

PEMODELAN DAN SIMULASI SISTEM PEMBANGKIT TURBIN GAS PLTGU TANJUNG PRIOK

Indrawanto¹, H. Cahyono²

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, ITB

²PT. Indonesia Power Unit Pembangkit Tanjung Priok

Kontak: Indrawanto, email: indrawanto@tekprod.ms.itb.ac.id

Ringkasan. Makalah ini menyajikan pemodelan dan simulasi sistem pembangkit turbin gas PLTGU Tanjung Priok. Pemodelan dilakukan dengan pendekatan sistem turbin uap. Model yang dikembangkan hanya menerima perubahan beban sebagai input pada sistem. Untuk pengendalian frekuensi sistem dicoba tiga jenis sistem kendali; speed-droop governor, speed-droop governor dengan kendali integral, dan speed-droop governor dengan dengan kendali integral dan derivatif. Hasil simulasi menunjukkan, saat terjadi perubahan beban, kendali speed-droop governor dengan kendali integral dan derivatif mampu mengembalikan frekuensi sistem ke 50 Hz tanpa osilasi .

Abstract. This paper presents the modeling and simulation of the gas turbine generating system of Tanjung Priok Combined Cycle Power Plant. The gas turbine model is approximated using steam turbine systems. The model developed only accepts load changes as input to the system. Three types of control systems; speed-droop governor, speed-droop governor with integral control, and speed-droop governor with integral and derivative control have been tried to control the frequency of the system. The simulation results show that, in the presence of load changes, the speed-droop governor with integral and derivative control is able to bring back the system frequency to 50 Hz without oscillation.

Keywords: *Gas turbines, control systems, governors, speed-droop, integral and derivative control.*

1 Pendahuluan

Suatu keberhasilan operasi sistem tenaga listrik adalah tercapainya penyediaan tenaga listrik yang handal, aman dan ekonomis. Aspek keandalan ini menyangkut kemampuan mengatur dan mengendalikan sistem pembangkit tenaga listrik. Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik sering dijumpai perubahan frekuensi, beban dan tegangan secara terus-menerus akibat gangguan acak. Gangguan tersebut ada yang bersifat transien dan dinamik yang sangat merugikan karena menyebabkan sistem tidak stabil (*swing/hunting*) sehingga mengakibatkan sistem operasi tidak ekonomis, kerusakan peralatan dan trip pada unit. Berkaitan dengan hal itu maka diperlukan sistem kendali yang dapat dengan cepat mengembalikan sistem pembangkit pada kondisi operasi yang stabil.

PLTGU Priok berada pada sistem 150 kV sistem Jawa – Bali, yang mana *Priok-island* menyediakan tenaga listrik untuk daerah DKI Jaya dan Bekasi. Mengingat pembangkit merupakan penyedia tenaga listrik yang vital maka penting untuk difahami perilaku dinamikinya melalui pemodelan dan studi sistem kendali dinamikinya sehingga kinerja sistem dapat dioptimumkan.

Pemodelan dinamika sistem pembangkit listrik turbin gas telah dikembangkan oleh beberapa peneliti. Rowen telah mengembangkan diagram blok fungsi transfer pembangkit turbin gas besar [1], merancang, menghitung dan memverifikasi gain, koefisien dan konstanta waktu dengan pengujian dan pengalaman praktik lapangan yang dikumpulkan dari berbagai instalasi pada berbagai penggunaan. Model fungsi transfer tersebut telah digunakan dalam analisis dinamik pembangkit siklus gabungan [2], model turbin gas kembar [3], model pembakaran turbin [4], pembangkit turbin gas berbahan bakar biomassa [5] [6] dan bahkan pada pembangkit listrik turbin mikro [7]. Pada dasarnya model Rowen memiliki pengendali kecepatan, suhu dan percepatan. Pengendali kecepatan dengan kontrol governor merupakan pengendali utama untuk operasi yang efektif pada pembangkit turbin gas [8]. *Speed-droop governor* lebih sesuai dari pada *isochronous governor* untuk pembangkit turbin gas [9], dengan pengaturan *droop* yang dioptimalkan [10]. *Speed-droop governor* yang dioptimalkan tidak akan mengembalikan laju sistem ke nilai acuan oleh karena itu diperlukan pengendali sekunder yang efektif untuk membuat kesalahan saat *steady state nol*.

Pada makalah ini akan dikembangkan model dinamik sistem turbin gas PLTGU Priok yang terhubung dengan transmisi *Priok-island*. Model yang dikembangkan selanjutnya akan disimulasikan untuk mengetahui perilaku dinamik sistem. Makalah ini disusun sebagai berikut: bab 2 membahas data

mesin PLTGU Priok, bab 3 membahas pemodelan turbin gas, bab 4 membahas pemodelan sistem kendali dan simulasi dan ditutup dengan kesimpulan pada bab 5.

2 Data Mesin PLTGU Priok

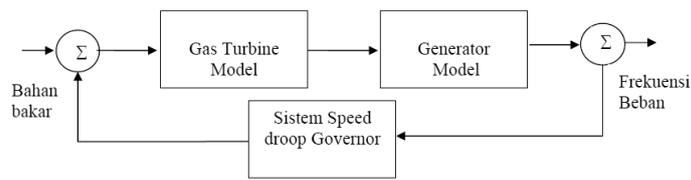
PLTGU Priok dengan total kapasitas 1180 MW terdiri dari 2 block dengan masing-masing block terdiri dari yakni Block 1 terdiri atas 3 (Tiga) buah Gas Turbine @ 130 MW dan 1 Steam Turbine 200 MW; Block 2 terdiri 3 (Tiga) buah Gas Turbine @ 130 MW dan 1 Steam Turbine 200 MW.

Konfigurasi *combined cycle gas turbine* PLTGU Priok terdiri turbin gas dengan governor katup bahan bakar dan gas buang dari turbin gas dimanfaatkan untuk mendapatkan uap dengan HRSG. Keluaran uap ini diatur oleh governor katup turbin uap. Adapun tipe turbin gas adalah ABB GT13E1 mempunyai kapasitas 130 MW, yang mana memiliki tipe silo dengan burner ganda dan combustor tunggal dengan temperature masuk turbin (TIT) 1070 °C dan temperature keluaran turbin (TAT) 545 °C.

Pada pengaturan primer sistem kendali PLTGU Priok memiliki peralatan berupa governor, sistem eksitasi dan *Automatic Voltage Regulator*. Pengaturan *Speed droop* Gas turbin gas adalah sebesar 4%. Pada turbin gas terdapat pengendali frekuensi dan pengendali temperature. Sementara itu pada pengaturan sekunder dilengkapi dengan *Load Frequency Controller* (LFC). PLTGU Priok terhubung dengan *bus infinite* 150 KV dalam Priok-island yang menanggung beban area Jakarta - Bekasi sebesar 750 MW pada setting frekuensi terendah 48,3 Hz.

3 Pemodelan Dinamik Turbine Gas GT 13E1 Tanjung Priok

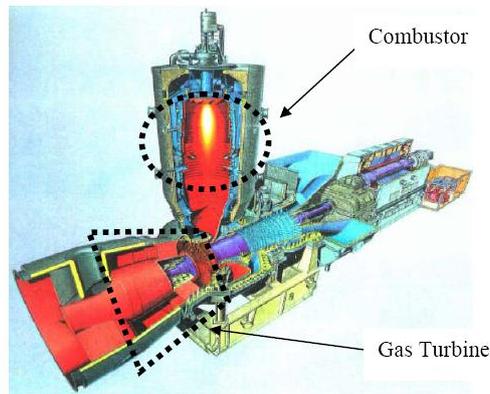
Sistem kendali pada sistem gas turbine secara garis besar terdiri dari bagian utama gas turbine dan governor serta sistem eksitasi. Gabungan dari kedua sistem tersebut dihubungkan dengan generator sehingga terbentuk sistem kendali Pembangkit Listrik Tenaga Gas. Sistem kendali tersebut dimaksudkan untuk menjaga kestabilan agar frekuensi berada pada daerah yang diinginkan sehingga dapat mengembalikan putaran rotor kembali pada putaran sinkron serta tegangan berada pada tegangan nominal yang diinginkan. Pembahasan pada Sistem gas turbine dan governor menyangkut penurunan persamaan dasar sampai diperoleh Transfer function-nya termasuk pembahasan tentang *speed droop*. Diagram blok model dinamik turbin gas ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Model dinamik turbin gas pada pembangkit daya

3.1 Pemodelan Turbin Gas Siklus Sederhana

Turbin gas siklus sederhana di PLTGU Priok merupakan produksi ABB Type 13E1 dengan kapasitas 130 MW yang menggunakan ruang bakar tipe silo (*Silo Combustor*). Pemodelan dibuat berdasarkan 2 komponen utama yakni ruang bakar (*Combustor*) dan turbin gas. Gambar 2 menunjukkan sistem turbin gas 13E1 di Tanjung Priok.



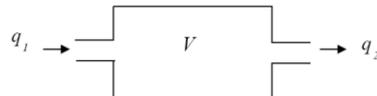
Gambar 2 Gas Turbine 13E1 Tanjung Priok

Model matematis sistem turbine gas dikembangkan dengan pendekatan model aliran gas melalui Vessel seperti pada Gambar 3. Model ini seperti yang pernah diusulkan di [11], yang terutama berdasarkan pemodelan yang diusulkan pada [12,13] (model IEEE). Beberapa asumsi yang diadopsi dari model IEEE adalah:

- Pada turbin gas, campuran udara dan gas lebih kurang sama dengan aliran udara, yakni laju aliran massa bahan bakar jauh lebih kecil daripada laju aliran massa udara.

- Menggunakan model turbin uap yang disederhanakan, dengan mengasumsikan bahwa pembangkitan daya tergantung secara eksklusif dari pemanfaatan pada dari turbin gas.
- Kehilangan tekanan pada ruang bakar diabaikan.

Dengan mengacu ke [11,12,13], turbin gas dapat dimodelkan secara sederhana dengan diagram pada Gambar 3.



Gambar 3 Pemodelan turbin gas sebagai vessel

Pada Gambar 3, q adalah laju aliran massa gas dan V adalah volume vessel. Persamaan kontinuitas massa dalam vessel berlaku

$$q_1 - q_2 = V \frac{d\rho}{dt} \quad (1)$$

dengan q_1 = aliran massa gas input (kg/s), q_2 = aliran massa gas output (kg/s), V = volume vessel (m^3), ρ = rapat massa gas (kg/m^3) dan t = waktu (s).

Diasumsikan keluaran gas proporsional terhadap tekanan di dalam vessel sehingga:

$$q_2 = q_0 \frac{p}{p_0} \text{ sehingga } \frac{dq_2}{dt} = \frac{p_0}{q_0} \frac{dq_2}{dt}$$

yang mana p = tekanan gas dalam vessel, p_0 = tekanan rata-rata, dan q_0 = laju keluaran gas dari vessel rata-rata.

Pada suhu tetap, perubahan rapat massa dapat dinyatakan dengan

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dp}{dt} \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (2)$$

Ketika terjadi perubahan laju aliran massa gas input maka massa gas dalam vessel akan berubah secara proporsional yang besarnya dinyatakan dalam persamaan

$$q_1 - q_2 = V \frac{\partial q}{\partial p} \frac{dp}{dt} = V \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{p_0}{q_0} \frac{dq_2}{dt} \quad (3)$$

Jika T adalah waktu yang berkaitan dengan momen inersia dari gas di dalam vessel $T = V \frac{p_0}{q_0} \frac{\partial \rho}{\partial p}$ maka Persamaan (3) dapat ditulis menjadi

$$q_1 - q_2 = T \frac{dq_2}{dt} \quad (4)$$

Dengan transformasi Laplace pada Persamaan (4) didapat transfer function sebagai berikut:

$$\frac{Q_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{1}{1 + Ts} \quad (5)$$

3.2 Model Combustor

Pada turbin gas, campuran udara dan bahan bakar (selanjutnya disebut bahan bakar) tidak langsung memutar turbin namun harus terbakar terlebih dahulu dalam ruang bakar. Untuk itu perlu diperhitungkan waktu tinggal (*time lag*) bahan bakar di ruang bakar yang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$q_1(t) = y(t - T_d) \quad t > T_d \quad (6)$$

yang mana $y(t)$ adalah laju aliran massa bahan bakar (kg/m^3) dan T_d waktu tinggal dalam ruang bakar (s).

Dalam hal ini, pembakaran belum selesai jika $t < T_d$. Fungsi transfer antara gas yang keluar dari ruang bakar dengan bahan bakar yang masuk ke ruang bakar dapat dinyatakan dengan:

$$\frac{Q_1(s)}{Y(s)} = e^{-T_d s} \quad (7)$$

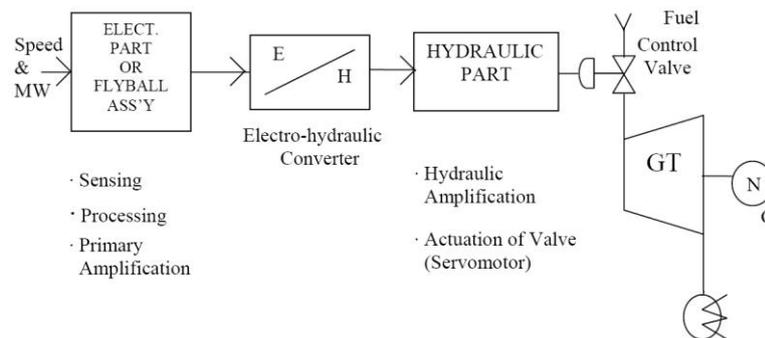
Menggabungkan Persamaan (5) dan Persamaan (7) maka dapat diperoleh fungsi transfer laju aliran massa gas keluar turbin terhadap laju aliran massa bahan bakar sebagai berikut

$$\frac{Q_2(s)}{Y(s)} = \frac{e^{-T_d s}}{1 + Ts} \quad (8)$$

3.3 Sistem Governor

Sistem governor yang digunakan pada pembangkit ini adalah sistem governor elektrik hidrolik. Sistem governor Elektrik Hidrolik terdiri dari bagian elektronik yang mendapatkan input dari sinyal laju putaran (*speed*) dan beban (MW). Keluaran bagian elektronik ini berupa signal tegangan yang dikonversikan menjadi tekanan hidrolik oleh *electro-hydraulic converter* (EHC). Selanjutnya fluida hidraulik bertekanan tersebut akan menggerakkan *servo control valve* tekanan tinggi. Governor akan beraksi untuk menahan perubahan frekuensi.

Sensor laju putaran governor ini dapat berupa *flyball assembly* atau *frequency transducer*. Keluaran sensor laju dan sensor beban (MW) melewati pengkondisi sinyal dan penguat (amplifier) yang berupa kombinasi elemen hidraulik mekanik, rangkaian elektronik dan *software*. Gambar4) menunjukkan sistem governor



Gambar 4 Sistem Governor

3.4 Isochronous dan Speed Droop Governor

Pada umumnya jenis governor pada pembangkit listrik dapat dikelompokkan menjadi dua jenis yakni *Isochronous governor* dan *speed droop governor*. *Isochronous governor* adalah governor yang akan menjaga laju putaran generator konstan pada semua kondisi beban. *Isochronous governor* dapat bekerja dengan baik jika terhubung dengan beban yang terisolasi artinya satu generator untuk menyediakan listrik pada suatu daerah terisolasi tanpa ada sumber listrik dari generator lain atau hanya satu generator pembangkit yang merespon perubahan beban pada sistem dengan banyak pembangkit.

Pada sistem yang terkoneksi dengan dua atau lebih pembangkit listrik diperlukan *speed droop governor* dengan tujuan bahwa jika terjadi gangguan yang menyebabkan perubahan frekuensi maka beban sistem dapat ditanggung oleh beberapa unit pembangkit secara bersama-sama. Pada PLTGU Priok digunakan tipe *speed droop governor*. *Speed droop* adalah fungsi governor yang akan menurunkan laju acuan governor saat keadaan bahan bakar (beban) meningkat.

Dinamika speed-droop governor dapat dinyatakan dengan Persamaan (9) di bawah ini [14].

$$Y(s) = \left[P_{ref}(s) - \frac{\Delta\omega_r(s)}{R} \right] \left(\frac{K_g}{1 + sT_g} \right) \quad (9)$$

dengan:

Y = perubahan bukaan katup bahan bakar

R = pengaturan *speed droop governor*

K_g = adalah penguatan laju governor

T_g = adalah konstanta waktu governor

$\Delta\omega_r$ = perubahan frekuensi

Di dalam praktek *speed droop* berupa setting yang terpasang sebagai regulasi primer agar setiap pembangkit dapat berkontribusi memenuhi permintaan beban pada saat terjadi penurunan frekuensi yang dapat dinyatakan dengan Persamaan (10).

$$\Delta P = -K\Delta F \quad (10)$$

dengan

ΔP = variasi beban (MW)

ΔF = variasi frekuensi (F - 50 Hz)

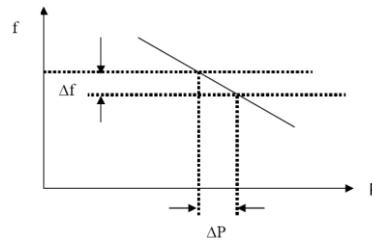
K = gain controller (MW/Hz)

Nilai K didapat dari Persamaan (11) berikut ini:

$$K = \frac{P_0}{f_0 R} \quad (11)$$

dengan P_0 = beban nominal (MW)
 R = speed droop
 f_0 = frekuensi nominal (Hz)

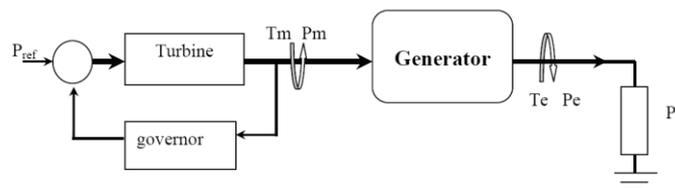
Gambar 5 menunjukkan respon pembangkit terhadap perubahan beban. Pada pengaturan menggunakan speed-droop governor pembangkit tidak akan mengembalikan ke laju putaran turbin ke frekuensi nominal tetapi ke dalam suatu jangkauan sesuai dengan pemilihan konstanta *speed-droop*.



Gambar 5 Respon pembangkit dengan speed droop

3.5 Pemodelan Sistem Pembangkit dengan Beban

Gambar 6 menunjukkan skematik sistem pembangkit dengan beban. Persamaan generator dapat diturunkan dari respon generator saat terjadi perubahan beban maka terjadi perubahan torsi elektrik (ΔT_e) generator sehingga terjadi ketidakseimbangan antara torsi elektrik dengan torsi mekanik (ΔT_m). Keadaan tersebut mengakibatkan terjadinya perubahan laju putaran yang mana persamaan gerak perubahan tersebut dapat dinyatakan dengan Persamaan (12).



Gambar 6 Sistem Generator

$$T_m - T_e = T_a = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (12)$$

dengan

T_m = torsi mekanik
 T_e = torsi elektrik
 T_a = torsi akselerasi
 J = momen inersia generator dan turbin (kg.m²)
 ω_r = laju putaran sudut (rad/s)
 t = waktu (s)

Pada studi stabilitas sistem pembangkit adalah biasa untuk menyatakan inersia suatu mesin sebagai rasio energi kinetik yang tersimpan pada laju nominal terhadap daya nominal [14] yang dinyatakan dengan Persamaan [13]

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\omega_{r0}^2}{S_{base}} \quad (13)$$

yang mana H adalah konstanta inersia (s), ω_{r0} adalah laju putaran nominal poros (rad/s) dan S_{base} adalah daya nominal mesin listrik (kVA).

Selanjutnya momen inersia J dapat ditulis menjadi Persamaan (14)

$$J = \frac{2H}{\omega_{r0}^2} S_{base} \quad (14)$$

Dengan mensubstitusi Persamaan (14) ke dalam Persamaan (12) didapat

$$T_m - T_e = \frac{2H}{\omega_{r0}^2} S_{base} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (15)$$

atau

$$\frac{T_m - T_e}{S_{base} / \omega_{r0}} = 2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{\omega_{r0}} \right) \quad (16)$$

Jika S_{base} dan ω_{r0} dinyatakan dalam satuan p.u. (per unit) maka $S_{base} = 1$ dan $\omega_{r0} = 1$. Karena $\omega_r = \omega_{r0} + \Delta\omega_r$ yang mana $\Delta\omega_r$ adalah perubahan frekuensi rotor, maka Persamaan (16) dapat dituliskan menjadi Persamaan (17)

$$T_m - T_e = 2H \frac{d\Delta\omega_r}{dt} \quad (17)$$

Dengan transformasi Laplace pada Persamaan (17) didapat

$$\Delta\omega_r(s) = \frac{1}{2Hs} [\Delta T_m(s) - \Delta T_e(s)] \quad (18)$$

Hubungan antara daya (P) dan torsi (T) dinyatakan pada Persamaan (19)

$$P = \omega_r T \quad (19)$$

Pada saat kondisi tunak (*steady state*) yakni saat laju putaran tetap, penyimpangan kecil dari keadaan nominal dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P &= P_0 + \Delta P \\ T &= T_0 + \Delta T \\ \omega_r &= \omega_{r0} + \Delta\omega_r \end{aligned}$$

yang mana P_0 , T_0 , ΔP dan ΔT masing-masing adalah daya nominal, torsi nominal, perubahan daya dan perubahan torsi.

Dari Persamaan (19)

$$P_0 + \Delta P = (\omega_{r0} + \Delta\omega_r)(T_0 + \Delta T)$$

Hubungan antara perubahan nilai, dengan mengabaikan suku pangkat tinggi, diberikan oleh

$$\Delta P = \omega_{r0} \Delta T + T_0 \Delta\omega_r$$

Sehingga

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_{r0} (\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} - T_{e0}) \Delta\omega_r$$

Pada keadaan tunak, torsi elektrik dan mekanik adalah sama, $T_{m0} = T_{e0}$. Dengan laju dinyatakan dalam satuan p.u. (per unit), $\omega_{r0} = 1$, maka

$$\Delta P_m - \Delta P_e \approx \Delta T_m - \Delta T_e \quad (20)$$

yang mana ΔP_m = perubahan daya mekanik dan ΔP_e = perubahan daya elektrik.

Dengan menggunakan Persamaan (20) maka Persamaan (18) dapat dinyatakan dengan Persamaan (21) di bawah ini

$$\Delta\omega_r(s) = \frac{1}{2Hs} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \quad (21)$$

Jika generator terhubung dengan beban P_L seperti pada Gambar 5 maka perubahan daya elektrik ΔP_e yang dihasilkan generator besarnya dituliskan pada Persamaan (22) berikut ini

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega_r \quad (22)$$

yang mana

ΔP_L = perubahan beban tak sensitif terhadap frekuensi

$D\Delta\omega_r$ = perubahan beban sensitif terhadap frekuensi

D = konstanta redaman beban

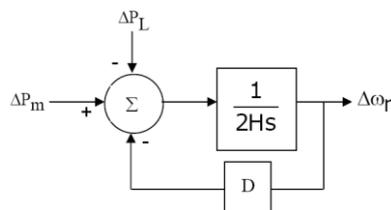
sehingga jika dari Persamaan (21) didapat ΔP_e seperti dituliskan pada Persamaan (23)

$$\begin{aligned} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] &= 2Hs\Delta\omega_r \\ \Delta P_e &= \Delta P_m - 2Hs\Delta\omega_r \end{aligned} \quad (23)$$

Dengan mensubstitusi Persamaan (22) ke dalam Persamaan (23) diperoleh:

$$\begin{aligned} \Delta P_m - 2Hs\Delta\omega_r &= \Delta P_L + D\Delta\omega_r \\ \Delta P_m - \Delta P_L &= [2Hs + D]\Delta\omega_r \end{aligned} \quad (24)$$

Gambar 7 menunjukkan diagram blok Persamaan (24) yang menyatakan hubungan antara ΔP_m , ΔP_L dan $\Delta\omega_r$.

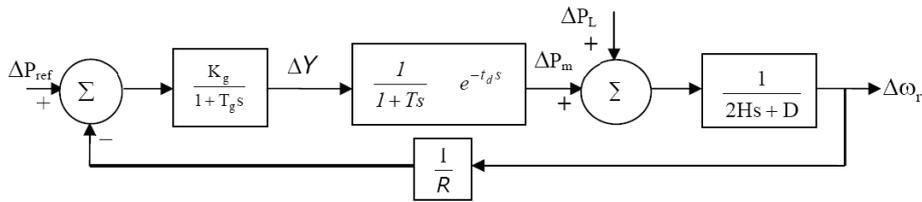


Gambar 7 Diagram Blok Generator dengan Pembebanan P_L

4 Pemodelan Sistem Kendali dan Simulasi Pembangkit Turbin Gas

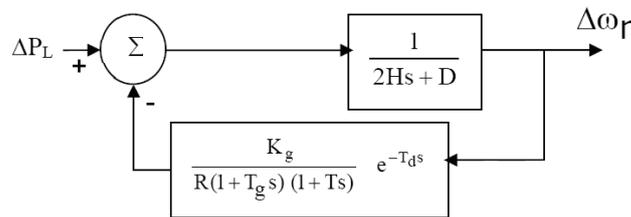
4.1 Model Sistem Kendali Turbin Gas Terisolasi dengan Speed-droop

Model yang dikembangkan pada bagian ini ada model turbin gas daya terisolasi dengan *speed-droop*. Pemodelan turbin gas daya terisolasi dengan *speed-droop* dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh *speed-droop* meskipun hanya satu generator yang berada dalam sistem. Gambar 8 menunjukkan diagram blok pembangkit listrik turbin gas dengan speed droop governor.



Gambar 8 Blok Diagram Pembangkit Listrik turbin gas dengan *Speed droop governor*

Bila tidak ada perubahan beban acuan $\Delta P_{ref} = 0$ maka model Gambar 8 tersebut dapat disederhanakan menjadi sistem seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9 Model Pembangkit Listrik Gas Turbine generator dengan Speed droop governor, $\Delta P_{ref} = 0$

Fungsi transfer pembangkit dengan speed droop governor pada Gambar 9 dapat dinyatakan dengan Persamaan (25)

$$\frac{\Delta \omega_r(s)}{\Delta P_L(s)} = \frac{(1 + T_g s)(1 + Ts)}{(2Hs + D)(1 + T_g s)(1 + Ts) + \frac{K_g e^{-T_d s}}{R}} \quad (25)$$

Dari Persamaan (25), dengan memasukkan data parameter pada lampiran 1 dan karena nilai $T_d \approx 0$ maka diperoleh Persamaan (26):

$$\frac{\Delta\omega_r(s)}{\Delta P_L} = \frac{[1 + 0,32s][1 + 0,6s]}{[2 \times 5s + 1][1 + 0,32s][1 + 0,6s] + \frac{1,226}{0,04}} \quad (26)$$

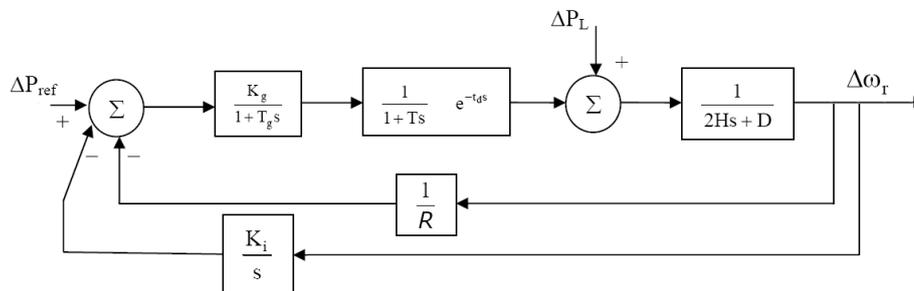
atau

$$\frac{\Delta\omega_r(s)}{\Delta P_L} = \frac{0,192s^2 + 0,92s + 1}{1,92s^3 + 9,392s^2 + 10,92s + 31,65} \quad (27)$$

Persamaan (27) menyatakan hubungan antara perubahan frekuensi terhadap perubahan beban.

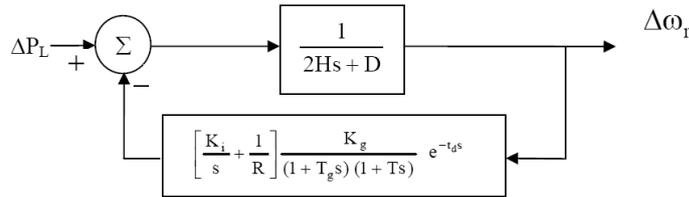
4.2 Model Sistem Kendali Turbin Gas Terisolasi dengan Speed-droop dan Kendali Integral

Sistem kendali ini sama dengan yang terpasang di existing plant yakni menggunakan kendali integral (K_i/s). Penambahan kendali integral pada sistem untuk menghilangkan pengaruh gangguan konstant pada laju keluaran sistem. Gambar 10 menunjukkan gambar diagram blok pembangkit listrik turbin gas dengan speed-droop governor dan kendali integral.



Gambar 10 Diagram Blok Pembangkit Listrik turbin gas dengan *Speed droop governor* dan kendali integral

Bila tidak ada perubahan beban acuan $\Delta P_{ref} = 0$ maka model Gambar 10 tersebut dapat disederhanakan menjadi sistem seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11 Model Pembangkit Listrik Gas Turbine generator dengan Speed droop governor + kendali integral, $\Delta P_{ref} = 0$

Fungsi transfer model pembangkit pada Gambar 11 dapat dituliskan pada Persamaan 28 di bawah ini:

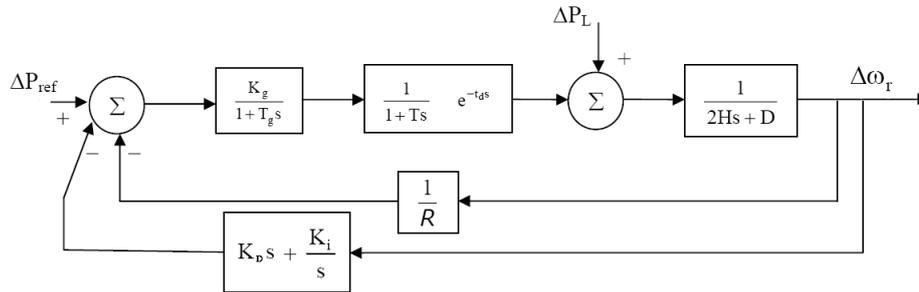
$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P_L} = \frac{s[1 + T_g s][1 + T_s]}{\left(s[2Hs + D][1 + T_g s][1 + T_s] + \frac{s}{R} K_g + K_i K_g \right) e^{-t_d s}} \quad (28)$$

Dari Persamaan (28), dengan memasukkan data parameter pada Lampiran 1 dan karena nilai $T_d \approx 0$ maka diperoleh Persamaan (29):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P_L} &= \frac{s[1 + 0,32s][1 + 0,6s]}{s[2 \times 5s + 1][1 + 0,32s][1 + 0,6s] + 30,6s + 3,186} \\ &= \frac{0,192s^3 + 0,92s^2 + s}{1,92s^4 + 9,392s^3 + 10,92s^2 + 31,65s + 3,186} \end{aligned} \quad (29)$$

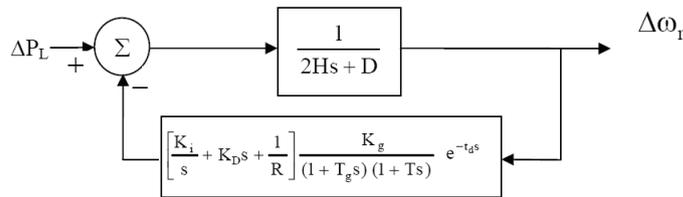
4.3 Model Sistem Kendali Turbin Gas Terisolasi dengan Speed-droop dan Kendali Integral dan Derivatif

Kendali derivatif ditambahkan untuk meningkatkan damping sistem agar osilasi saat transient dapat diturunkan. Gambar 12 menunjukkan blok diagram pembangkit turbin gas dengan speed droop governor dan kendali integral dan derivatif.



Gambar 12 Blok Diagram Pembangkit Listrik turbin gas dengan *Speed droop governor* dan kendali integral dan derivatif

Bila tidak ada perubahan beban acuan $\Delta P_{ref} = 0$ maka model Gambar 12 tersebut dapat disederhanakan menjadi sistem seperti ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13 Blok Diagram Pembangkit Listrik turbin gas dengan *Speed droop governor* dan kendali integral dan derivatif

Fungsi transfer model pembangkit pada Gambar 13 dapat dituliskan pada Persamaan 30 di bawah ini:

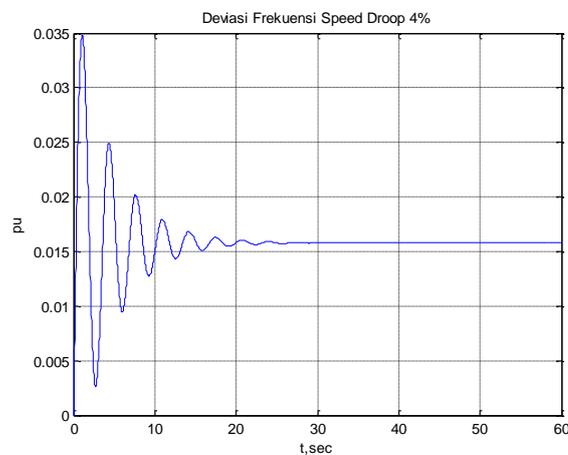
$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P_L} = \frac{s[1 + T_g s][1 + Ts]}{\left(s[2Hs + D][1 + T_g s][1 + Ts] + \frac{s}{R} K_g + K_i K_g + K_g K_D s^2 \right) e^{-tds}} \quad (30)$$

K_D diperoleh secara percobaan/simulasi yang mana K_D adalah nilai terkecil yang menyebabkan osilasi cukup kecil saat transien. Dari percobaan diperoleh nilai $K_D = 9$ sehingga Persamaan 30 dapat ditulis menjadi Persamaan 31 berikut ini:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P_L} &= \frac{s[1+0,32s][1+0,6s]}{s[2 \times 5s+1][1+0,32s][1+0,6s]+30,6s+3,186+11.034s^2} \\ &= \frac{0,192s^3+0,92s^2+s}{1,92s^4+9,392s^3+24,406s^2+31,65s+3,186} \end{aligned} \quad (31)$$

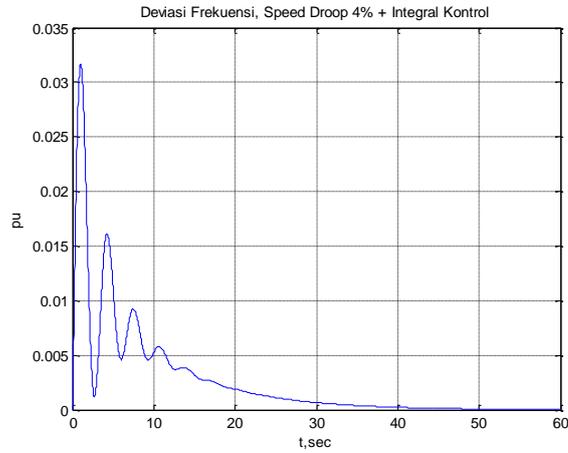
4.4 Hasil Simulasi dan Analisis

Model sistem kendali yang telah dirancang Persamaan (27) disimulasikan dengan perangkat lunak Matlab for Window 2009. Pada simulasi ini beban akan mengalami penurunan sebesar 0,5 p.u. Gambar 14 menunjukkan respons pembangkit akibat perubahan beban.



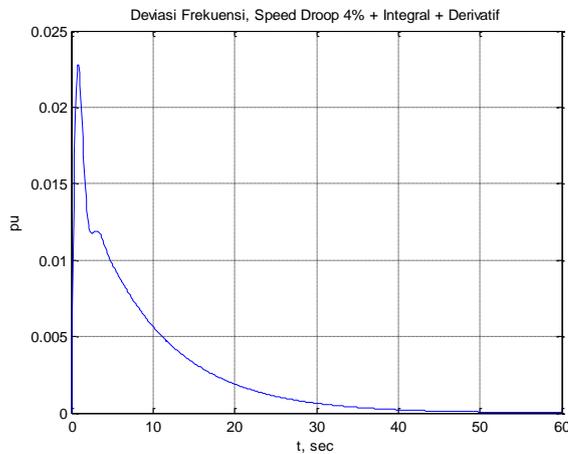
Gambar 14 Respon model terhadap perubahan beban 0,5 p.u

Pada Gambar 14 terlihat bahwa dengan *speed droop governor* frekuensi menuju stabil pada 0.016 pu atau pada daerah kerja frekuensi 50.8 Hz pada 24 second. *Overshoot* tertinggi pada 0,035 p.u. Walaupun respons sistem stabil menuju ke frekuensi 50,8 Hz, namun dari Gambar 14 tampak bahwa sistem berosilasi saat menuju ke frekuensi kesetimbangan. Osilasi seperti ini menunjukkan bahwa sistem memiliki konstanta redaman yang rendah dan umumnya tidak disukai karena dapat membahayakan sistem. Dari hasil simulasi ini menunjukkan bahwa menggunakan governor dengan speed-droop saja belum dapat menghasilkan unjuk kerja yang memuaskan.



Gambar 15 Respon model dengan speed-droop governor dan kendali integral terhadap perubahan beban 0,5 p.u

Gambar 15 menunjukkan respons frekuensi sistem untuk gangguan beban sebesar 0,5 p.u. Overshoot tertinggi pada 0,032 p.u. Penambahan kendali integral mampu membawa frekuensi kesetimbangan ke frekuensi 50 Hz. Walaupun sistem kendali mampu mengembalikan frekuensi keluran kembali ke frekuensi 50 Hz, namun masih terdapat osilasi saat sistem transien menuju ke frekuensi kesetimbangan.



Gambar 16 Respon model dengan speed-droop governor dan kendali integral + drivatif terhadap perubahan beban 0,5 p.u

Gambar 16 menunjukkan respons frekuensi sistem dengan speed-droop governor dan kendali integral + derivatif untuk gangguan beban sebesar 0,5 p.u. Overshoot tertinggi pada 0,023 p.u. Penambahan kendali integral dan derivatif mampu membawa frekuensi keluaran sistem ke frekuensi 50 Hz tanpa osilasi. Pada umumnya sistem pembangkit hanya memiliki sensor frekuensi untuk mengukur frekuensi keluaran sistem. Penambahan kendali derivatif dapat menurunkan osilasi saat transien, tetapi untuk penerapan kendali ini diperlukan sensor tambahan untuk mengukur laju perubahan frekuensi atau estimator untuk mengestimasi laju perubahan frekuensi.

5 Kesimpulan

Pada makalah ini telah dilakukan pemodelan turbin gas dengan speed-droop governor dengan generator yang terhubung dengan sistem bus *infinite isolated power*. Model turbin gas yang dikembangkan menggunakan pendekatan model turbin uap. Dari simulasi sistem kendali frekuensi dapat disimpulkan bahwa untuk perubahan beban sebesar 0,5 p.u. frekuensi sistem akan berubah sebesar 0,035 p.u. untuk speed-droop governor, 0,032 p.u. untuk speed-droop governor dengan kendali integral dan 0,023 p.u. untuk speed-droop governor dan kendali integral + derivatif. Sistem kendali speed-droop governor dengan integral dan derivatif mampu mengembalikan frekuensi keluaran sistem kembali ke frekuensi 50 Hz namun dalam penerapannya memerlukan sensor tambahan atau estimator. Untuk itu perlu dilakukan kajian lebih lanjut untuk melihat kemungkinan penerapan kendali speed-droop governor dan integral + derivatif pada sistem pembangkit daya.

6 Daftar Pustaka

- [1] Rowen, W.I., *Simplified Mathematical Representation of Heavy Duty Gas Turbines*, ASME Journal of Engineering for Power, 105, 1983
- [2] De Mello, F.P. and Ahner, D.J., *Dynamic Models for Combined Cycle Plants in Power System Studies*, IEEE Transactions on Power Systems, 9, 1994
- [3] Hannett, L.N., Jee, G., and Fardanesh, B., *A Governor / Turbine Model for a Twin Shaft Combustion Turbine*, IEEE Transactions on Power Systems, 10, 1995
- [4] Hannett, L.N. and Khan, A., *Combustion Turbine Dynamic Model Validation Tests*, IEEE Transactions on Power Systems, 8, 1993
- [5] Jurado, F., Ortega, M., Cano, A., and Caripo, J., *Neuro-Fuzzy Controller for Gas Turbine in Biomass-Based Electric Power Plant*, Electric Power System Research, 60, 2002

- [6] Jurado, F., Cano, A., and Caripo, J., *Biomass Based Micro-Turbine Plant and Distribution Network Stability*, Energy Conversion and Management, 45, 2004
- [7] Guda, S.R., Wang, C., and Nehrir, M.H., *Modeling of Microturbine Power Generation Systems*, Electric Power Components and Systems, 34, 2006
- [8] Balamurugan, S., Xavier, R.J., and Jeyakumar, A.E., *Simulation of Response of Gas Turbine Plant with Controllers*, Proceedings of National System Conference, Manipal, India, 2007
- [9] Balamurugan, S. and Xavier, R.J., *Selection of Governor for Heavy Duty Gas Turbine Power Plant*, National Conference on Modern trends in Electrical and Instrumentation Systems, Coimbatore, India, 2005
- [10] Balamurugan, S., Xavier, R.J., and Jeyakumar, A.E., *Selection of Governor and Optimization of its Droop Setting and Rotor Time Constant for Heavy Duty Gas Turbine Plants*, Indian Journal of Power and River Valley Development, 57, 2007
- [11] Mantzaris, J. and Vournas, C., *Modeling and Stability of a Single-Shaft Combined Cycle Power Plant*, Int. J. of Thermodynamics, Vol.10(2), 2007
- [12] De Mello, F.P. and Ahner, D.J., *Dynamic models for combined cycle plants in power system studies*, IEEE Trans. Power Syst., Vol.9, 1994
- [13] Kakimoto, N. and Baba, K., *Performance of Gas Turbine-Based Plants During Frequency Drops*, IEEE Trans. on Power Syst., Vol.18(3), 2003
- [14] Kundur, P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Inc., 1994

LAMPIRAN I
DATA PARAMETER MESIN GAS TURBIN-GENERATOR
GT 13E1 PLTGU PRIOK

No.	Nama Parameter	Simbol	Nilai	Besaran
1	Penguatan Kecepatan Governor	K_g	1.226	pu
2	Konstanta Waktu governor	T_g	0.32	s
3	Pengaturan kecepatan governor	R	0.04	s
4	Gain Integral KI	K_I	2.56	
5	Waktu tanggap dalam gas Turbine	T	0.6	s
6	Time lag kondisi steady di Combustor	T_d	≈ 0	s
7	Deviasi Beban GT 1.2 tgl 17 maret 2009 kenaikan dari 84.88 MW ke 127.37 MW	ΔP_L	0.5	p.u.
8	Konstanta Inertia Generator	H	5	sec
9	Damping pembebanan (load damping)	D	1	pu
10	Frekuensi Nominal	F	50	Hz