan data yang didapat.

Simulasi konvergen bukan hanya untuk beban di atas saja, tetapi juga untuk beban yang lain. Hasil simulasi ini dibandingkan dengan data lapangan dalam hal efisiensi siklus bruto dan konsumsi bahan bakar spesifik (SFC), seperti ditunjukkan pada Gb. (26) dan Gb. (27) dimana variabel-variabel tersebut digambarkan sebagai fungsi beban.

Gambar (26) menunjukkan penyimpangan efisiensi simulasi yang negatif ($\pm 13\%$), dalam arti lebih kecil jika dibandingkan dengan data lapangan. Ini berarti juga penyimpangan SFC simulasi yang positif. Jika mengingat bahwa simulasi mengabaikan kerugian-kerugian (tekanan dan panas) yang terjadi dalam sistem, maka penyimpangan efisiensi simulasi seharusnya positif. Namun demikian kejanggalan ini bisa saja terjadi. Hal ini disebabkan persamaan-persamaan karakteristik yang didapat untuk simulasi adalah hasil pengolahan keseluruhan data yang banyak jenisnya dan masing-masing mengandung kesalahan. Sedangkan efisiensi data lapangan dihitung hanya berdasarkan tiga data saja yaitu debit bahan bakar, daya turbin gas dan daya turbin uap.

Kesalahan setiap variabel akan memberikan kontribusi pada kesalahan hasil simulasi. Apalagi jika mengingat alat ukur yang belum dikalibrasi lagi, dan data yang didapat adalah rata-rata aljabar tiap jam dari keadaan transiennya, padahal hubungan tiap variabel tidak linier. Selain itu simulasi juga berdasarkan pada persamaan karakteristik hasil regresi yang juga mengandung kesalahan. Bahkan, dalam melakukan regresi tersebut, penulis tidak membuang data yang

menyimpang terlalu jauh, yang bisa dianggap bukan berasal dari populasi yang sama.

Jadi kesalahan terakumulasi, yaitu mulai dari alat ukur, pengolahan data, regresi sampai simulasi. Kesalahan ini tentu saja dapat bertanda positif atau negatif. Dengan demikian penyimpangan seperti disebutkan di atas sangat mungkin terjadi. Sehingga penyimpangan efisiensi simulasi yang positif tidaklah berarti simulasi tidak layak. Bahkan sebaliknya, dengan penjelasan di atas, simulasi adalah layak untuk dikembangkan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan pembahasan diatas, penulis mengambil beberapa kesimpulan berikut ini:

1. Program simulasi konvergen dan mempunyai kecenderungan yang sama dengan data lapangan.
2. Efisiensi dan SFC hasil simulasi menyimpang dari data lapangan sebesar $\pm 13\%$.
3. Sumber kesalahan:
 - ◆ Data efisiensi lapangan didapat dari daya turbin uap, debit bahan bakar dan daya total, sedangkan data simulasi dipengaruhi juga oleh data yang lainnya.
 - ◆ Alat ukur belum dikalibrasi lagi.
 - ◆ Digunakan nilai rata-rata (bukan nilai keadaan tunak).
 - ◆ Kesalahan numerik, yaitu pengolahan data dan regresi.
 - ◆ Penyederhanaan sistem.
4. Simulasi layak untuk dikembangkan.

Dengan demikian beberapa saran berikut adalah sangat penting untuk diperhatikan.

Pengembangan Program Simulasi hendaknya:

1. Menggunakan karakteristik individual.
2. Menambah kelengkapan siklus, yaitu:
 - ◇ Mengurangi penyederhanaan.
 - ◇ Mengurangi asumsi, jika memungkinkan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Cohen H., Rogers G.F.C. and Saravanamuttoo H.I.H, Gas Turbine Theory, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, 1991.
2. Design Manual : General Powerplant Description, Tanjung Priok Combined Cycle Powerplant, P.T. PLN (Persero), Jakarta 1993.
3. Power Plant Training Manual, Tanjung Priok Combined Cycle Powerplant, P.T. PLN (Persero), Jakarta 1993.
4. El-Wakil M.M., Powerplant Technology, atau Instalasi Pembangkit Daya terj. Jasjfi E., volume 1, Erlangga, Jakarta, 1992.
5. Holman J.P., Heat Transfer, Mc. Graw Hill Book Co., New York, 1986, 480 -514.
6. Kays W.M. and London A.L., Compact Heat Exchangers, 3rd edition, Mc Graw Hill, New York, 1984.

7. Reynolds William C. and Perkins Henry C.,
Engineering Thermodynamics, atau
Termodinamika Teknik terj. Harahap Filino,
Erlanga, Jakarta, 1991

8. Shlyakin P., Steam Turbines: Theory and Design,
atau Turbin Uap: Teori dan Rancangan terj.
Harahap Zulkifli, Erlangga, Jakarta, 1990.
9. Stoecker W.F., Design of Thermal System, Mc
Graw Hill, New York, 1989, 53 - 142, 331 - 368.