

Identifikasi Model Sistem Hidraulik Kendali Tekanan pada Suplai Bahan Bakar Turbin Gas

Sihana¹, Faridah², Izzad Abidiy³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik UGM
Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA

¹sihana@ugm.ac.id

³faridah@ugm.ac.id

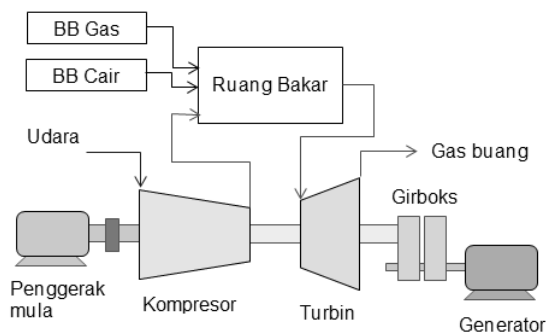
³izzadabidiy@gmail.com

Intisari— Sistem kendali suplai bahan bakar gas dalam suatu turbin gas dirancang dengan dua katub terhubung seri, yaitu katub stop-rasio (VSR) dan katub kendali gas (VGC). Kedua katub diaktifkan dengan sistem aktuator hidrolik. Katub VGC berfungsi untuk mengendalikan laju aliran bahan bakar ke dalam ruang bakar, sedangkan tekanan gas umpan dikendalikan dengan VSR dengan tujuan agar selalu sesuai dengan tekanan udara keluaran dari kompresor. Identifikasi dinamika suatu sistem pada turbin gas dapat dilakukan untuk mendapatkan parameter sistem dinamik, yang merupakan dasar dalam desain sistem kendali. Identifikasi sistem hidraulik kendali tekanan pada turbin gas dapat dilakukan berdasarkan variabel input laju putaran poros dan variabel output posisi katub suplai bahan bakar. Metode identifikasi dengan ARX dan ARMAX orde 3 akan dibandingkan dalam penelitian ini untuk identifikasi sistem hidraulik pada kendali tekanan suplai bahan bakar gas dengan menggunakan software SCILAB. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa pendekatan model linear untuk sistem hidraulik pada kendali tekanan suplai bahan bakar turbin gas telah memiliki kinerja yang cukup baik. Identifikasi dengan metode ARMAX menghasilkan kualitas kesesuaian 0,9618, sedangkan pendekatan metode ARX menghasilkan nilai kualitas kesesuaian yang lebih rendah. Hasil identifikasi dengan model ARMAX orde 3 menunjukkan adanya komponen fungsi transfer PI dengan gain 0,050 dan periode 3,125 detik sebelum sinyal diteruskan kepada aktuator.

Kata kunci— aktuator hidrolik, identifikasi, katub kendali, scilab, startup.

I. PENDAHULUAN

Turbin gas banyak digunakan dalam industri, baik sebagai mesin pendorong (propulsi) maupun penggerak mekanik misalnya dikopel dengan generator sebagai pembangkit daya listrik. Aplikasi turbin gas dalam pembangkitan daya listrik memiliki keuntungan yaitu waktu durasi *startup* yang pendek. Komponen utama turbin gas sebagai pembangkit daya listrik terdiri dari sistem penyalur udara umpan, sistem penyalur bahan bakar, kompresor, ruang pembakaran, turbin, penggerak mula, generator, girboks, dan bagian gas buang. Kompresor dan turbin gas biasanya dikopel dalam poros tunggal seperti tampak pada Gambar 1.

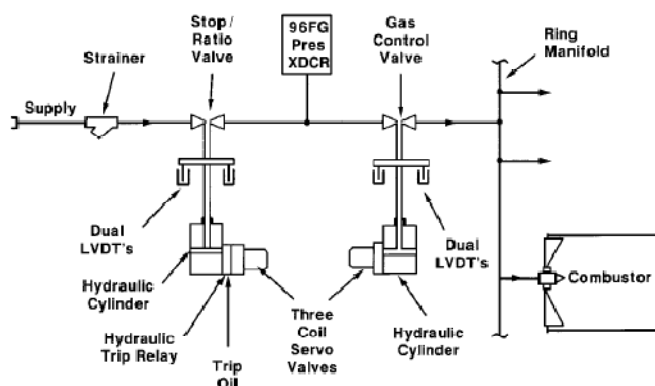


Gambar 1. Sketsa rangkaian komponen dalam turbin gas

Penggerak mula berfungsi sebagai pemutar awal saat operasi awal (*startup*). Turbin dikopel dengan generator untuk

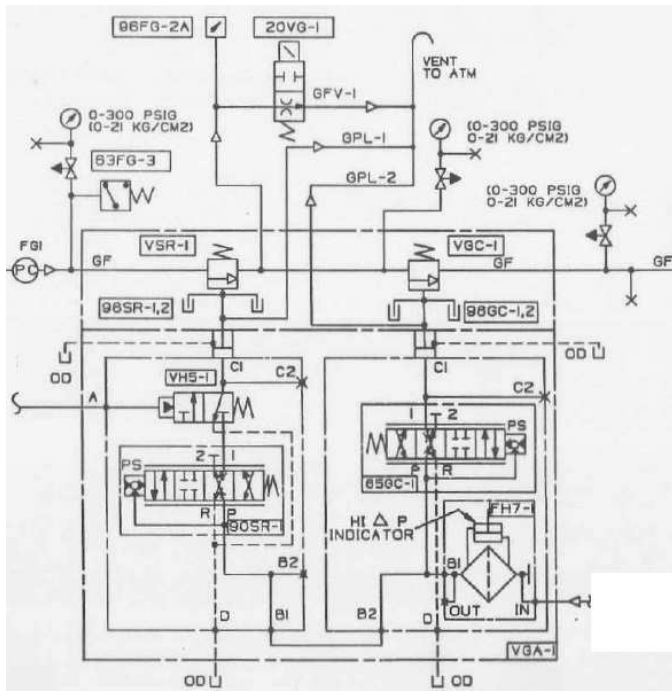
menghasilkan listrik yang dilengkapi dengan komponen transmisi.

Turbin gas biasanya dirancang agar dapat dioperasikan dengan opsi bahan bakar ganda, bahan bakar cair atau bahan bakar gas. Pengendalian operasi turbin gas dilakukan dengan pengaturan laju suplai aliran bahan bakar, yang dilakukan dengan dua katub kendali SRV dan GCV, seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Sketsa sistem kendali suplai bahan bakar gas [1]

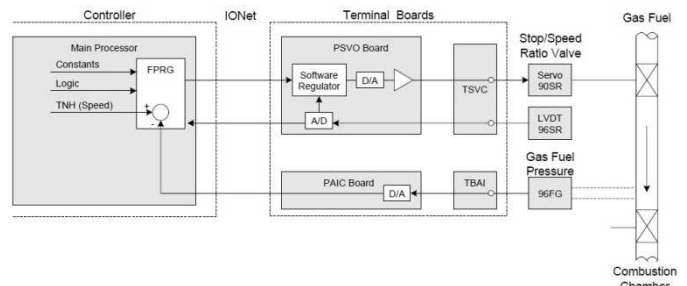
Katub SRV difungsikan untuk pengendalian tekanan agar sebanding dengan laju putaran, dan katub GCV difungsikan untuk mengendalikan laju suplai bahan bakar menuju ruang bakar sesuai daya yang ditetapkan. Rangkaian aktuator hidrolik untuk katub kendali dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Sketsa P&ID sistem suplai bahan bakar turbin gas [2]

Sistem suplai bahan bakar gas (GFS) dikendalikan dalam dua tingkatan, yaitu pengendalian tekanan gas sebelum masuk ke dalam ruang bakar yang dikendalikan sebanding dengan laju putaran poros dan pengendalian laju aliran suplai gas berdasarkan daya turbin yang diinginkan. Kedua tingkatan pengendalian dilakukan dengan menggunakan dua katub kendali yaitu katub stop-rasio (VSR-1) dan katub kendali gas (VGC-1) seperti terlihat pada sketsa Gambar 3. Katub VSR-1 berperan untuk menjaga tekanan diantara kedua katub sesuai dengan level daya dan laju putaran turbin serta sebagai katub pemutus (stop). Tekanan gas yang dikendalikan tersebut menjadi penting guna menjaga agar tekanan suplai gas masuk ke ruang bakar tidak lebih rendah dari tekanan udara keluaran kompresor. Aplikasi kendali tekanan suplai gas sangat bermanfaat agar turbin gas dapat dioperasikan relatif tidak tergantung pada variasi tekanan gas suplai dari jaringan dan tekanan lebih dapat disesuaikan dengan rasio tekanan kompresor turbin sehingga memebrikan rentang operasi yang lebih lebar [8].

Pengaturan katub bahan bakar merupakan hal yang kompleks. Pembukaan katub yang terlalu cepat dapat menyebabkan kenaikan suhu dan tekanan dalam ruang bakar dan dapat menyebabkan kerusakan sudu turbin akibat panas berlebih. Sedangkan kenaikan tekanan dalam ruang bakar yang terlalu cepat dapat pula menyebabkan aliran balik dan dapat merusak kompresor. Prinsip kerja dari sistem kendali tekanan (Gambar 3) dapat dijelaskan dengan sketsa kendali Gambar 4 pada bagian yang dibatasi garis putus-putus.



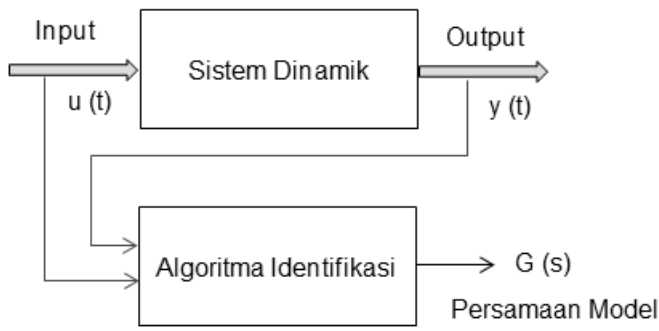
Gambar 4. Sistem kendali tekanan [3]

Sinyal umpan balik berupa nilai tekanan yang diukur secara redundan oleh sensor 96FG. Variabel input yang berupa laju putaran poros dikonversi secara linear menjadi sinyal FPRG. Kemudian kartu kontrol TCQC akan mengolah data input dan umpan balik menjadi sinyal yang akan diteruskan kepada aktuatur hidrolis 90SR.

Identifikasi sistem adalah suatu cara untuk mendapatkan persamaan model dinamis dari suatu sistem dengan memanfaatkan data hasil eksperimen pada sistem tersebut. Identifikasi kendali turbin gas dapat dilakukan untuk mendapatkan model sistem dinamik, yang merupakan dasar dalam desain sistem kendali yang akan digunakan. Identifikasi sistem kendali suplai bahan bakar gas dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan pendekatan model SISO dengan variabel input berupa laju putaran poros dan variabel output tekanan suplai bahan bakar.

II. TEKNIK IDENTIFIKASI SISTEM DINAMIK

Teknik identifikasi sistem dinamik merupakan cara mendapatkan parameter model persamaan dinamik sistem berdasarkan data pengukuran variabel input dan output sistem. Teknik identifikasi sistem dapat dibedakan antara metode parametris dan metode non-parametris. Metode parametris didasarkan pada model persamaan dengan parameter yang sudah tertentu misalnya dalam bentuk persamaan diferensial atau persamaan fungsi transfer. Sedangkan metode non-parametris didasarkan pada persamaan model tanpa parameter yang tertentu yang akan diperoleh dari kurva karakteristik yang merupakan relasi dari antara variabel input dan output. Proses identifikasi non-parametris diawali dengan menetapkan persamaan model awal yang didasarkan pada hubungan data output dan input sistem. Penetapan model awal dilakukan dengan menggunakan algoritma tertentu misalnya ARX (*AutoRegressive eXogenous*), ARMAX (*Auto-Regressive Moving Average with eXogenous input*) dsb. Parameter model ditentukan dari relasi input-output dan dengan pendekatan regresi berdasarkan nilai kesalahan yang paling kecil. Prinsip kerja teknik identifikasi sistem secara umum dapat dijelaskan dengan Gambar 4.



Gambar 4. Teknik identifikasi sistem dinamik

Variabel input sistem kendali tekanan suplai bahan bakar gas dalam hal ini adalah laju putaran turbin dan output merupakan tekanan suplai gas. Identifikasi sistem turbin gas dapat dilakukan dengan menggunakan teknik indentifikasi dalam domain waktu dan teknik domain frekuensi [5]. Teknik identifikasi domain waktu untuk pendekatan sistem linear dapat dilakukan cara regresi untuk mencari paramater persamaan diferensial sistem ataupun parameter model persamaan multi sinusoidal. Termasuk dalam kategori teknik identifikasi domain waktu misalnya metode ARMAX. Teknik identifikasi domain frekuensi pendekatan sistem linear dapat dilakukan dengan cara regresi persamaan fungsi transfer dan menentukan parameter koefisien komponen nul dan pole [6]. Sedangkan teknik regresi yang digunakan didasarkan pada metode akar kuadrat kesalahan terkecil. Teknik identifikasi lain yang umumnya diterapkan untuk sistem nonlinear misalnya metode algoritma genetik, metode neural network dsb.

Metode identifikasi dengan ARX dan ARMAX akan dibandingkan dalam penelitian ini untuk identifikasi sistem kendali tekanan suplai bahan bakar gas dengan menggunakan tools untuk SCILAB [8]. Variabel input sistem $u(t)$ adalah laju putaran poros turbin, dan variabel output adalah tekanan suplai gas.

A. Metode Auto-Regressive

Sistem dinamik secara umum dapat dimodelkan dengan menggunakan persamaan deret domain waktu seperti pada persamaan (1), yang menyatakan relasi antara variabel input $u(t)$ exogenous (ekstra atau yang diketahui) dan output $y(t)$,

$$y_t = -\sum_{i=1}^n A_i y_{t-i} + \sum_{i=0}^m B_i u_{t-i} + C e_t \quad (1)$$

dengan e_t merupakan nilai rerata gangguan (noise) yang diasumsikan sebagai "white Gaussian noise". Parameter sistem atau koefisien A, B dan C dapat ditentukan dengan proses perhitungan regresi berdasarkan rerata bergerak kuadrat kesalahan terkecil.

B. Metode ARMAX

Sistem dimodelkan dalam teknik ARMAX memiliki bentuk persamaan yang tersusun dari variabel input dan variabel output seperti pada persamaan (2).

$$y_t = -\sum_{i=1}^n A_i y_{t-i} + \sum_{i=0}^m B_i u_{t-i} + \sum_{i=0}^p C_i e_{t-i} \quad (2)$$

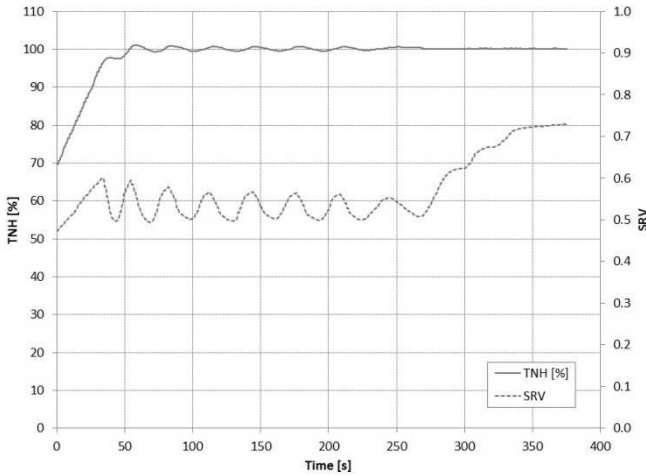
Jika nilai $p = 0$ maka persamaan akan serupa bentuk model ARX. Parameter sistem A, B dan C seperti halnya pada model ARX dapat ditentukan dengan proses perhitungan regresi rerata bergerak kuadrat kesalahan terkecil. Model ARX dan ARMAX dalam penelitian ini dibatasi pada model orde 3 yang mendekati dengan model sistem aktuator hidrolik yang dikopel dengan fungsi transfer PI pada sinyal masukan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Sistem hidrolik pada kendali tekanan suplai bahan bakar gas pada turbin gas yang diproduksi oleh General Electric (GE) dengan tipe MS5001LA [4] adalah objek yang menjadi kajian dalam penelitian ini. Sistem turbin memiliki poros tunggal, yang menghubungkan turbin, kompresor dan penggerak mula serupa seperti tampak pada Gambar 1. Sesuai spesifikasi, turbin gas dioperasikan dengan laju putaran keadaan steady 5100 rpm dan daya nominal 15,25 MWe. Kontrol tekanan suplai gas dioperasikan dengan aktuator hidrolik dan menggunakan sinyal umpan balik laju putaran turbin dan tekanan antar kedua katub VSR dan VGC yang diukur dengan transduser tekanan. Loop kontrol tekanan tersebut menghasilkan sinyal untuk posisi dari SRV untuk menyediakan tekanan antar katub yang diperlukan.

Langkah identifikasi model sistem diawali dengan pengolahan data operasi *startup* turbin gas. Operasi *startup* diawali dengan melakukan putaran awal turbin dengan menggunakan pemutar awal sampai mencapai laju putaran separoh dari normal yaitu sekitar 1250 rpm. Proses pengendalian putaran tanpa beban dimulai proses ignisi pada ruang bakar dan pemberian sinyal stelan laju putaran secara ramp tahap pertama sampai mencapai 3000 rpm dan dilanjutkan dengan kenaikan secara ramp tahap kedua sampai mencapai dengan laju putaran normal 5100 rpm. Sedangkan koneksi beban dilakukan ketika laju putaran sudah stabil yaitu pada waktu 260 detik. Perilaku respon sistem pada kenaikan ramp tahap kedua sampai dengan koneksi beban dapat dilihat pada Gambar 5.

Sinyal input yang diumpankan ke dalam sistem kendali tekanan dihitung dari selisih antara tekanan gas yang terbaca pada sensor (P2) dan tekanan setelan sebanding dengan laju putaran turbin dengan nilai OFFSET (0,) dan GAIN (1,75) hasil dari kalibrasi turbin.



Gambar 5. Alur sinyal laju putaran (TNH) dan posisi SRV [4]

Sistem hidrolik memiliki sifat dasar yang tidak linear, sehingga dalam identifikasi model diperlukan langkah-langkah pendekatan simplifikasi. Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan awal heuristik berdasarkan simplifikasi model ARX dan ARMAX.

Bentuk umum persamaan ARMAX dapat dituliskan dengan vektor koefisien A, B, dan C seperti persamaan (3).

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t) \tag{3}$$

dengan parameter koefisien,

$$A(q) = 1 + a_1q^1 + \dots + a_naq^{na} \tag{4}$$

$$B(q) = b_0q^{nk} + b_1q^{1+nk} + \dots + b_nbq^{nb+nk} \tag{5}$$

$$C(q) = 1 + c_1q^1 + \dots + c_ncc^{nc} \tag{6}$$

Keadaan khusus dengan $nc = 0$ pada persamaan (3) dan (4) berlaku untuk model ARX. Bentuk formulasi dalam SCILAB untuk fungsi ARX seperti persamaan (7).

$$[a, b, c, vare] = arx(y, u, na, nb, nk) \tag{7}$$

dengan vektor output (y), vektor input (u), jumlah pole (na), jumlah zeros (nb), dan koefisien noise (nc) seperti ditampilkan pada persamaan (4), (5) dan (6). Sedangkan bentuk formulasi untuk ARMAX seperti persamaan (8).

$$[a, b, c, vare] = armax(y, u, na, nb, nc, nk) \tag{8}$$

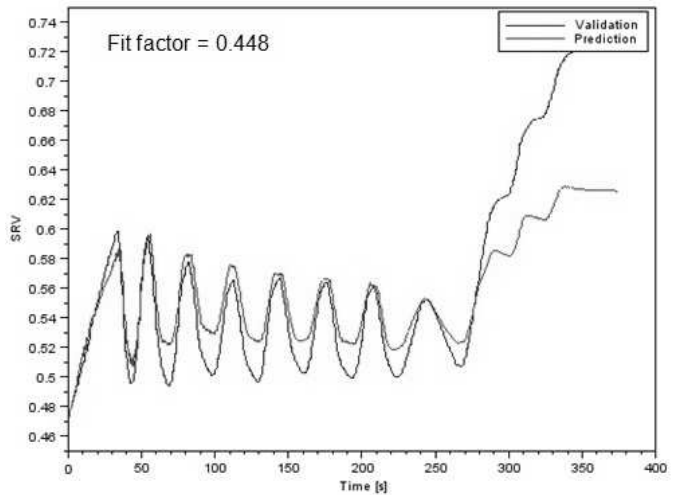
dengan nc ukuran vektor koefisien noise dan nk waktu tunda input output.

Data untuk estimasi parameter dipilih sebagian dari $t = 50$ detik sampai $t = 150$ detik. Penentuan parameter sistem tersebut dilakukan dengan metode rerata akar keasalahan terkecil (Least Mean Square Root). Perhitungan model dilakukan dengan software Scilab yang merupakan *free*

software [7]. Hasil identifikasi diverifikasi dengan menggunakan data operasi sistem turbin gas sejak *startup* saat operasi ramp ($t = 0 - 250$ detik). Sedangkan kualitas hasil identifikasi ditentukan berdasarkan pada nilai kualitas (*best fit*) dari hasil regresi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

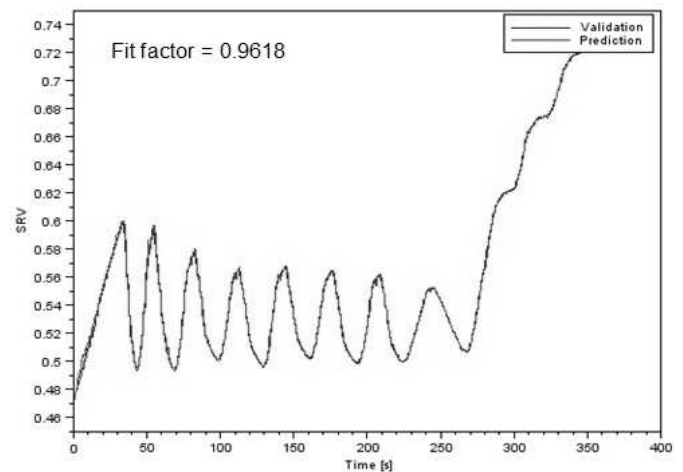
Hasil identifikasi sistem dengan ARX untuk jumlah pole $na = 3$, jumlah zeros 2 ($nb = 3$), jumlah koefisien noise $nk = 2$ dapat ditampilkan perbandingan validasi dan prediski seperti tampak pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil identifikasi dengan model ARX

Hasil identifikasi dengan ARX tidak memberikan kualitas yang baik dengan nilai fit factor yang rendah (0,448) lebih rendah dari 0,8 yang ditargetkan. Hal tersebut juga tampak dari perbedaan perilaku seperti pada Gambar 6.

Hasil identifikasi dengan ARMAX untuk jumlah pole $na = 3$, jumlah zeros 2 ($nb = 3$), jumlah koefisien noise $nc = 2$ dan jumlah waktu tunda $nk = 1$ dapat ditampilkan perbandingan antara hasil validasi dan prediski seperti tampak pada Gambar 7.



Gambar 7. Hasil uji model ARMAX

Sedangkan nilai faktor kualitas (*fit factor*) adalah 0,9618 yang menggambarkan tingkat kesesuaian yang sangat bagus. Hal tersebut menjelaskan bahwa pendekatan model linear untuk identifikasi sistem kendali tekanan turbin gas menjadi sederhana dalam metode ARMAX.

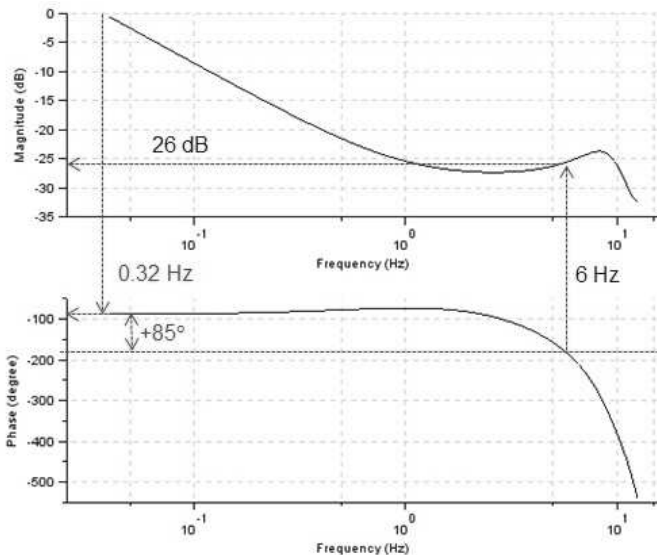
Persamaan fungsi transfer sistem hasil identifikasi dengan model ARMAX orde 3 diperoleh dalam bentuk persamaan (9.a), dan transformasi menjadi bentuk kontinyu (dengan $z = 1 + sT_s$) diperoleh persamaan (9.b).

$$G_0(z) = \frac{0,034z^2 + 0,023z - 0,039}{z^4 - 0,307z^3 - 0,3984z^2 - 0,294z} \quad (9.a)$$

$$G_0(s) = \frac{0,019s^2 + 0,069s + 0,018}{0,316s^4 + 1,557s^3 + 1,507s^2 + 1,490s + 0,0002} \quad (9.b)$$

Adanya perbedaan yang menyolok antara hasil identifikasi dengan ARX dan ARMAX menunjukkan bahwa pengaruh komponen noise yang terjadi dalam sistem tidak dapat diabaikan seperti halnya ditunjukkan juga dalam penelitian McGraw, Gustafson dan Gillis [9].

Bentuk tampilan dalam diagram Bode dari persamaan model hasil identifikasi dengan ARMAX orde 3 dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Diagram Bode hasil identifikasi dengan ARMAX

Atas dasar diagram Bode, tampak bahwa frekuensi kritis terletak pada 6 Hz dan margin gain sebesar -26 dB (atau 0,050). Sudut fase diperoleh 85°. Nilai gain pada frekuensi rendah

adalah -25 dB (0,056), yaitu nilai penguatan pada frekuensi 1 Hz. Tampilan diagram Bode dapat menjelaskan adanya komponen PI pada sistem sesuai dengan fungsi transfer dari sinyal setelan sebelum diteruskan menjadi masukan pada sistem aktuator hidrolis, dengan nilai gain sebesar 0,050 dan nilai periode integrator $T = 3,125$ detik.

V. KESIMPULAN

Pendekatan model linear untuk sistem hidraulik kendali tekanan suplai bahan bakar turbin gas telah memiliki kinerja yang cukup baik pada penggunaan metode ARMAX dengan kualitas kesesuaian 0,9168 sedangkan pendekatan metode ARX menghasilkan nilai kualitas kesesuaian jauh lebih rendah 0,448. Hasil identifikasi dengan model ARMAX orde 3 menunjukkan adanya komponen fungsi transfer PI dengan nilai gain 0,050 dan $T = 3,125$ detik sebelum sinyal diteruskan kepada aktuator diteruskan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih disampaikan kepada Jurusan Teknik Fisika FT-UGM atas segala dukungan yang diberikan, sehingga penelitian mandiri ini dapat diselesaikan dengan baik

REFERENSI

- [1] Johson, D., Miller, R. W., and Ashley, T., Speedtronic Mark V Gas Turbine Control System, GE Company, 1996.
- [2] GE, Diagram Schem. PP-Fuel Gas, General Electric, 1992.
- [3] GE Energy, Mark VIe for Gas Turbine Control Retrofits Application, General Electric Company, USA, 2004.
- [4] Izzad Abidiy, Identifikasi Sistem Kendali PID Stop/Speed Ratio Valve pada Suplai Gas Bahan Bakar Turbin Gas GE MS5001LA, Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, 2012.
- [5] Boaghe, O.M., Billings, S. A., Li, L. M., Fleming, P. J. and Liu, J., Time and frequency domain identification and analysis of a gas turbine engine, Control Engineering Practice 10, page 1347-1356, 2002.
- [6] Evans, C., Rees, D., and Borrell, A., Identification of aircraft gas turbine dynamics using frequency-domain techniques, Control Engineering Practice 8, page 457-467, 2000.
- [7] Martin Novotný, Tools for identification of dynamical systems, Department of Control Engineering, CTU Prague.
- [8] Gallagher, B., Eluripati, R. P. S., Thatcher, J. C., Childer, P., and Sweet, B. E., Pressure control method and system reduce gas turbine fuel supply pressure requirements, US patent No US2009/0241510A1, 2009.
- [9] McGraw, G. A., Gustafson, C. L., dan Gillis, J. T., Conditions for the equivalence of ARMAX and ARX systems, Technical research report, University of Maryland, 1991.