

PERANCANGAN PENGENDALI MODEL PREDICTIVE CONTROL PADA SERVOMEKANIS DC

Ahyar M

Staf Pengajar Akademi Teknik Soroako, Sorowako

*Email: ahyar@ats-sorowako.ac.id

Abstrak

Penelitian ini membahas aplikasi kendali prediktif *Model Predictive Control* (MPC) untuk pengontrolan posisi motor DC (*positional servomechanism*). Sistem servomekanis yang dikendalikan diwakili oleh sebuah model matematis yang dinyatakan dalam bentuk persamaan ruang keadaan model sistem diskrit dengan waktu pencuplikan (*time sampling*) selama satu (1) detik. Algoritma pengendali MPC yang dirancang adalah untuk kondisi tanpa *constraint* (unconstrained MPC) dan digunakan untuk mengendalikan posisi aktuator dengan masukan tegangan jangkar pada motor. Kinerja yang dihasilkan diperlihatkan oleh beberapa hasil simulasi. Perubahan parameter pengendali mempengaruhi keluaran posisi angular sedangkan keluaran torsi relatif tidak terpengaruh. Pada simulasi ini hasil terbaik diperlihatkan jika matriks pengendali diset pada nilai $Q = 10I$ dan $R = 0,001I$.

Kata Kunci : MPC, servomekanis, model diskrit, unconstrained MPC

Abstract

Design of Controller Model of the Predictive Control on the Servomechanism DC. This research discusses application of a model on the predictive control for the positional servomechanism of a DC motor. The servomechanism system is represented by a mathematical model stated in the form of a discrete-model state space equation with sampling time of (1) second. The algorithm of MPC controller is designed for unconstrained condition (unconstrained MPC) and is used for controlling the position of actuator with voltage motor as the input of the system. The performance of the controller is shown by some simulation results. Changing in the controller parameter affects the angular position output while relatively not affecting the output torque. In this simulation the best result is obtained if the matrix controller is set at the value of $Q = 10I$ and $R = 0,001I$.

Keywords: MPC, servomechanism, discrete model, unconstrained MPC

1. Pendahuluan

Kendali prediktif pertama kali diperkenalkan secara simultan oleh Richalet, Cutler, dan Ramaker pada akhir tahun 1970-an melalui *Model Predictive Control* (MPC), dan prinsip dasar aslinya dikemukakan secara resmi dalam *US-Patent* pada awal 1980-an, yaitu berdasarkan model proses. Kendali prediktif akan membuat dinamika keluaran proses terprediksi sama dengan dinamika keluaran proses yang diinginkan. Kendali prediktif dapat digunakan untuk mengendalikan proses yang memiliki

waktu mati (*dead time*) yang besar, berfasa tidak minimum (*non-minimum phase*), dan sistem yang tidak stabil. Suksesnya pengaplikasian kendali prediktif dan kesederhanaan konsep serta teorinya menciptakan ketertarikan banyak akademi/universitas di seluruh dunia. Pengaplikasian *predictive control* kemudian meluas antara lain pada *distillation column*, *hydrocracker*, *fluidized bed catalytic cracker*, *utility boiler*, *chemical reactor*, *transonic wind tunnel*, *robot arm*, *servo mechanism*, *mechatronic servo system*, *pulp* dan *paper plant* (Maciejowski, 2000).

MPC termasuk ke dalam kategori metode pengendali berbasis model proses, yaitu model proses yang digunakan secara eksplisit untuk merancang pengendali. Beberapa metodologi digunakan untuk mendesain kendali prediktif yaitu dengan munculnya beberapa jenis kendali prediktif yang memiliki spesifikasi yang berbeda-beda, diantaranya adalah *Dynamic Matrix Control* (DMC), *Model Algorithmic Control* (MAC) dan *Generalized Predictive Control* (GPC). Metode DMC dan MAC termasuk kedalam kategori pengendali prediktif yang menggunakan model non-parametrik, berbasiskan pada respon model terhadap masukan *step* atau *impulse*. GPC termasuk kedalam kategori metode parametrik, karena model proses direpresentasikan ke dalam bentuk fungsi alih yang menyatakan letak *pole* dan *zero* dari model (Cahyaningtias, 2014, Wahid, 2015).

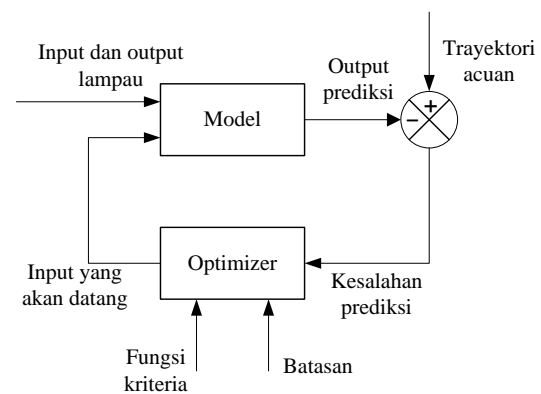
Keuntungan MPC dibandingkan metode pengendali konvensional lainnya diantaranya adalah dapat memperhitungkan batasan (*constraints*) pada sistem dalam perancangan pengendali, konsep MPC sangat intuitif serta penalarannya sangat mudah, dapat digunakan untuk mengendalikan proses yang beragam, mulai dari proses yang sederhana sampai proses yang kompleks, dan mempunyai batasan waktu tunda besar. Selain itu MPC dapat menangani sistem multivariabel, mempunyai kompensasi terhadap waktu tunda, dan mempunyai kemampuan pengendali *feed forward* untuk mengkompensasi gangguan yang terukur. Pengendali yang diperoleh pada MPC mudah untuk diimplementasikan dalam sistem, dan sangat berguna jika sinyal referensi untuk masa datang diketahui (Woods, 1997).

Pada penelitian ini akan dibahas aplikasi kendali prediktif MPC untuk pengontrolan posisi motor DC (*positional servomechanism*). Sistem yang dikendalikan hanya diwakili oleh sebuah model matematis yang diturunkan dalam bentuk persamaan ruang keadaan. Algoritma MPC yang dirancang adalah untuk kondisi tanpa batasan (*unconstrained MPC*) dan digunakan untuk mengendalikan posisi aktuator dengan masukan tegangan jangkar pada motor.

2. Kajian Pustaka

Konsep Dasar Model Predictive Control

MPC sebagai sistem kendali prediktif dirancang berbasis model proses yang digunakan secara eksplisit untuk mendesain pengendali dengan meminimalisasi suatu fungsi kriteria. Struktur dasar MPC diperlihatkan pada Gambar 1. Prinsip yang mendasari pada setiap jenis pengendali prediktif yang pertama menggunakan model proses untuk memprediksi keluaran yang akan datang dalam rentang waktu yang telah ditentukan (*horizon*). Selanjutnya adalah menghitung sinyal kendali dengan meminimasi *cost function* (fungsi kriteria) yang ditetapkan sebelumnya dengan tujuan untuk menjaga keluaran proses agar sedekat mungkin dengan trayektori acuan. Tahap selanjutnya adalah sinyal kendali dikirim ke proses sedangkan sinyal kendali terprediksi berikutnya dibuang, karena pada pencuplikan berikutnya, keluaran sudah diketahui nilainya. Maka langkah pertama diulang dengan nilai keluaran proses yang baru dan semua prosedur perhitungan yang diperlukan diperbaiki. Sinyal kendali yang baru nilainya berbeda, diperoleh dengan menggunakan konsep *receding horizon*. (Kamen, 2000)



Gambar 1. Struktur Dasar MPC

Sebuah sistem yang diwakili oleh model yang diasumsikan linier, direpresentasikan dalam bentuk persamaan ruang keadaan dengan sebagai berikut :

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1)$$

$$y(k) = C_y x(k) \quad (2)$$

$$z(k) = C_z x(k) \quad (3)$$

dengan x adalah vektor variabel keadaan berdimensi n , u adalah vektor masukan berdimensi l , y adalah vektor keluaran terukur berdimensi m_y , dan z adalah vektor keluaran yang dikendalikan berdimensi, m_z yang dikendalikan untuk memenuhi batasan tertentu (*constraint*). Dalam prakteknya variabel y dan z biasanya disamakan, dalam hal ini, semua keluaran terukur terkendali dapat diukur. Indeks k menunjukkan waktu pencuplikan.

Untuk menyelesaikan masalah kontrol prediktif, dilakukan dengan menghitung nilai prediksi dari variabel keluaran terkendali $[\hat{z}(k+i|k)]$, yang diperoleh dari estimasi terbaik vektor keadaan $[\hat{x}(k|k)]$, vektor masukan pada pencuplikan lampau $[u(k-1)]$, dan perkiraan perubahan sinyal masukan yang akan datang $[\Delta\hat{u}(k+i|k)]$.

Prediksi persamaan keadaan diperoleh dengan melakukan iterasi pada persamaan (1-3). Jika H_p adalah *prediction horizon* dan H_u adalah *control horizon*, diperoleh:

$$\hat{x}(k+1|k) = Ax(k) + B\hat{u}(k|k) \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+2|k) &= A\hat{x}(k+1|k) + B\hat{u}(k+1|k) \\ &= A^2x(k) + BA\hat{u}(k|k) + B\hat{u}(k+1|k) \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+H_p|k) &= A\hat{x}(k+H_p-1|k) + B\hat{u}(k+1|k) \\ &= A^{H_p}x(k) + BA\hat{u}(k|k) + B\hat{u}(k+1|k) \end{aligned} \tag{6}$$

Pada iterasi pertama tidak digunakan $u(k)$, tetapi digunakan $\hat{u}(k|k)$, karena pada saat perhitungan prediksi, nilai sinyal masukan $u(k)$ belum diketahui. Diasumsikan bahwa sinyal masukan hanya akan berubah saat $k, k+1, \dots, k+H_u-1$, dan akan tetap konstan setelahnya, sehingga, untuk interval $H_u \leq i \leq H_p-1$, diperoleh $\hat{u}(k+i|k) = \hat{u}(k+H_u-1|k)$. Dengan mendefinisikan perubahan masukan $\Delta\hat{u}(k+i|k) = \hat{u}(k+i|k) - \hat{u}(k+i-1|k)$, pada saat k telah diperoleh sinyal masukan $u(k-1)$, sehingga persamaan (4-6) dapat ditulis menjadi:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \hat{x}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_u|k) \\ \hat{x}(k+H_u+1|k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_p|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ \vdots \\ A^{H_u} \\ A^{H_u+1} \\ \vdots \\ A^{H_p} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} B \\ AB+B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B \\ \sum_{i=0}^{H_u} A^i B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B \end{bmatrix} u(k-1) + \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} B & \dots & 0 \\ AB+B & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B & \dots & B \\ \sum_{i=0}^{H_u} A^i B & \dots & AB+B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B & \dots & \sum_{i=0}^{H_p-H_u} A^i B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\hat{u}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta\hat{u}(k+H_u-1|k) \end{bmatrix}$$

Dua suku pertama disebelah kanan tanda sama dengan pada persamaan (7) adalah menunjukkan proses lampau sedangkan suku terakhir menunjukkan proses yang akan datang.

Prediksi dari keluaran terkendali z adalah:

$$\begin{bmatrix} \hat{z}(k+1|k) \\ \hat{z}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{z}(k+H_p|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_z & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_z & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \hat{x}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_p|k) \end{bmatrix} \tag{8}$$

Dengan menggabungkan persamaan (7) dan (8) maka diperoleh :

$$Z(k) = \Psi x(k) + \Gamma u(k-1) + \Theta \Delta U(k) \tag{9}$$

dimana:

$$\Psi = \begin{bmatrix} C_z & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_z & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ \vdots \\ A^{H_p} \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} C_z & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_z & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ AB+B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B \end{bmatrix}$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} C_z & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_z & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & 0 \\ AB + B & B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B & \sum_{i=0}^{H_p-2} A^i B & \dots & \sum_{i=0}^{H_p-H_u} A^i B \end{bmatrix}$$

Pengendali *Unconstraint* MPC

Persamaan sinyal kendali $\Delta u(k)$ diturunkan dengan meminimasi fungsi kriteria (*cost function*). Fungsi kriteria $v(k)$ yang digunakan dalam algoritma MPC adalah fungsi kuadrat seperti berikut: (Benjamin, 1998)

$$v(k) = \sum_{i=1}^{H_p} \|\hat{z}(k+1|k) - r(k+1)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\hat{u}(k+1|k)\|_{R(i)}^2 \tag{10}$$

Persamaan (6) dapat dituliskan menjadi:

$$V(k) = \|Z(k) - T(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 \tag{11}$$

dimana $Z(k)$ adalah vektor keluaran terprediksi, $T(k)$ adalah vektor trayektori acuan, dan $\Delta U(k)$ adalah perubahan sinyal kendali terprediksi, yaitu:

$$Z(k) = \begin{bmatrix} \hat{z}(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{z}(k+H_p|k) \end{bmatrix}$$

$$T(k) = \begin{bmatrix} r(k+1|k) \\ \vdots \\ r(k+H_p|k) \end{bmatrix}$$

$$\Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k+H_u-1|k) \end{bmatrix}$$

Matriks pembobot Q dan R adalah sebagai berikut:

$$Q = \begin{bmatrix} Q(1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q(2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Q(H_p) \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} R(1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Q(H_u-1) \end{bmatrix}$$

Suatu matriks penjejak kesalahan (*tracking error*) yang merupakan selisih antara nilai trayektori acuan dengan respon bebas dari sistem, didefinisikan dalam persamaan:

$$E(k) = Tx(k) - \Psi x(k) - \Gamma u(k-1) \tag{12}$$

Respon bebas sistem adalah respon yang terjadi pada rentang *prediction horizon*, jika tidak terjadi perubahan sinyal masukan ($\Delta u = 0$). Dengan mensubstitusi persamaan (5) dan (8) ke dalam persamaan (7) diperoleh:

$$V(k) = \|\Theta \Delta U(k) - E(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2$$

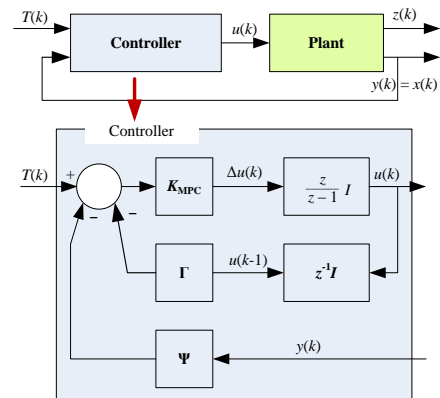
$$V(k) = [\Delta U(k)^T \Theta^T - E(k)^T] Q [\Theta \Delta U(k) - E(k)] + \Delta U(k)^T R \Delta U(k)$$

$$V(k) = E(k)^T Q E(k) - 2 \Delta U(k)^T \Theta^T Q E(k) + \Delta U(k)^T [\Theta \Delta U(k) + R] \Delta U(k) \tag{13}$$

Persamaan sinyal kendali diperoleh dengan mendifferensialkan $V(k)$ terhadap $\Delta U(k)$ dan membuatnya sama dengan nol ($\frac{\partial V(k)}{\partial \Delta U(k)} = 0$), diperoleh: (Pakhpahan, 1987)

$$\Delta U(k) = [\Theta^T Q \Theta + R]^{-1} \Theta^T Q E(k) \tag{14}$$

Yang perlu diperhatikan adalah bahwa pada semua strategi kendali prediktif, hanya elemen pertama dari vektor $\Delta U(k)$ yang benar-benar digunakan dalam proses. Hal ini karena selama rentang waktu prediksi sinyal acuan dapat berubah, dan tidak mungkin untuk mengestimasi vektor gangguan dengan sempurna.



Gambar 2. Struktur Pengendali *Unconstraint* MPC

Blok yang berlabel K_{MPC} pada Gambar 2 adalah *unconstrained controller gain matrix* yang didefinisikan oleh:

$$K_{MPC} = [1 \ 0 \ \dots \ 0][\Theta^T Q \Theta + R]^{-1} \Theta^T Q \tag{15}$$

Dengan mengambil hanya elemen pertama dari vektor $\Delta U(k)$ saja yang digunakan dalam perhitungan, maka sesuai persamaan (11) persamaan sinyal kendali (10) dapat dituliskan menjadi:

$$\Delta U(k) = K_{MPC} E(k) \tag{16}$$

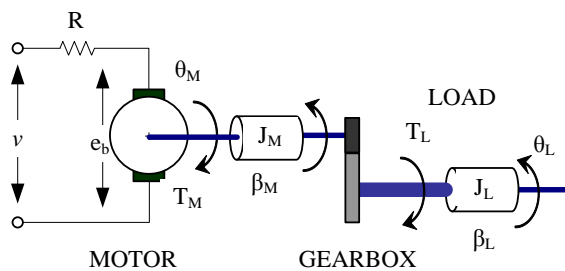
Dimensi matriks yang dipakai dalam perhitungan ini dapat dilihat pada Tabel 1, dengan l, m, n berturut-turut menunjukkan jumlah masukan, keluaran, dan variabel keadaan dari sistem.

Tabel 1. Dimensi matriks dalam perhitungan kendali model prediktif

Matriks	Dimensi
Q	$m(H_p) \times m(H_p)$
R	$l(H_u) \times l(H_u)$
Ψ	$m(H_p) \times n$
Γ	$m(H_p) \times l$
Θ	$m(H_p) \times l(H_u)$
E	$m(H_p) \times 1$

3. Perancangan Algoritma Sistem Kendali MPC pada Servomekanis DC

Motor arus searah merupakan salah satu penggerak utama yang banyak digunakan di industri masa kini. Sistem pengontrolan posisi motor DC (*servomechanism*) terdiri atas motor DC, sistem transmisi roda gigi (*gear box*), poros (*shaft*) dan beban (*load*) (Subiantoro, 2007)



Gambar 3. Skema sistem servomekanis posisi

Variabel dan parameter sistem ditentukan berdasarkan Gambar 3, dimana V adalah tegangan masukan pada motor R adalah resistansi jangkar (*armature*) motor, e_b adalah emf lawan, θ_M, θ_L adalah perpindahan sudut/posisi angular poros motor dan beban, T_M, T_L adalah torsi motor dan beban, J_M, J_L adalah momen inersia motor dan beban, β_M, β_L adalah koefisien gesekan viskos pada motor dan pada beban dan N adalah rasio gear box.

Pada sistem ini, posisi beban dikendalikan dengan mengatur tegangan (V) yang masuk ke motor. Pengaturan tegangan masukan ini dapat berupa potensiometer dan *amplifier* yang menghasilkan tegangan yang sebanding dengan posisi poros.

Identifikasi Model Servomekanis Posisi

Sistem pengendalian posisi motor DC dapat dinyatakan dalam persamaan diferensial berikut :

$$\dot{\omega}_L = -\frac{k_\theta}{J_L} \left(\theta_L - \frac{\theta_M}{N} \right) - \frac{\beta_L}{J_L} \omega_L \tag{17}$$

$$\dot{\omega}_M = \frac{k_T}{J_M} \left(\frac{V - k_T \omega_M}{R} \right) - \frac{\beta_M \omega_M}{J_M} + \frac{k_\theta}{N J_M} \left(\theta_L - \frac{\theta_M}{N} \right) \tag{18}$$

Dengan $\omega_M = \dot{\theta}_M$ adalah kecepatan angular poros motor dan $\omega_L = \dot{\theta}_L$ adalah kecepatan angular beban. Pengendalian posisi angular beban (θ_L) pada nilai yang diinginkan dilakukan dengan mengatur tegangan (V) yang masuk pada motor. Output dari sistem ada dua, yang terukur dan diumpan-balikkan ke pengendali adalah θ_L , dan yang tidak terukur adalah torsi beban (T), dimana:

$$T = k_\theta \theta_L - \frac{k_\theta}{N} \theta_M \tag{19}$$

Jika ditetapkan vektor variabel keadaan adalah $x(t) = [\theta_L(t) \ \omega_L(t) \ \theta_M(t) \ \omega_M(t)]^T$ maka dari persamaan (13) dan persamaan (14) dapat dibuat model persamaan keadaan (*state space*) dan persamaan keluaran sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_\theta}{J_L} & -\frac{\beta_L}{J_L} & \frac{k_\theta}{N J_L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_\theta}{N J_M} & 0 & -\frac{k_\theta}{N^2 J_M} & \frac{\beta_M + k_T^2 / R}{J_M} \end{bmatrix} x(t) +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_T}{RJ_M} \end{bmatrix} u(t) \tag{20}$$

$$y(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]x(t) \tag{21}$$

$$z(t) = \left[k_\theta \ 0 \ -\frac{k_\theta}{N} \ 0 \right] x(t) \tag{22}$$

Nilai-nilai variabel dan parameter yang digunakan dalam sistem pengontrolan posisi ini ditunjukkan pada Tabel 2. Satuan besaran yang digunakan adalah satuan standar SI.

Tabel 2. Parameter model servomekanis

Simbol	Nilai	Defenisi
k_θ	1280.2	Torsional <i>rigidity</i>
k_T	10	Konstanta motor
J_M	0.5	Torsi motor
J_L	25	Torsi beban
N	20	Rasio <i>gear box</i>
β_M	0.1	Koefisien gesekan viskos pada motor
β_L	25	Koefisien gesekan viskos pada beban
R	20	Resistansi armatur motor

Berdasarkan nilai parameter pada Tabel 2, diperoleh matriks koefisien model *state space* untuk sistem adalah:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -51.21 & -1 & 2.56 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 128.02 & 0 & -6.401 & 10.2 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C_y = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad D = [0]$$

$$C_z = [1280.2 \ 0 \ 64.01 \ 0] \quad D = [0]$$

Model di atas adalah model *continuous-time*. Karena pada algoritma MPC digunakan pengendali sistem diskrit, maka model tersebut perlu di ubah ke dalam model sistem diskrit (*discrete-time model*). Dengan waktu pencuplikan (*time sampling*) ditentukan = 1 detik, maka diperoleh persamaan keadaan dan persamaan keluaran model sistem diskrit, yaitu:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 0.307 & 0.066 & 0.035 & 0.003 \\ -3.011 & 0.243 & 0.150 & 0.005 \\ 0.411 & 0.145 & 0.980 & 0.098 \\ 5.163 & 0 & 0.258 & 0.021 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0.004 \\ 0.003 \\ 0.087 \\ 0.098 \end{bmatrix} u(k)$$

$$y(k) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]x(k)$$

$$z(k) = [1280.2 \ 0 \ 64.01 \ -10.2]x(k)$$

dengan $y(k)$ adalah vektor keluaran terukur (θ_L), dan $z(k)$ adalah vektor keluaran yang dikendalikan (T).

Perancangan Pengendali MPC

Parameter pengendali *unconstrained* MPC untuk sistem servomekanis posisi, ditentukan oleh model yang dikendalikan memiliki satu masukan $l = 1$, keluaran model $m = 1$, variabel keadaan $n = 4$, *prediction horizon* $H_p = 10$, *control horizon* $H_u = 2$, faktor pembobot $Q = 10I$ dan $R = 0,1I$.

Parameter model diskrit persamaan keadaan dan persamaan keluaran adalah:

$$A = \begin{bmatrix} 0.307 & 0.066 & 0.035 & 0.003 \\ -3.011 & 0.243 & 0.150 & 0.005 \\ 0.411 & 0.145 & 0.980 & 0.098 \\ 5.163 & 0 & 0.258 & 0.021 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.004 \\ 0.003 \\ 0.087 \\ 0.098 \end{bmatrix}$$

$$C_y = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$C_z = [1280.2 \ 0 \ 64.01 \ -10.2]$$

Pada model ini $C_y \neq C_z$, menunjukkan bahwa sistem memiliki satu keluaran terukur (*measured output*) yang dikembalikan sebagai *feedback* ke pengendali (dalam hal ini dihitung oleh C_y), dan satu keluaran tak terukur (*unmeasured output*) yang diprediksi oleh C_z .

Dimensi matriks yang digunakan adalah:

$$Q : 10 \times 10 \quad \Gamma : 10 \times 1$$

$$R : 2 \times 2 \quad \Theta : 10 \times 2$$

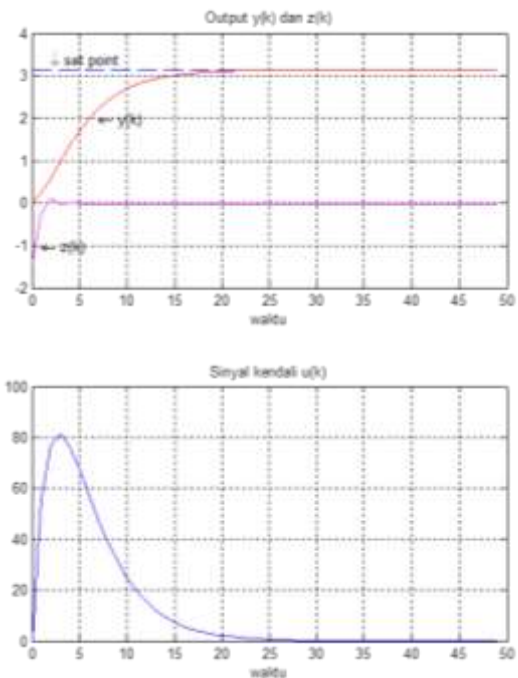
$$\Psi : 10 \times 4 \quad E : 10 \times 1$$

4. Hasil dan Pembahasan

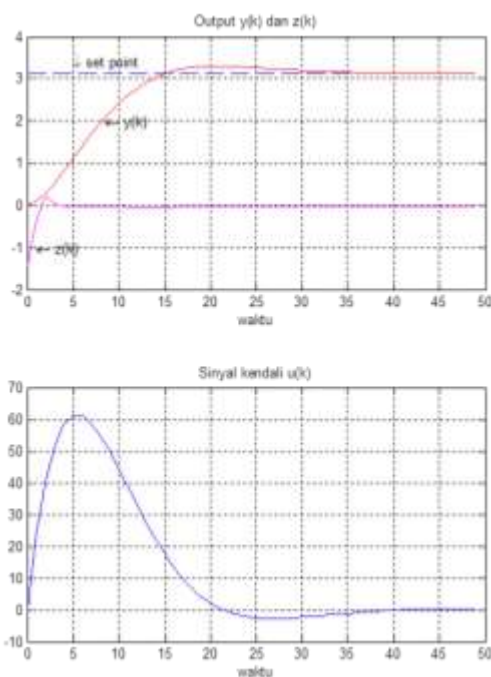
Simulasi dilakukan dengan mengubah-ubah parameter pengendali untuk melihat pengaruhnya terhadap output sistem. Parameter pengendali yang diubah adalah matriks pembobot Q dan R .

Gambar 4 memperlihatkan hasil simulasi pertama ketika sistem diberikan masukan fungsi *step* dengan amplitudo sebesar π , dan matriks pembobot di set untuk $Q = 50I$. dan $R = I$. Terlihat bahwa sistem mencapai keadaan stabil pada detik ke-35. Terjadi overshoot namun tidak signifikan. Sinyal kendali sempat mencapai angka 60 sebelum akhirnya mulai stabil pada detik ke-30.

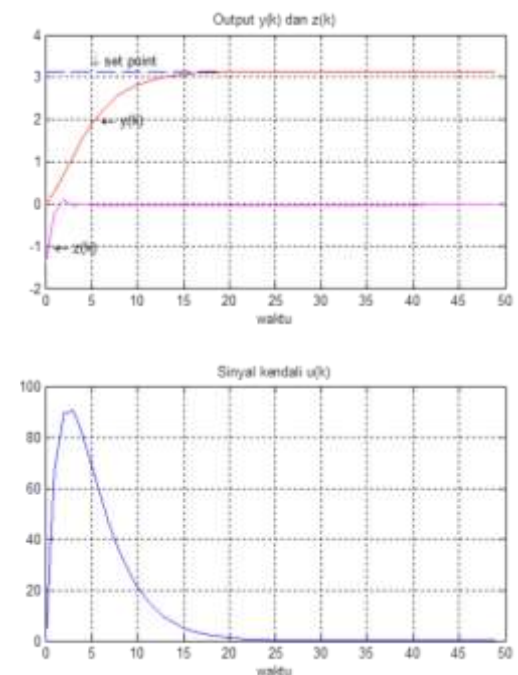
Simulasi kedua dan seterusnya dilakukan dengan mengubah-ubah nilai parameter Q dan R . Grafik hasil simulasi pada Gambar 5 memperlihatkan bahwa jika nilai R diperkecil menjadi $0,1I$, maka sistem akan semakin cepat mencapai keadaan stabil yaitu pada detik ke-20. Gambar 6 menunjukkan bahwa dengan menaikkan nilai Q menjadi $100I$ sinyal kendali berfluktuasi lebih tinggi mencapai nilai 90 sebelum stabil. Hasil simulasi ke-4 ditunjukkan pada Gambar 7, dan matriks pembobot di set untuk $Q = 50I$ dan $R = 0$. Terlihat bahwa sistem lebih cepat mencapai keadaan stabil yaitu, pada detik ke-3.



Gambar 5. Hasil simulasi 2 ($Q = 50I$ dan $R = 0,1I$)



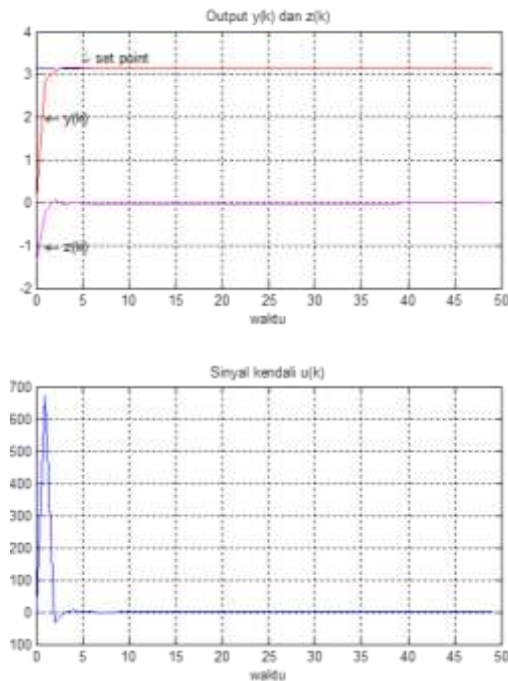
Gambar 4. Hasil simulasi 1 ($Q = 50I$ dan $R = I$)



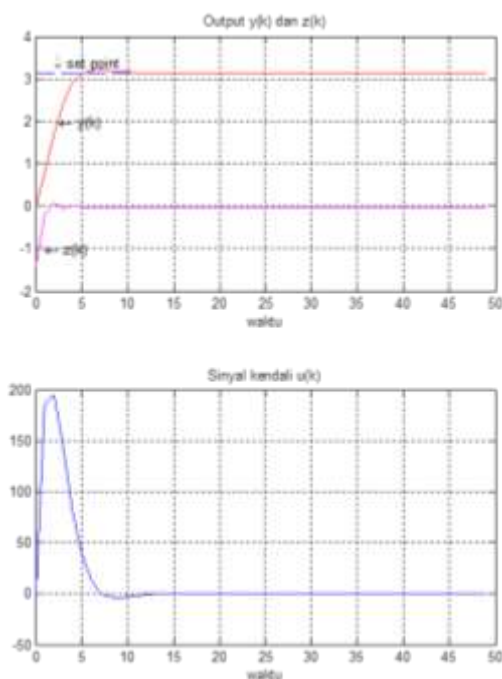
Gambar 6. Simulasi 3 ($Q = 100I$ dan $R = 0,1I$)

Hasil simulasi ke-4 ditunjukkan pada Gambar 7, dan matriks pembobot di set untuk $Q = 50I$ dan $R = 0$. Terlihat bahwa sistem lebih cepat mencapai keadaan stabil yaitu pada detik ke-3. Tetapi sinyal kendali berubah cukup besar mencapai angka 700 sebelum akhirnya menjadi

stabil. Simulasi ke-5 dilakukan dengan mengubah nilai R menjadi $0.001I$ dan menurunkan nilai Q menjadi $10I$.



Gambar 7. Simulasi 4 ($Q = 50I$ dan $R = 0$)



Gambar 8. Simulasi 5 ($Q = 10I$ dan $R = 0.001I$)

Gambar 8 menunjukkan perubahan nilai sinyal kendali dapat lebih diperkecil, walaupun sistem membutuhkan waktu yang sedikit lebih lama untuk mencapai nilai stabil. Tetapi sinyal kendali berubah cukup besar mencapai angka 700 sebelum akhirnya menjadi stabil.

Dari grafik-grafik tersebut terlihat bahwa perubahan nilai Q dan R memperlihatkan perubahan signifikan pada keluaran terukur (*measured output*) yakni θ_L , sedangkan *unmeasured output* (T) relatif tidak terpengaruh.

5. Kesimpulan

Kesimpulan dalam penelitian ini adalah pada sistem servomekanis DC terdapat dua keluaran sistem yakni posisi angular θ_L sebagai keluaran terukur dan menjadi *feedback* bagi pengendali, dan torsi beban T sebagai keluaran yang tak terukur. Perubahan parameter pengendali mempengaruhi keluaran posisi angular θ_L sedangkan keluaran torsi T relatif tidak terpengaruh. Pada simulasi ini hasil terbaik diperlihatkan jika matriks pengendali diset pada nilai $Q = 10I$ dan $R = 0,001I$.

Daftar Pustaka

- Benjamin K C., 1998, "Teknik Kontrol Automatik, Jilid 1", PT Prenhallindo, Jakarta.
- Cahyaningtias, Sari, Tesis, 2014, "Penerapan Disturbance Compensating Model Predictive Control (DC-MPC) pada Kendali Gerak Kapal" www.digilib.its.ac.id.
- Kamen, Edward W., and Heck, Bonnie S., 2000, "Fundamental of Signals and Systems", 2nd edition, Prentice-Hall, Inc.
- Maciejowski, J.M., 2000, "Predictive Control with Constraint", Prentice-Hall.
- Pakpahan, S., 1987, "Kontrol Otomatik, Teori dan Penerapan", Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Subiantoro, Aries, 2007, "Bahan Kuliah Sistem Kendali Adaptif dan Nonlinear", Departemen Elektro FTUI.
- Wahid, Abdul, dan Imanuddin, H.R. Fazza, 2015, "Pengendali Reaktor Alir Tangki Berpengaduk Menggunakan

Representative Model Predictive Control”,
SINERGI, Vol. 19, No. 3: 227 – 234.

Woods, Robert L., and Lawrence , Kent L., 1997,
“*Modeling and Simulation of Dynamic
Systems*”, Prentice-Hall International, Inc.

Matlab Model Predictive Control Toolbox

DINAMIKA Jurnal Ilmiah Teknik Mesin
