

IMPLEMENTASI DYNAMIC MATRIX CONTROL UNTUK PENGENDALI LEVEL AIR PADA PEMBANGKIT UAP REAKTOR PWR 1000 MWe

Yoyok Dwi Setyo P., Djen Djen Djainal, Muhammad Subekti

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310

E-mail: yoyok.pambudi@yahoo.com

ABSTRAK

IMPLEMENTASI DYNAMIC MATRIX CONTROL UNTUK PENGENDALI LEVEL AIR PADA PEMBANGKIT UAP REAKTOR PWR 1000 MWe. Telah dibuat sistem pengendali steam generator pada reaktor PWR. Sistem ini bertujuan untuk mengendalikan level air pada steam generator terutama pada daya rendah karena pada kondisi ini efek non-minimum fase muncul secara signifikan dan mempengaruhi pengendalian. Fungsi alih steam generator lebih dahulu di analisa dengan menggunakan metode root locus. Sistem kendali prediktif DMC (*Dynamic Matrix Control*) disusun dengan membuat prediction horizon dan menyusun matriks dinamik sistem. Pengendali prediktif DMC dibuat dengan program Matlab. Sebagai pembandingan dibuat pengendali PID dengan memakai simulink. Penalaan PID digunakan korelasi Ciancone. Hasil eksekusi menunjukkan bahwa pengendali DMC dengan nilai horizon tertentu mampu mengendalikan system dan mengatasi non efek minimum fase, sementara pengendali PID tidak mampu mengatasi efek non minimum fase.

Kata kunci: simulasi, PID, prediktif

ABSTRACT

IMPLEMENTATION OF DYNAMIC MATRIX CONTROL FOR WATER LEVEL CONTROL IN STEAM GENERATOR OF PWR 1000 MWe PWR REACTOR. Automatic control systems at the reactor PWR steam generators has been developed. This system aims to control the water level in the steam generator at low power, especially in this condition non-minimum phase effects appeared significantly and affect control. At first, steam generator transfer function was analyzed using root locus method. DMC (*Dynamic Matrix Control*) predictive control system is arranged to make a prediction horizon and develop a dynamic matrix system. DMC predictive controller is made with the program Matlab. As a comparison is made with a PID controller using simulink. PID tuning use Ciancone correlation. The results indicate that the DMC controller with certain horizon value is able to control the system and overcome the effects of non minimum phase, while the PID controllers are not able to overcome the effects of non-minimum phase.

Keywords: simulation, PID, predictive

1. PENDAHULUAN

Dalam usaha untuk mendukung keamanan ketersediaan energi 2025, maka pemerintah membuat kebijakan untuk melaksanakan penelitian dan pengembangan PLTN^[1]. Untuk mendukung penguasaan teknologi PLTN di Indonesia maka perlu dilakukan penelitian terhadap teknologi PLTN terutama terhadap tipe PLTN yang akan dibangun di Indonesia seperti PWR.

Steam generator adalah salah satu komponen penting dalam PLTN. *Steam generator* berfungsi membangkitkan uap yang berasal dari air umpan untuk selanjutnya disalurkan ke turbin.

Dalam operasinya level air di steam generator harus dipertahankan untuk meyakinkan bahwa produksi uap berlangsung baik dan selamat. Jika level air terlalu rendah maka pipa penukar panas tidak terendam air, mengakibatkan panas dari bagian primer tidak berpindah sempurna ke bagian sekunder sehingga bagian primer akan kelebihan panas dan mengakibatkan reaktor *trip* (padam). Sedangkan jika level air terlalu tinggi maka akan menyebabkan berlebihnya campuran air

uap yang terbawa sehingga dapat merusak turbin^[2]. Level air pada dari steam generator di kendalikan oleh pengaturan katup air umpan pada pipa utama.

Level air pada pembangkit uap PLTN harus benar-benar dikontrol untuk menjaga agar air pendingin yang cukup memadai untuk memindahkan panas primer dan untuk mencegah kerusakan bilah turbin. Meskipun sebagian besar PLTN biasanya dioperasikan 100% daya (untuk beban dasar), terkadang pada saat *startup* ataupun saat ada masalah pada reaktor tersebut, maka pembangkit nuklir akan dioperasikan pada daya rendah. Oleh karena itu pengendali level air harus bisa^[3] mengatasi masalah pengendalian pada daya rendah.

Kinerja tidak memadai dan kurang dari pengendali konvensional untuk mengendalikan level air pada steam generator tersebut seringkali mengakibatkan reaktor *trip*, sehingga terpaksa operator PLTN perlu menjalankan secara manual saat operasi daya rendah tersebut^[2].

Selain itu, efek fase nonminimum secara signifikan lebih besar pada daya rendah, yang membuat pengendalian lebih sulit dan lebih lama bahkan bagi operator terampil. Efek nonminimum fase pada steam generator adalah berupa riak naik turunnya ketinggian air pada tangki steam generator^[4].

Tujuan pada penelitian ini adalah mengembangkan sistem kendali yang mampu mengendalikan steam generator reaktor PWR terutama pada kondisi daya rendah.

2. MODEL PREDICTIVE CONTROL

Model Predictive Control (MPC) merupakan metode pengendali tingkat lanjut yang mempunyai pengaruh yang sangat besar dalam bidang teknik kontrol industri.

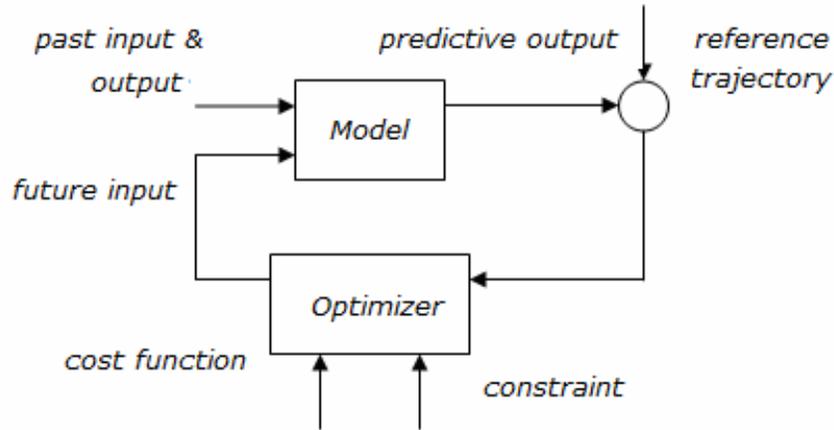
MPC termasuk kedalam kategori metode pengendali berbasis model proses, yaitu model proses digunakan secara eksplisit untuk merancang pengendali. Dalam perkembangannya sendiri, MPC menghasilkan banyak metode pengendalian. Tiga teknik MPC yang banyak dipakai dalam industri adalah *Dynamic Matrix Control* (DMC), *Model Algorithmic Control* (MAC) dan *Generalized Predictive Control* (GPC). Metode DMC dan MAC menggunakan model *non-parametric* karena berbasiskan pada respon model terhadap masukan step atau impuls^[5].

Pada awalnya pengendali DMC dan MAC banyak diaplikasikan dalam industri petrokimia, namun kini penggunaannya berkembang ke semua bidang proses industri.

Ide yang mendasari pengendali prediktif adalah:

1. Penggunaan model proses secara eksplisit untuk memprediksi keluaran proses yang akan datang dalam rentang waktu tertentu (horizon)
2. Perhitungan rangkaian sinyal kendali dilakukan dengan cara meminimasi suatu fungsi kriteria
3. *Receding horizon* (strategi surut): pada setiap waktu pencuplikan (t), horizon dipindahkan menuju waktu pencuplikan berikutnya ($t+1$) dengan melibatkan sinyal kendali pertama $u(t)$ untuk mengendalikan proses. Selanjutnya kedua proses di atas diulang dengan menggunakan informasi terakhir.

Metodologi pengendali prediktif ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok diagram kendali prediktif

Metode MPC mempunyai kelebihan sbb:

1. Mampu menangani masalah kendali sistem multivariabel.
2. Mudah untuk diimplementasikan ke pengendali
3. Dapat digunakan untuk mengendalikan proses yang sederhana hingga yang kompleks.
4. Mempunyai kompensasi terhadap waktu tunda.

2.1 PREDIKTIF DYNAMIC MATRIX CONTROL (DMC)

DMC dikembangkan pada akhir dekade 70an oleh Cultler dan Ramaker yang bekerja pada Shell Company dan diterima secara luas di industri terutama proses petrokimia^[6].

Model proses yang digunakan teknik kendali ini adalah respon proses terhadap masukan berupa fungsi step, dengan mengamsusikan gangguan bernilai tetap tetap selama control horizon. Persamaan keluaran proses adalah:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g \Delta u(t-i) \quad (1)$$

dengan:

$y(t)$ = keluaran

g = gain

$u(t)$ = masukan

Nilai keluaran terprediksi selama horizon k tersebut adalah:

$$\begin{aligned} y(t+k|t) &= \sum_{i=1}^{\infty} g \Delta u(t-i) + r(t+k|t) \\ &= \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + \hat{r}(t+k|t) \end{aligned} \quad (2)$$

Maka persamaan keluaran prediksi diatas dapat ditulis menjadi:

$$y(t+k|t) = \sum_{i=1}^{\infty} g \Delta u(t-i) + \sum_{i=1}^k g \Delta u(t+k-i) + y_m(t) - \sum_{i=1}^{\infty} g \Delta u(t+k-i) + f(t+k) \quad (3)$$

Dengan $f(t+k)$ adalah respon bebas sistem yaitu bagian dari respon yang tidak bergantung kepada aksi kendali yang akan datang. Bentuk persamaannya adalah:

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^{\infty} (g_{k+1} - g_i) \Delta u(t-1) \quad (4)$$

Jika proses adalah stabil asimptot maka koefisien g_i dari respon sistem akan menuju ke suatu harga yang tidak berubah setelah N periode pencuplikan. Dengan demikian dapat diperhitungkan bahwa tidak terdapat perbedaan nilai antara dua buah nilai koefisien g_i setelah N periode pencuplikan.

$$\sum_{i=1}^{\infty} g_{k+1} - g_i \approx 0 \quad i > N \quad (5)$$

Dengan demikian respon bebas dapat dihitung sebagai:

$$f(t+k|t) = y_m(t) + \sum_{i=1}^{\infty} (g_{k+1} - g_i) \Delta u(t-1) \quad (6)$$

Dengan mendefinisikan matrik dinamik sistem G sebagai:

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ g_2 & g_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_m & g_{m-1} & \cdots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_p & g_{p-1} & \cdots & g_{p-m+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Maka sejumlah N keluaran proses terprediksi y dapat didefinisikan sebagai:

$$\hat{y} = \underline{G}u + f \quad (8)$$

dengan:

\hat{y} = vektor dimensi p

u = vektor kendali m dari kendali integrator

f = vektor bebas sistem

m = banyaknya aksi kendali

p = prediction horizon

Tujuan dari pengendali DMC adalah untuk menuntun keluaran proses mendekati sinyal acuan didalam kerangka kuadrat-terkecil, yaitu kesalahan kuadrat antara keluaran proses dengan sinyal acuan adalah minimum. Dengan demikian variabel termanipulasi ditentukan sedemikian untuk meminimumkan suatu fungsi kuadratik. Persamaan untuk sinyal kendali.

$$u = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (w - f) \quad (9)$$

3. PENERAPAN PENGENDALI PADA STEAM GENERATOR.

Simulasi numerik dilakukan untuk mempelajari kinerja dari algoritma yang diusulkan. Dinamika stem generator sebagai input (debit air umpan), Output (level air), dan gangguan terukur (laju aliran uap). Berdasarkan *step respon* dari level air steam generator dari air umpan Irving^[7] menurunkan fungsi Laplace untuk steam generator:

$$Y(s) = \frac{G_2 s + G_1}{s^2 + Ts + \tau} U(s) \quad (10)$$

dimana:

Y = output (level air);

U = control input (*feedwater flowrate*);

s = variabel Laplace

G₁ = besarnya kapasitas massa

G₂ = besarnya riakan atau susutan akibat air umpan aliran uap;

T = periode osilasi mekanik

τ = kontanta waktu peredaman

Untuk operasi daya rendah yaitu dibawah 30 % daya total, maka Irving memberikan parameter G₂= -1,946 G₁=7,953 T=4,605 dan τ =5,302. Sehingga persamaan di atas menjadi:

$$Y(s) = \frac{-1,946s + 7,953}{s^2 + 4,605s + 5,302} U(s) \quad (11)$$

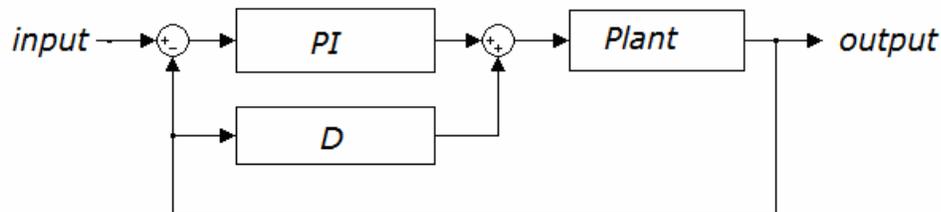
Persamaan ini yang dipakai sebagai fungsi alih *steam generator* pada daya rendah pada penelitian ini. Analisis fungsi alih sistem dilakukan dengan menggunakan metode root locus menunjukkan sistem tersebut merupakan sistem orde dua dengan nilai *damping ratio* (ζ)=1,0002. Sistem dengan nilai $\zeta > 0,8$ menunjukkan karakteristik overdamped yaitu osilasinya teredam.

Dengan melihat koordinat sistem pada s-plane terlihat bahwa sistem mempunyai root - 2,3025 + 0,0222i dan -2,3025 - 0,0222i dan zero sebesar 4,0919. Root locus memberikan desainer informasi seberapa besar gain mempengaruhi stabilitas sistem.

Kedua pole berapa di koordinat negatif atau sisi kiri sumbu menunjukkan bahwa sistem mempunyai karakteristik menuju kestabilan dan dengan penambahan gain maka sistem dapat dikendalikan.

3.1 PEMBUATAN PENGENDALI PID

Pengendali PID merupakan pengendali yang paling banyak digunakan, karena bentuknya yang sederhana dan mudah untuk dibuat, oleh karena itu pengendali ini biasa di jadikan pembanding untuk pengendali yang lebih modern. Blok diagram pengendali PID ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Blok diagram kendali PID

Pengendali PID dirumuskan sebagai berikut^[4]:

$$G_c(s) = K_c \left(e(s) + \frac{1}{T_i} \frac{e}{s} - T_d s Y \right) \quad (12)$$

Konstanta pada pengendali PI: K_c , T_i dan T_d didapatkan menggunakan korelasi Ciancone PID tuning dengan acuan *set point change* yang terdapat di buku Marlin [4] dan didapatkan:

Fraksi *dead time* =

$$\left(\frac{\theta}{\theta + \tau} \right) = \frac{0,45}{0,45 + 1,05} = 0,30$$

dan nilai:

$$K_c \cdot K_p = 1,1 \rightarrow K_c \cdot 1,5 = 1,1 \rightarrow = 0,733$$

$$\left(\frac{T_i}{\theta + \tau} \right) = 0,92 \rightarrow T_i = 0,9 \cdot 1,5 = 1,35$$

$$\left(\frac{T_d}{\theta + \tau} \right) = 0,04 \rightarrow T_d = 0,04 \cdot 1,5 = 0,06$$

3.2 PEMBUATAN PENGENDALI PREDIKTIF DMC

Untuk membuat pengendali prediktif DMC maka fungsi alih Laplace dirubah menjadi diskrit sebagai berikut:

$$y(t) = \frac{0,81z^{-1} + 0,405z^{-2}}{1 - 0,2z^{-1} + 0,001z^{-2}} u(t) \quad (13)$$

Dengan mendefinisikan matrik dinamik sistem G sebagai:

$$G = \begin{bmatrix} 0,81 & 0 \\ 1,377 & 0,81 \\ 1,4823 & 1,377 \end{bmatrix}$$

Jika sistem tidak berubah karakteristiknya maka matriks diatas akan selalu tetap untuk setiap periode pencuplikan, Nilai yang berubah terhadap waktu adalah respon dan sinyal kendali. Jika sinyal acuan yang diberikan berupa fungsi step, maka untuk pencuplikan ke-0 hasil perhitungan respon bebas sebagai berikut:

$$f(1) = y_m(0) + (g_2 - g_1)\Delta u(-1) + (g_3 - g_2)\Delta u(-2) = 0$$

$$f(2) = y_m(0) + (g_3 - g_1)\Delta u(-1) + (g_4 - g_2)\Delta u(-2) = 0$$

$$f(3) = y_m(0) + (g_4 - g_1)\Delta u(-1) + (g_5 - g_2)\Delta u(-2) = 0$$

Menggunakan pers (9) didapat vektor sinyal kendali saat t=1:

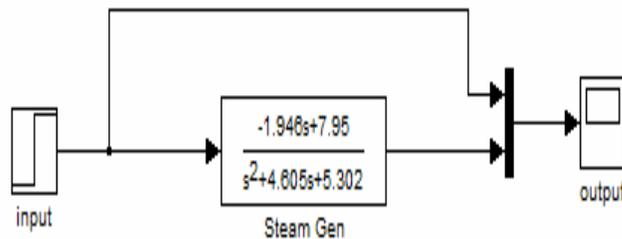
$$u(0) = u(0) + \Delta u(1) = 0,568$$

$$u(1) = u(0) + \Delta u(1) = 0,680$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

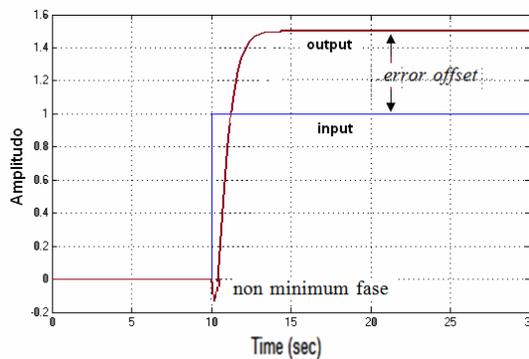
4.1 RESPON FUNGSI UNDAK PADA SISTEM

Untuk mendapatkan respon steam generator terhadap input fungsi undak kalang terbuka maka dibuat program simulasi dengan menggunakan simulink seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Simulasi step respon open loop pada steam generator

Gambar 4. menunjukkan aksi output kalang terbuka sistem tanpa pengendali. Dengan masukan berupa fungsi step dengan amplitudo 1 pada detik ke 10. Grafik menunjukkan sistem akan mencapai kondisi stabil setelah 4 detik. Sistem tersebut mempunyai non minimum fase sebesar 10 persen, sedang besarnya *error offset* sebesar 20 persen.



Gambar 4. Step Respon open loop fungsi alih steam generator

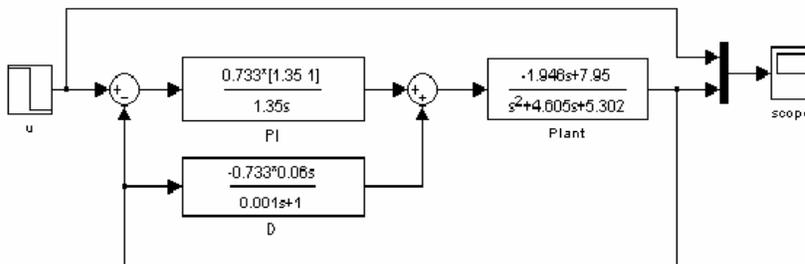
Pada Gambar 4 terlihat terjadi respon transien balik. Mengakibatkan pada mulanya respon sistem berbalik arah dahulu terhadap masukan, hal ini disebut non minimum fase. Baru kemudian respon berbalik arah menuju arah yang sesuai input.

Efek non minimum fase dapat dilihat pada koordinat s-plane fungsi alih sistem karena adanya zero yang berada di sebelah kanan koordinat s-plane.

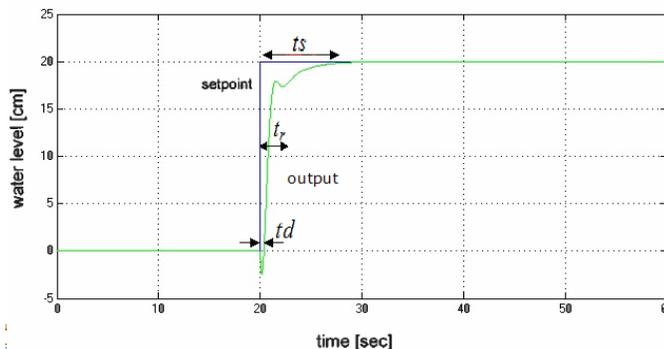
Input berupa sinyal undak dengan amplitudo sebesar 1 menyebabkan sistem mulanya berespon negatif sebesar -0.07 sebentar, baru kemudian sistem berbalik kearah positif sesuai masukan input. Sistem mencapai kondisi steady state pada amplitudo 1.5 setelah menempuh 4 detik.

4.2 HASIL PENGENDALI PID

Uji Kontrol PID dilakukan untuk mengetahui respon kendali PID pada sistem steam generator. Blok diagram simulasi pengendali PID pada sistem *steam generator* dibuat dengan simulink ditunjukkan pada Gambar 5.

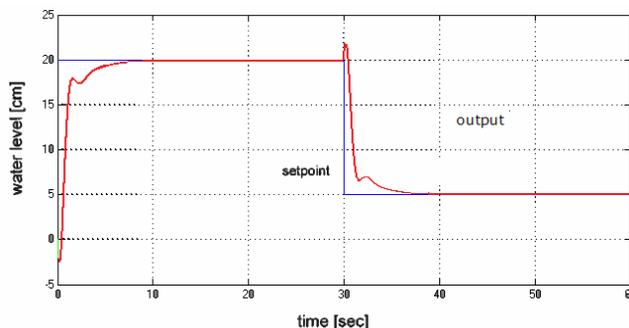


Gambar 5. Simulasi sistem kendali PID pada sistem *steam generator* menggunakan Simulink



Gambar 6. Hasil keluaran pengendali PID pada sistem

Hasil pengujian sistem generator dengan menggunakan pengendali PID diterapkan pada sistem dengan simulasi. Didapatkan bahwa output sistem setelah dikendalikan mempunyai *rise time*, t_r sebesar 3 detik, *delay time*, t_d 1.5 detik, dan *settling time*, t_s sebesar 7 detik. Karena sistem mempunyai karakteristik non minimum fase maka pengaruhnya terlihat pada grafik keluaran berbalik arah transien sesaat diberi input positif, baru kemudian mengikuti arah sinyal input.



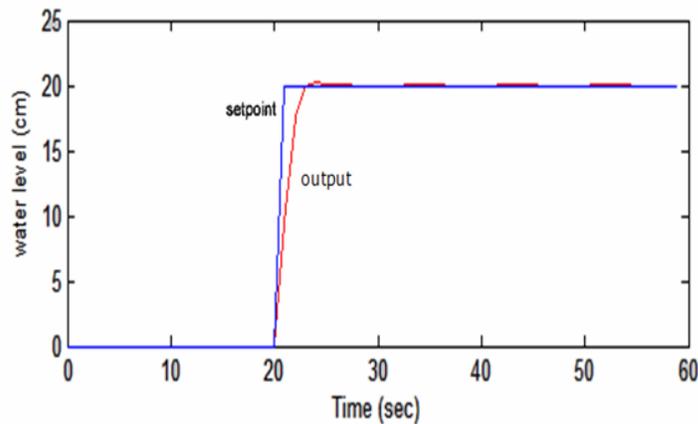
Gambar 7. Hasil keluaran pengendali PID pada sistem untuk masukan fungsi turun.

Demikian juga dengan kelakuan input level air *steam generator* diinginkan penurunan dari 20 cm menjadi 5 cm pada detik ke 30 ditunjukkan Gambar 7. Terlihat bahwa grafik menunjukkan respon sistem terdapat output naik dulu sesaat, barulah kemudian turun mengikuti input dengan sedikit denyut. Walaupun masih terdapat osilasi tetapi sistem kendali PID yang diterapkan pada sistem mampu mengendalikan sistem menuju hasil yang diinginkan sesuai input. Keluaran sistem hasil pengendalian tidak memperlihatkan adanya *overshoot*.

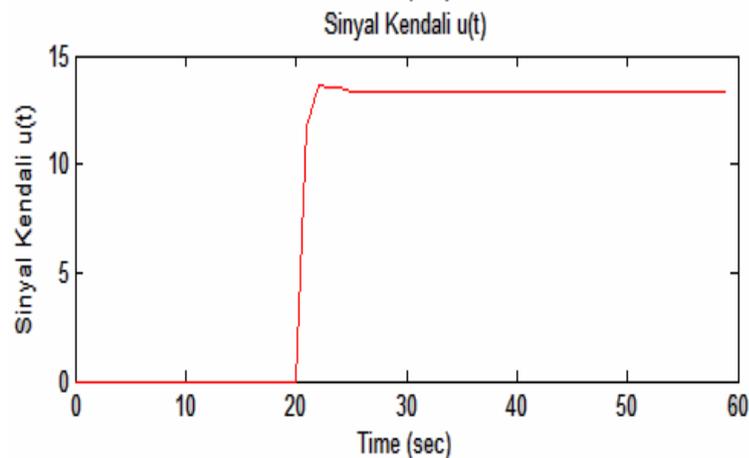
4.3 HASIL PENGENDALI PREDIKTIF DMC

Pengendali prediktif DMC pada sistem merupakan program numerik sehingga tidak dibuat dengan simulink tapi dengan pemrograman dengan menggunakan menggunakan matlab.

Uji kendali prediktif DMC diawali dengan melakukan uji masukan berupa input step pada detik ke 20 dari amplitudo 0 menuju amplitudo 1 seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Hasil menunjukkan pengendali prediktif mampu mengatasi non minimum fase. Respon keluaran sistem mempunyai *rise time* sebesar 3 detik, *delay time*, 1,5 detik dan *settling time* sebesar 6 detik. Gambar 9 menunjukkan sinyal kendali prediktif DMC, sinyal kendali cukup halus hal ini bagus untuk aktuator karena pergerakan aktuator menjadi halus juga.

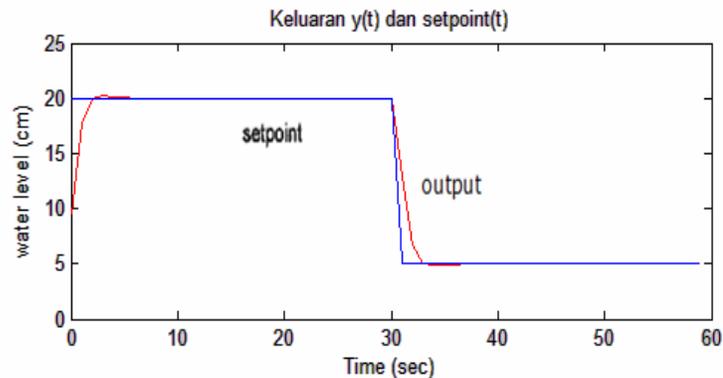


Gambar 8. Hasil keluaran sistem dengan pengendali prediktif DMC.



Gambar 9. Sinyal kendali prediktif DMC.

Selanjutnya dilakukan uji kendali pada steam generator untuk masukan dengan fungsi turun. Uji diawali dengan memberi input dengan amplitudo 20 cm, dan ditunggu hingga kurva stabil. Setelah sistem stabil pada detik ke-30 detik kemudian input/setpoint turun menuju level air 5 cm seperti ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Hasil keluaran pengendali DMC pada sistem untuk masukan fungsi turun.

Hasil uji menunjukkan bahwa sistem kendali mampu membawa sistem mampu mengikuti sinyal input dengan *delay time* 1,5 detik dan *settling time* sebesar 6 detik. Tidak terlihat adanya pengaruh non minimum fase dari sistem dan osilasi transien. Hal ini karena pada pengendalian prediktif dengan horizon 3, sementara waktu transien sistem berada di bawah horizon kendali prediktif DMC, sehingga dapat dinyatakan bahwa kendali prediktif DMC mampu mengatasi efek non minimum fase.

Dari hasil pengendali PID dan prediktif bahwa untuk pengendalian level air steam generator pada daya rendah pengendali prediktif DMC mampu bekerja lebih baik dari pada pengendali PID. Hali ini dikarenakan kemampuan mengatasi waktu tunda yang dapat mengatasi efek non minimum fase yang merupakan karateristik steam generator pada daya rendah.

5. KESIMPULAN

Penerapan uji kendali PI dan prediktif DMC pada sistem steam generator telah dilakukan. Fungsi alih steam generator untuk kondisi daya rendah mempunyai karakteristik non minimum fase, sehingga output pada pengendali sistem kendali level dengan menggunakan PID masih terpengaruh.

Pengendali prediktif metode DMC dapat berhasil baik dan dapat mengatasi efek non minimum fase pada sistem. Dari grafik hasil menunjukkan bahwa pengendali PID dan PI mampu mengendalikan dengan baik. Pada daya rendah pengendali prediktif DMC dapat mengendalikan level air pada steam generator dengan hasil yang lebih baik dari pada PID. Kemampuan mengatasi waktu tunda dapat mengatasi efek non minimum fase yang merupakan karateristik steam generator pada daya rendah.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terimakasih atas pembiayaan penelitian ini oleh dana Program Insentif Kementerian Riset dan Teknologi untuk tahun anggaran 2010-2011.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006, Tentang Kebijakan Energi Nasional
- [2]. Zhe Dong, 2009, Water-Level Control for the U-Tube Steam Generator of Nuclear Power Plants Based on Output Feedback Dissipation
- [3]. Man Gyun Na, 2001, Auto-Tuned PID Controller Using a Model Predictive Control Method for the Steam Generator Water Level
- [4]. Thomas E. Marlin, 2000, Process Control Designing processes and Control Systems for Dynamic Performance, Mc Graw Hill
- [5]. Martin, M., 1996, *Adaptive Predictive Control*, Prentice Hall, Department of Energy Systems School of Mining Engineering Technical University of Madrid.
- [6]. Ogata, K., 1996, Teknik Kontrol Automatik Jilid I, Erlangga, Jakarta.
- [7]. Subiantoro, Aries, *Diktat Kuliah Sistem Kendali Adaptif* (Depok : Control System Research Group Jurusan Elektro FTUI, 2002)
- [8]. Johnson Curtis D., 1997, Process Control Instrumentation Technology, Prentice hall, New Jersey.
- [9]. E.Irving, 1989 "Toward efficient full automatic operation of the pwr steam generator with water level adaptive control," 2nd Int. Conf. Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Stations.

DISKUSI/TANYA JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Azzizul Khakim, BAPETEN)

- Berapa persen (%) non minimum fase terhadap parameter target?
- Metode apa yang bisa digunakan untuk memperkecil non minimum fase?

JAWABAN: (Yoyok Dwi Setyo P., PTRKN-BATAN)

- Non minimum fase yang terjadi sebesar 7%.
- Metode prediktif dengan horiozon 3 mampu mengatasi non minimum fase ini.