

ANALISIS SIKLUS KOMBINASI GAS DAN UAP

Pawito M. Sontowiro

Laboratorium Energi Termal, Jurusan Teknik Mesin
Institut Teknologi Bandung

Abstrak

Pada siklus Brayton, pada umumnya, temperatur gas keluar turbin masih cukup tinggi. Untuk menangkap energi gas tersebut, dirancang sebuah siklus Rankine yang menerima masukan energi termal dari gas tersebut. Untuk setiap harga perbandingan kompresi siklus Brayton, efisiensi gabungan optimum dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur uap masuk turbin uap serta perbandingan laju aliran massa uap terhadap laju aliran massa udara pada siklus Brayton. Dengan kendala-kendala lingkungan, pembatasan temperatur fluida masuk turbin, perbedaan temperatur minimum fluida didalam alat penukar kalor dan kualitas uap keluar turbin, efisiensi gabungan optimum dikaji pada tulisan ini.

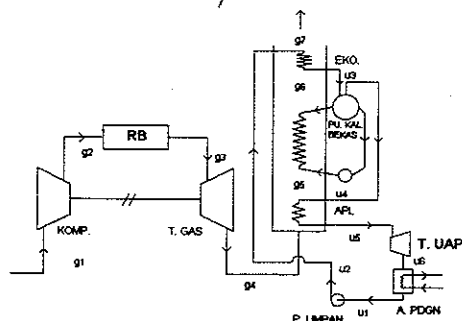
Abstract

In general, the gas exits from gas turbine still has a high temperature. To recover its energy, a Rankine cycle is installed to receive thermal input energy from the gas. For each value of pressure ratio of the Brayton cycle, the optimum total efficiency is largely controlled by the pressure and temperature of steam entering turbine and the steam-air mass flow rate ratio of the system. With the environment, the fluid entering temperature to the turbines, the minimum fluids temperatures difference in heat exchangers, and the quality of steam at the exit of steam turbine as constraints, optimum total efficiency of the system is investigated on this report.

Keywords: Cabine cycle, power plant

1. PENDAHULUAN

Pada sistem pembangkitan daya turbin gas, gas keluar turbin masih mempunyai temperatur yang cukup tinggi. Salah satu cara memanfaatkan energi gas tersebut ialah dengan memanfaatkan sebuah sistem pembangkitan daya siklus uap yang menggunakan gas tersebut sebagai sumber kalor temperatur tinggi. Penggabungan dua sistem pembangkit daya tersebut, gas dan uap, dinamakan sistem pembangkitan daya kombinasi gas dan uap. Gb. (1) menunjukkan susunan perangkat keras utama sistem pembangkit daya kombinasi gas dan uap. Lambang lambang $g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6$ dan g_7 , secara urut, menunjukkan tingkat-tingkat keadaan gas masuk kompresor, ruang bakar, turbin, alat pemanas lanjut, alat penguap, ekonomiser dan cerobong.



Gambar 1. Siklus Kombinasi Gas dan Uap.

Sedangkan lambang-lambang u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 , dan u_6 , secara urut, menyatakan tingkat-tingkat keadaan uap atau air masuk pompa umpan, ekonomiser, alat penguap, alat pemanas lanjut, turbin uap dan kondensor.

Untuk temperatur gas masuk turbin yang sudah tertentu, dengan menganggap efisiensi-efisiensi politropik untuk kompresor dan turbin gas berharga tetap, temperatur gas keluar turbin hanya tergantung pada besarnya angka perbandingan tekanan sistem pembangkit daya gas. Karena efisiensi sistem pembangkit daya uap sangat ditentukan oleh temperatur sumber kalor temperatur tinggi, dalam bahasan ini adalah gas keluar turbin, maka efisiensi sistem pembangkit daya uap juga tergantung pada besarnya angka perbandingan tekanan sistem pembangkit daya gas. Selain tergantung pada besarnya angka perbandingan tekanan sistem pembangkit daya gas, efisiensi sistem pembangkit daya uap juga masih tergantung pada besarnya tekanan uap masuk turbin dan laju aliran massanya. Yang menarik perhatian adalah memilih berapa besarnya tekanan dan temperatur uap masuk turbin serta laju aliran massa uap, sehingga diperoleh efisiensi siklus pembangkit daya kombinasi yang optimum untuk setiap harga perbandingan tekanan sistem pembangkit daya gas.

Untuk dapat memilih tekanan dan temperatur uap masuk turbin dan laju aliran massa, dilakukan perhitungan iterasi dengan peubah laju aliran massa uap pada setiap tekanan pembangkit uap dan angka

perbandingan tekanan sistem pembangkit daya gas. Perhitungan iterasi tersebut dilaksanakan dengan syarat-syarat yang lazim diberlakukan pada rancangan sistem pembangkit daya gas dan uap dan akan dibahas pada bab berikut.

2. PERSAMAAN-PERSAMAAN PERHITUNGAN PRESTASI DAUR GABUNGAN

Perhitungan laju perpindahan kalor dilakukan dengan basis setiap satu satuan laju aliran massa gas ("kg/s"). Dengan demikian maka laju aliran massa uap atau air pada sistem pembangkit tenaga uap menyatakan laju aliran massa uap per satu satuan laju aliran massa gas. Karena pada umumnya perbandingan massa bahan bakar-udara pada sistem siklus gas cukup kecil, pada bahasan yang dilakukan, massa bahan bakar diabaikan.

Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitung besaran-besaran pada siklus gas adalah sebagai berikut:

$$T_{g2} = T_{g1} \left\{ 1 + \left[(r)^{(k_g-1)/k_g} - 1 \right] / \eta_{gc} \right\} \quad (1)$$

$$T_{g4} = T_{g3} \left\{ 1 - \eta_{gt} \left[(r)^{(k_g-1)/k_g} - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

$$W_{ng} = \bar{c}_{pgt} (T_{g3} - T_{g4}) - \bar{c}_{pgc} (T_{g2} - T_{g1}) \quad (3)$$

$$E_{dg} = [\bar{c}_{pgt} (T_{g3} - T_{g4}) - \bar{c}_{pgc} (T_{g2} - T_{g1})] \times 1 / [(\bar{c}_{pgt} [T_{g3} - T_{g2}])] \quad (4)$$

$$q_{g47} = \bar{c}_{pgh} (T_{g4} - T_{g7}) \quad (5)$$

Panas jenis tekanan tetap (c_p) dan konstanta (k) gas diambil pada temperatur rata-rata antara sisi masuk dan sisi keluar setiap alat yang bersangkutan. Lambang-lambang $\bar{c}_{pgt}$ dan $\bar{c}_{pgh}$, masing-masing, menyatakan panas jenis tekanan tetap rata-rata gas pada ruang bakar dan pembangkit uap kalor bekas (heat recovery steam generator).

Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitung besaran-besaran pada siklus uap dan siklus kombinasi adalah sebagai berikut:

$$h_{u2s} = h_{u1} + v_{u1} (p_{u2} - p_{u1}) \quad (6)$$

$$h_{u2} = h_{u1} + (h_{u2s} - h_{u1}) / \eta_{up} \quad (7)$$

$$Q_{u25} = q_{g47} \quad (8)$$

$$Q_{u23} = M_u (h_{u3} - h_{u2}) \quad (9)$$

$$T_{g6} = T_{g7} + Q_{u23} / c_{pgh} \quad (10)$$

$$h_{u5} = h_{u2} + Q_{u25} / M_u \quad (11)$$

Regresi tabel uap

$$T_{u5} = \phi_1 (h_{u5})_p \quad (12)$$

$$s_{u5} = \phi_2 (h_{u5})_p \quad (13)$$

$$\Delta T_{min1} = T_{g6} - T_{u3} \quad (14)$$

$$\Delta T_{min2} = T_{g4} - T_{u5} \quad (15)$$

$$Q_{u34} = M_u (h_{u4} - h_{u3}) \quad (16)$$

$$x_{u6s} = (s_{u5} - s_{u1}) / (s_{u7} - s_{u1}) \quad (17)$$

$$h_{u6s} = h_{u1} + x_{u6s} (h_{u7} - h_{u1}) \quad (18)$$

$$h_{u6} = h_{u5} - \eta_{ut} (h_{u5} - h_{u6s}) \quad (19)$$

$$x_{u6} = (h_{u6} - h_{u1}) / (h_{u7} - h_{u1}) \quad (20)$$

$$W_{nu} = M_u \{ (h_{u5} - h_{u6}) - (h_{u2} - h_{u1}) \} \quad (21)$$

$$E_{du} = W_{nu} / Q_{u25} \quad (22)$$

$$W_{tot} = W_{ng} + W_{nu} \quad (23)$$

$$E_{tot} = W_{tot} / q_{g23} \quad (24)$$

subskrip u_7 menyatakan tingkat keadaan uap jenuh pada tekanan kondensor.

Besaran-besaran yang digunakan sebagai masukan pada perhitungan prestasi siklus kombinasi adalah sebagai berikut:

$$\bar{c}_{pgc} = 1,0345 \text{ kJ/kgK}, \bar{c}_{pgt} = 1,1628 \text{ kJ/kgK}$$

$$\bar{k}_{gc} = 1,3847, \bar{k}_{gt} = 1,3250 \quad (m1)$$

$$\bar{c}_{pgt} = 1,1628 \text{ kJ/kgK} \quad (m2)$$

$$\bar{c}_{pgh} = 1,0687 \text{ kJ/kgK} \quad (m3)$$

$$T_{g1} = 306 \text{ K} \quad (m4)$$

$$T_{g3} = 1473 \text{ K} \quad (m5)$$

$$T_{g7} = 443 \text{ K} \quad (m6)$$

$$\eta_{gc} = 0,88 \text{ dan } \eta_{gt} = 0,90 \quad (m7)$$

$$\eta_{up} = 0,80 \text{ dan } \eta_{ut} = 0,85 \quad (m8)$$

$$T_{u5max} = 823 \text{ K} \quad (m9)$$

$$x_{6min} = 0,88 \text{ dan } x_{6max} = 0,99 \quad (m10)$$

$$\Delta T_{min1} = \Delta T_{min2} = 10 \text{ K} \quad (m11)$$

Tingkat keadaan H_2O jenuh pada kondensor

$$p_{u1} = 8,6464 \text{ kPa } T_{u1} = 316 \text{ K} \quad (m12)$$

$$v_{u1} = 0,001009 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (m13)$$

$$h_{u1} = 180,05 \text{ kJ/kg} \quad (m14)$$

$$h_{u7} = 2578,7 \text{ kJ/kg} \quad (m15)$$

$$s_{u1} = 0,61216 \text{ kJ/kgK} \quad (m16)$$

$$s_{u7} = 8,1993 \text{ kJ/kgK} \quad (m17)$$

(m...): menyatakan persamaan masukan

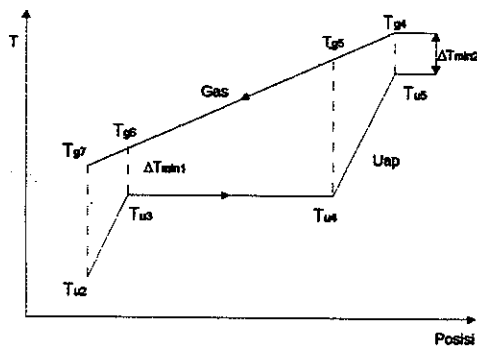
3. SYARAT-SYARAT BATAS

Semakin tinggi temperatur fluida masuk turbin, baik untuk gas maupun uap, efisiensi siklus semakin meningkat. Tetapi dengan mengingat teknologi bahan sampai saat ini, temperatur fluida masuk turbin harus dibatasi. Pada bahasan ini, seperti pada lazimnya,

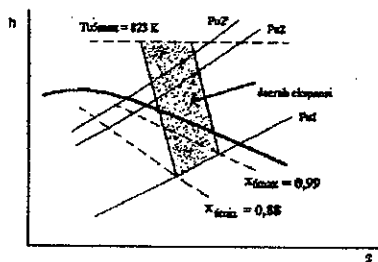
temperatur gas dan uap, masing-masing, dibatasi sampai dengan 1273 K dan 823 K.

Untuk menghindari dimensi ekonomiser, alat penguap dan alat pemanas lanjut yang terlalu besar, perbedaan temperatur terkecil antara gas dan uap atau air pada masing-masing alat, seperti lazimnya, dijaga jangan sampai kurang dari 10 K. Lihat Gb. (2).

Perbedaan temperatur terkecil mungkin terjadi pada sisi keluar ekonomiser (ΔT_{min1}) atau pada sisi keluar alat pemanas lanjut (ΔT_{min2}).



Gambar 2. Distribusi Temperatur Gas dan Uap/Air.



Gambar 3. Batas-Batas Ekspansi Uap.

Operasi turbin uap, selain dibatasi oleh bahan juga dibatasi oleh kualitas uap keluar turbin. Untuk tekanan yang sudah tertentu, kualitas uap keluar turbin akan meningkat dengan semakin bertambah tingginya temperatur uap masuk turbin. Temperatur uap masuk turbin harus masih menjamin bahwa uap keluar turbin tidak berada dalam tingkat keadaan panas lanjut. Bila hal tersebut terjadi, selain beban pendinginan per "kg" uap menjadi lebih besar, angka konveksi termal juga menjadi lebih kecil sehingga ukuran kondensor menjadi lebih besar dan tidak dapat diterima secara ekonomi. Seperti pada lazimnya, kualitas uap maksimum pada waktu keluar turbin dibatasi sampai dengan 0,99. Temperatur uap masuk turbin juga harus menjamin bahwa kualitas uap keluar turbin tidak terlalu rendah. Untuk menjamin bahwa umur sudu turbin masih dalam batas kewajaran, seperti lazimnya, kualitas uap minimum pada waktu keluar turbin dibatasi sampai dengan 0,88. Rentang ekspansi uap yang memenuhi persyaratan-persyaratan temperatur masuk turbin maksimum, kualitas uap

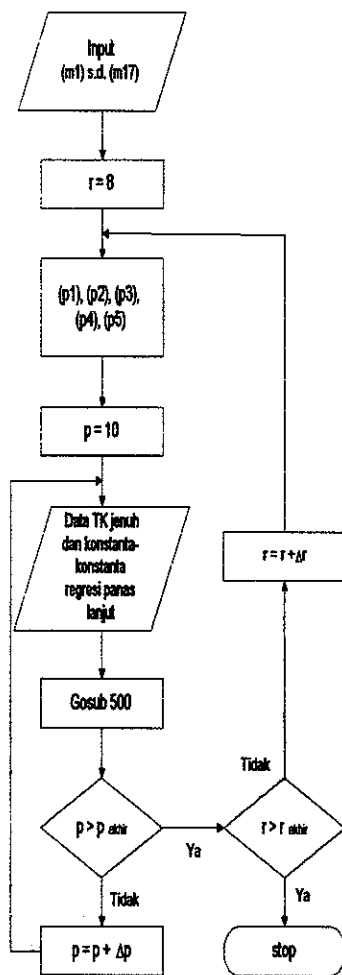
maksimum keluar turbin dan kualitas uap minimum keluar turbin dinyatakan dengan daerah bertitik-titik pada Gb. (3).

Efisiensi turbin uap akan semakin meningkat dengan semakin rendahnya temperatur pengembunan uap di kondensor. Sedangkan temperatur kondensor ditentukan oleh temperatur air pendingin yang ada di lingkungan sekitar. Dengan menganggap temperatur air pendingin 306 K dan perbedaan temperatur minimum antara uap dan air pendingin sebesar 10 K, maka temperatur pengembunan uap adalah 316 K. Temperatur tersebut berkaitan dengan tekanan jenuh sebesar 0,086464 bar.

4. PERHITUNGAN PRESTASI SIKLUS KOMBINASI

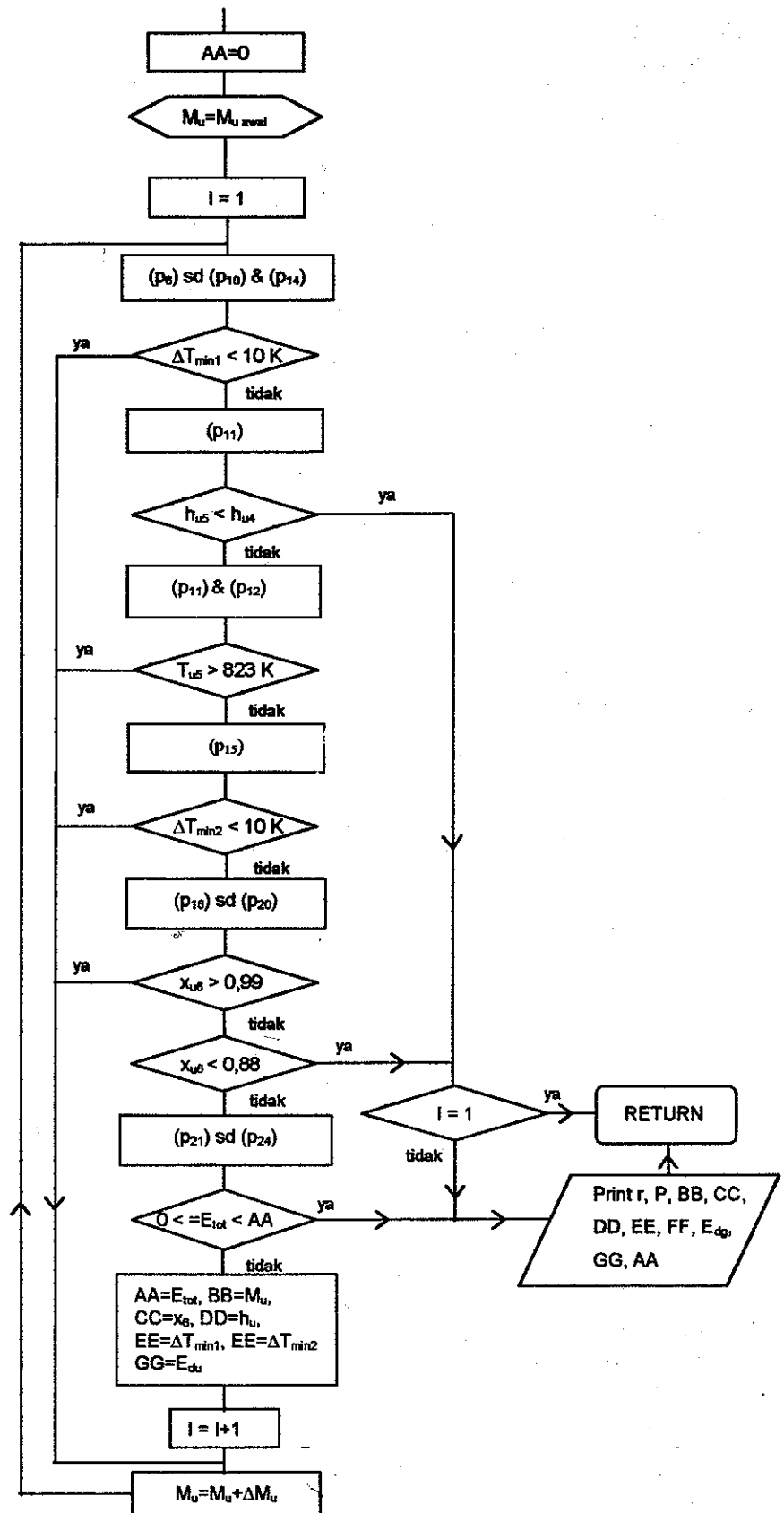
Perhitungan untuk memilih efisiensi pembangkit daya siklus kombinasi yang optimal dengan angka perbandingan tekanan yang beragam dilakukan dengan iterasi harga laju aliran massa uap, tekanan pembangkit uap dan harga angka perbandingan kompresi siklus gas. Langkah-langkah tersebut dijelaskan dengan diagram alir program pada Gb. (4a) dan Gb. (4b). Urutan langkah tersebut dijelaskan sebagai berikut:

- Memasukkan data
 - udara sekitar (T_{g1})
 - sifat-sifat H_2O tingkat keadaan jenuh pada temperatur 316 K. Sifat-sifat tersebut adalah p_{u1} , u_{u1} , h_{u1} , s_{u1} , h_{u7} dan s_{u7} .
 - temperatur gas masuk turbin $T_{g3} = 1473$ K
 - harga-harga c_{pg} , k_{g3} , c_{pg} , c_{pg} , k_{g4} dan c_{pg} rata-rata antara temperatur 300 K dan 1473 K.
- Memilih harga r awal kemudian melakukan perhitungan q_{g23} , T_{g4} , w_{ag} dan q_{g47} .
- Memilih harga p_u awal.
- Memasukkan harga-harga T_{u3} , T_{u4} , h_{u3} dan h_{u4} untuk setiap p_u yang bersangkutan.
- Memasukkan konstanta-konstanta persamaan regresi $T_{u5} = \phi_{1p}(h_{u5})$ dan $s_{u5} = \phi_{2p}(h_{u5})$ pada daerah panas lanjut untuk setiap harga p_u yang bersangkutan.
- Menghitung h_{2u} .
- Memilih M_u awal.
- Menghitung T_{g6} dan ΔT_{min1} .
- Mengetes kondisi ΔT_{min1} apakah lebih kecil dari pada 10 K. Bila benar, ganti M_u dengan harga yang baru dan lebih besar kemudian kembali kelangkah (8). Bila tidak, lanjutkan perhitungan.
- Menghitung h_{u5} dan mengetes apakah h_{u5} lebih kecil dari pada h_{u4} . Bila $h_{u5} < h_{u4}$, dan bila loop pernah terlaksana catat r , p_u , M_u , x_{u6} , ΔT_{min1} , ΔT_{min2} , E_{du} dan E_{ex} kemudian ganti p_u dengan harga yang baru dan lebih besar kemudian kembali kelangkah (4). Bila loop belum terlaksana, p_u langsung diganti dengan p_u yang baru dan lebih besar, kemudian kembali ke langkah (4). Bila $h_{u5} > h_{u4}$ lanjutkan perhitungan.
- Menghitung T_{u5} dan s_{u5} .
- Mengetes apakah T_{u5} lebih besar dari 823 K. Bila benar ganti M_u dengan harga yang baru dan lebih besar kemudian kembali kelangkah (8). Bila tidak, perhitungan dilanjutkan.



Gambar 4a. Digram Alir Program Utama.

Catatan:
(p ...) = (persamaan ...)
(m....) = (data masukan ...)



Gambar 4b. Diagram Alir Program Subroutine 500.

13. Menghitung $\Delta T_{\min 2}$ kemudian mengetes kondisi apakah $\Delta T_{\min 2}$ lebih kecil dari pada 10 K. Bila benar, ganti M_u dengan harga yang baru dan lebih besar kemudian kembali kelangkah (8). Bila tidak, perhitungan dilanjutkan.
14. Menghitung h_{u6} dan x_{u6} kemudian mengetes apakah kondisi x_{u6} lebih besar dari pada 0,99. Bila benar, ganti M_u dengan harga yang baru dan lebih besar kemudian kembali kelangkah (8). Bila tidak, perhitungan dilanjutkan.
15. Mengetes apakah kondisi x_{u6} lebih kecil dari pada 0,88. Bila $x_{u6} < 0,88$, dan bila loop pernah terlaksana catat harga-harga r , p_u , M_u , x_{u6} , $\Delta T_{\min 1}$, $\Delta T_{\min 2}$, E_{du} dan E_{dg} kemudian ganti p_u dengan harga yang baru dan lebih besar kemudian kembali kelangkah (4). Bila loop belum pernah terlaksana, p_u langsung diganti dengan p_u yang baru dan lebih besar, kemudian kembali kelangkah (4). Bila $x_{u6} > 0,88$, perhitungan dilanjutkan.
16. Menghitung w_{un} , E_{du} dan E_{tot} .
17. Bandingkan E_{tot} dengan M_u yang baru (E_{totb}) terhadap E_{tot} dengan M_u sebelumnya (E_{totl}). Bila $E_{totb} > E_{totl}$, ganti E_{totl} dengan E_{totb} . Demikian juga untuk besaran-besaran M_u , x_{u6} , $\Delta T_{\min 1}$, $\Delta T_{\min 2}$ dan E_{du} . Bila $E_{totb} < E_{totl}$, catat M_u , x_{u6} , $\Delta T_{\min 1}$, $\Delta T_{\min 2}$, E_{du} dan E_{totl} kemudian ganti p_u dengan harga yang baru dan lebih besar kemudian kembali kelangkah (4).
18. Bila $p = 60$ bar, kembali ke langkah (2) dengan harga r yang baru dan lebih besar.
19. Mengetes apakah $r < 60$. Bila benar, langkah 2 diulangi dengan harga r yang baru. Bila tidak, perhitungan dihentikan.

5. ANALISIS HASIL PERHITUNGAN

Dari perhitungan yang telah dilakukan didapatkan gejala-gejala sebagai berikut:

1. Pada harga-harga r dan p_u yang sudah tertentu efisiensi total semakin turun dengan semakin bertambahnya laju aliran massa uap. Harga M_u yang semakin membesar menyebabkan T_{u5} semakin turun sehingga menyebabkan $\Delta T_{\min 2}$ semakin besar. Karena T_{g7} telah ditetapkan, semakin besarnya M_u menuntut, karena kalor yang dipindahkan di ekonomiser semakin besar, harga T_{g6} yang semakin tinggi. Hal tersebut menyebabkan $\Delta T_{\min 1}$ juga semakin besar. Dengan semakin besarnya $\Delta T_{\min 1}$ dan $\Delta T_{\min 2}$ menyebabkan irreversibilitas semakin besar sehingga efisiensi siklus uap semakin turun. Karena efisiensi siklus gas tetap, maka dengan semakin turunnya efisiensi siklus uap, efisiensi gabungan menjadi semakin turun.
2. Untuk harga p_u yang sudah tertentu, semakin meningkatnya T_{u5} menyebabkan harga x_6 semakin meningkat. Oleh karena hal tersebut, persyaratan $x_6 \leq 0,99$ semakin berperan dengan semakin membesarnya M_u dan terutama untuk harga-harga p_u yang rendah.

3. Untuk harga r yang sudah tertentu, efisiensi total maksimum semakin meningkat dengan semakin meningkatnya p_u . Harga M_u yang berkaitan dengan efisiensi total maksimum pada setiap harga p_u harganya semakin kecil. Dengan harga p_u yang semakin tinggi dan M_u yang semakin kecil, menyebabkan harga-harga T_{u5} semakin naik, T_{u3} semakin naik tetapi T_{g6} semakin turun. Dengan demikian irreversibilitas semakin turun, efisiensi siklus uap meningkat sehingga efisiensi total maksimum siklus kombinasi menjadi semakin meningkat.
4. Untuk harga-harga r dan p_u yang semakin tinggi, persyaratan-persyaratan yang dikenakan pada $\Delta T_{\min 1}$ dan $x_{6\min}$ menjadi semakin peka dan sebaliknya $x_{6\max}$ menjadi semakin kurang peka. Untuk harga r yang semakin tinggi, harga T_{g4} menjadi semakin turun (T_{g3} tetap). Sedangkan untuk harga p_u yang semakin tinggi, harga T_{u3} juga semakin tinggi, sehingga $\Delta T_{\min 1}$ semakin kecil. Dengan semakin turunnya T_{g4} , T_{u5} juga semakin turun sehingga tingkat keadaan uap keluar turbin semakin menjauhi daerah panas lanjut sehingga persyaratan $x_{6\max}$ menjadi kurang peka dan persyaratan $x_{6\min}$ menjadi lebih peka.

6. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Efisiensi total siklus kombinasi tergantung kuat pada r , p_u , T_{u5} dan M_u .
2. Untuk harga r dan p_u yang sudah tertentu efisiensi total semakin turun dengan bertambah besarnya M_u .
3. Untuk harga r yang sudah tertentu efisiensi total maksimum meningkat dengan semakin meningkatnya p_u dan disertai dengan M_u yang semakin kecil.
4. Untuk harga p_u yang sama efisiensi siklus uap semakin turun dengan semakin meningkatnya r . Tetapi sebaliknya efisiensi siklus gas semakin naik. Ternyata peningkatan efisiensi siklus gas lebih kuat dari pada penurunan efisiensi siklus uap, sehingga efisiensi total siklus kombinasi tetap semakin meningkat.

DAFTAR NOTASI

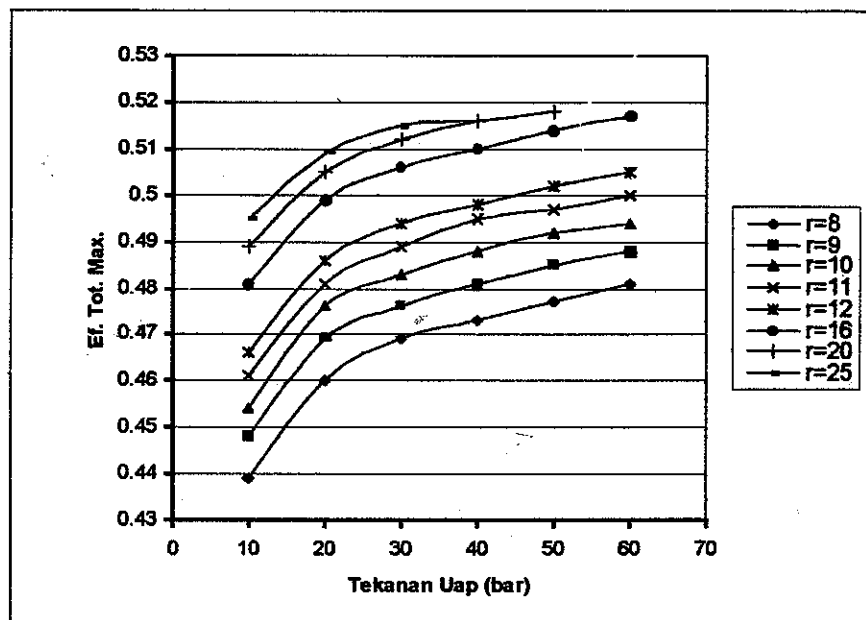
C_p	: panas jenis tekanan tetap gas
E	: efisiensi siklus
h	: enthalpi
p	: tekanan
q	: energi kalor spesifik
Q	: energi kalor
r	: perbandingan tekanan siklus gas
s	: entropi
T	: temperatur
v	: volume spesifik
w	: energi kerja spesifik
W	: energi kerja

x : kualitas uap
 η : efisiensi isentropik
 ϕ_p : fungsi regresi isobarik

SUBSKRIP

c : kompresor
d : siklus
g : gas
h : pembangkit uap kalor bekas
(heat recovery steam boiler)
p : pompa
n : netto
s : proses isentropik
t : turbin
u : H₂O

g1 : tingkat keadaan gas masuk kompresor
g2 : tingkat keadaan gas masuk ruang bakar
g3 : tingkat keadaan gas masuk turbin
g4 : tingkat keadaan gas masuk alat pemanas lanjut
g5 : tingkat keadaan gas masuk alat penguap
g6 : tingkat keadaan gas masuk ekonomiser
g7 : tingkat keadaan gas masuk cerobong
r : ruang bakar
tot : total
u1 : tingkat keadaan H₂O masuk pompa
u2 : tingkat keadaan H₂O masuk ekonomiser
u3 : tingkat keadaan H₂O masuk alat penguap
u4 : tingkat keadaan H₂O masuk alat pemanas lanjut
u5 : tingkat keadaan H₂O masuk turbin
u6 : tingkat keadaan H₂O masuk kondensor
u7 : tingkat keadaan uap jenuh H₂O pada kondensor



Gambar 5. Efisiensi Total Maksimum Sebagai Fungsi Tekanan.

Tabel 1. Efisiensi Total Maksimum Pada Beberapa Harga Perbandingan Tekanan dan Tekanan Pembangkit Uap.

$r / T_{g1} / E_{dg}$	p_u	M_u	x_g	T_{ut}	ΔT_{min1}	ΔT_{min2}	E_{dg}	$E_{tot\ max}$
8 / 934,3 / 0,304	10	0,168	0,987	720,0	81,4	223,3	0,255	0,439
	20	0,159	0,987	806,6	65,6	136,7	0,296	0,460
	30	0,158	0,971	819,6	58,0	123,8	0,311	0,469
	40	0,159	0,952	815,9	53,8	127,5	0,320	0,473
	50	0,159	0,941	815,8	50,0	127,5	0,328	0,477
	60	0,159	0,932	821,6	47,0	121,7	0,334	0,481

(dilanjutkan)

Tabel 1. (lanjutan).

$r/T_{gs}/E_{ds}$	P_s	M_u	x_0	T_{gs}	ΔT_{min}	ΔT_{max}	E_{ds}	$E_{act max}$
9 / 920,7 / 0,315	10	0,160	0,989	723,5	77,0	197,1	0,256	0,448
	20	0,151	0,990	814,4	60,2	106,2	0,297	0,469
	30	0,151	0,970	818,0	52,6	102,6	0,311	0,476
	40	0,152	0,951	813,9	47,9	106,7	0,320	0,481
	50	0,152	0,940	813,9	43,7	106,7	0,327	0,485
	60	0,152	0,931	819,8	40,2	100,8	0,334	0,488
10 / 900,9 / 0,324	10	0,154	0,986	717,8	73,8	183,2	0,255	0,454
	20	0,145	0,989	812,0	56,1	88,9	0,296	0,476
	30	0,145	0,969	815,7	48,0	85,3	0,310	0,483
	40	0,145	0,955	821,0	42,0	79,9	0,321	0,488
	50	0,145	0,944	820,8	37,3	80,1	0,328	0,492
	60	0,146	0,930	817,2	34,5	83,7	0,333	0,494
11 / 883,5 / 0,332	10	0,148	0,987	719,2	70,5	164,3	0,255	0,461
	20	0,140	0,987	806,5	52,7	77,0	0,296	0,481
	30	0,139	0,972	820,7	43,35	62,8	0,311	0,489
	40	0,140	0,952	815,8	37,8	67,7	0,320	0,495
	50	0,140	0,941	815,7	32,8	67,8	0,328	0,497
	60	0,140	0,932	821,6	28,7	61,9	0,334	0,500
12 / 868,0 / 0,339	10	0,143	0,986	716,9	67,8	151,0	0,255	0,466
	20	0,135	0,987	807,2	49,3	60,8	0,296	0,486
	30	0,134	0,972	821,8	39,5	46,2	0,311	0,494
	40	0,135	0,953	816,3	33,6	51,4	0,320	0,498
	50	0,135	0,941	816,3	28,3	51,6	0,328	0,502
	60	0,135	0,933	822,2	23,9	45,8	0,334	0,505
16/818,9/0,359	10	0,126	0,988	722,4	58,6	96,4	0,256	0,481
	20	0,120	0,984	799,8	39,1	19,1	0,295	0,499
	30	0,120	0,964	803,8	28,7	15,1	0,309	0,506
	40	0,121	0,944	797,7	21,7	21,2	0,317	0,510
	50	0,121	0,933	798,2	15,6	20,7	0,325	0,514
	60	0,121	0,924	804,2	10,5	14,7	0,332	0,517
20/783,1/0,370	10	0,114	0,989	722,6	52,2	60,6	0,256	0,489
	20	0,111	0,969	767,6	33,0	15,5	0,290	0,505
	30	0,111	0,949	772,4	21,7	10,7	0,304	0,512
	40	0,112	0,928	766,4	14,1	16,7	0,313	0,516
	50	0,115	0,899	734,0	10,2	49,1	0,316	0,518
	60	*	*	*	*	*	*	*
25/749,2/0,378	10	0,103	0,986	717,6	46,0	31,6	0,255	0,495
	20	0,102	0,955	738,6	26,9	10,6	0,286	0,509
	30	0,103	0,928	730,9	15,5	18,6	0,299	0,515
	40	0,108	0,881	677,8	10,8	71,5	0,302	0,516
	50	*	*	*	*	*	*	*
	60	*	*	*	*	*	*	*
30/722,9/0,381	10	0,095	0,980	704,5	41,7	18,4	0,253	0,496
	20	0,095	0,942	712,3	22,1	10,6	0,282	0,509
	30	0,096	0,915	704,9	10,7	18,0	0,295	0,515
	40	*	*	*	*	*	*	*
	50	*	*	*	*	*	*	*
	60	*	*	*	*	*	*	*

(*) : tidak memenuhi salah satu atau lebih syarat-syarat yang diberikan.
 Satuan : r (-), T (K), E (-), M_u (kg uap/kg gas), x (-)

Tabel 2. Hasil Perhitungan dengan Persyaratan-Persyaratan yang Tidak Diberlakukan pada $r = 20,0$ dan Tekanan Pembangkit Uap 60,0 bar.

M_u	x_5	h_{u5}	T_{u5}	ΔT_{min1}	ΔT_{min2}	E_{u5}	E_{u6}	E_{u7}
0,097	1,004	3934,7	981,2	-12,5	-198,1	0,370	0,356	-
0,098	0,997	3896,5	963,1	-11,6	-182,0	0,370	0,354	-
0,099	0,991	3859,0	949,3	-10,6	-166,2	0,370	0,352	-
0,100	0,984	3822,3	933,9	-9,7	-150,8	0,370	0,350	-
0,101	0,977	3786,3	918,9	-8,7	-135,8	0,370	0,347	-
0,102	0,971	3751,1	904,1	-7,7	-121,0	0,370	0,345	-
0,103	0,964	3716,5	889,8	-6,8	-106,7	0,370	0,343	-
0,104	0,958	3682,5	875,7	-5,8	-92,6	0,370	0,341	-
0,105	0,952	3649,2	862,0	-4,9	-78,9	0,370	0,340	-
0,106	0,945	3616,6	848,6	-3,9	-65,5	0,370	0,338	-
0,107	0,939	3584,5	835,5	-2,9	-52,4	0,370	0,336	-
0,108	0,933	3553,1	822,7	-2,0	-39,6	0,370	0,334	-
0,109	0,927	3522,2	810,2	-1,0	-27,1	0,370	0,332	-
0,110	0,921	3491,9	798,0	-0,1	-14,8	0,370	0,331	-
0,111	0,915	3462,1	786,0	0,9	-2,9	0,370	0,329	-
0,112	0,908	3432,9	774,4	1,9	8,7	0,370	0,327	-
0,113	0,903	3404,2	763,0	2,8	20,1	0,370	0,326	-
0,114	0,897	3376,0	751,9	3,8	31,2	0,370	0,324	-
0,115	0,891	3348,2	741,0	4,7	42,1	0,370	0,323	-
0,116	0,885	3321,0	730,4	5,7	52,7	0,370	0,322	-
0,117	0,879	3294,2	720,0	6,7	63,1	0,370	0,320	-
0,118	0,873	3267,9	709,9	7,6	73,2	0,370	0,319	-
0,119	0,867	3242,0	700,0	8,6	83,1	0,370	0,318	-
0,120	0,862	3216,5	690,4	9,5	92,7	0,370	0,316	-
0,121	0,856	3191,5	680,9	10,5	102,2	0,370	0,315	-
0,122	0,850	3166,9	671,7	11,5	111,4	0,370	0,314	-
0,123	0,845	3142,7	662,7	12,4	120,4	0,370	0,313	-

(-) : Tidak tercatat karena tidak memenuhi salah satu atau lebih syarat batas berikut:
 $0,88 \leq x_5 \leq 0,99$, $h_{u5} > 2784,3$ kJ/kg, $T_{u5} \leq 823$ K, $\Delta T_{min1} = \Delta T_{min2} \geq 10$ K.

DAFTAR PUSTAKA

1. M.M. El Wakil, "Power Plant Technology", McGraw Hill Book Company, New York, 1985.
2. J.B. Stout et al, "A Large Combined Gas Turbine - Steam Turbine Generating Unit", Proceeding of the American Power Conference, Chicago, Illinois Institute of Technology, 1962.
3. A. Hansson, "The 300 MW Combined Cycle and 20 MW IGSC Project in Barsebeck", 3rd International Symposium on Turbo Machinery, Combined Cycle Technologies and Cogeneration, 1989.