

PERANCANGAN *MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC)* PADA PROSES *QUADRUPLE TANK*

Trio Bowo Setiyo^{*)}, Aris Triwiyatno, and Sumardi

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: *trio_studio@yahoo.com*

Abstrak

Model Predictive Control (MPC) telah berhasil diaplikasikan di berbagai industri proses, karena kemampuannya untuk mengatasi berbagai masalah multivariabel kontrol seperti interaksi, waktu tunda dan batasan. Keuntungan dari MPC karena kedua variabel, yaitu variabel manipulasi dan variabel kontrol, dihitung dengan menggunakan teknik optimasi. Model predictive control (MPC) digunakan untuk mengontrol sistem quadruple tank. Quadruple tank merupakan sistem yang multivariabel, sehingga dengan hanya mengubah satu variabel manipulasi dari satu tangki, maka akan mengubah kondisi dari tangki yang lain. Sistem ini mempunyai adjustment multivariable zero yang dapat diatur dalam keadaan stabil disebelah kiri (left half plane) dan tidak stabil disebelah kanan (right half plane) dengan mengatur bukaan katup, sehingga dapat dioperasikan di kondisi minimum maupun non minimum phase. Dalam penelitian ini, MPC diharapkan mampu mengatasi masalah tracking maupun regulator pada quadruple tank. Dengan nilai parameter MPC, $H_p = 40$, $H_w = 1$, $H_u = 10$, $Q = 100$, $R = 1$, diperoleh hasil yang memuaskan dalam mengatasi masalah tracking maupun regulator, untuk kondisi minimum phase dengan IAE untuk tangki 1 = 71.33 dan tangki 2 = 71.55, sedangkan untuk kondisi non minimum phase dengan IAE untuk tangki 1 = 901.6 dan tangki 2 = 951.1, dibandingkan dengan kontroler Decentralized PI, untuk kondisi minimum phase dengan IAE untuk tangki 1 = 77.6 dan tangki 2 = 92.43, sedangkan untuk kondisi non minimum phase dengan IAE untuk tangki 1 = 681.5 dan tangki 2 = 7938.

Kata kunci : decentralized pi, model predictive control, quadruple tank

Abstract

Model Predictive Control (MPC) has been very successful in the process industries in dealing with multivariable control problem, such as, interactions, time delays, and constraints. The advantage of MPC is that both manipulated and controlled variables are calculated using the optimization techniques. Model predictive control (MPC) is used to control the quadruple tank system. Quadruple tank is a multivariable system, by changing one variable of the tank, it will change the variable of the another tank. This system has a adjustment multivariable zero that can be set in a stable condition on the left (left half plane) and unstable on the right (right half plane) by adjusting the valve, so it can be operated in minimum and non minimum phase. In this work, MPC controller is expected to overcome the problem of tracking and regulator in the quadruple tank. MPC with parameter values, $H_p = 40$, $H_w = 1$, $H_u = 10$, $Q = 100$, $R = 1$, has a good results in overcoming the problem tracking and regulators, for minimum phase with IAE to tank 1 and tank 2 = 71.33 and 71.55, while for non minimum phase with IAE for tank 1 and tank 2 = 901.6 and 951.1, compared with decentralized PI controller for minimum phase with IAE to tank 1 and tank 2 = 77.6 and 92.43, while for non minimum phase with IAE for tank 1 and tank 2 = 681.5 and 7938.

Keywords: decentralized pi, model predictive control, quadruple tank

1. Pendahuluan

Proses di industri umumnya bersifat kompleks, non linear dan multivariabel, sehingga dalam pengontrolannya diperlukan strategi kontroler yang mampu mengatasi permasalahan tersebut. *Quadruple tank* merupakan

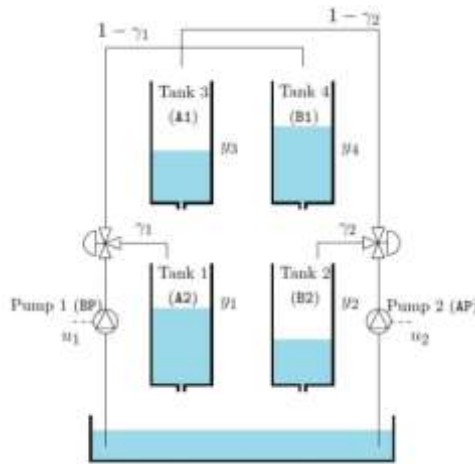
sistem yang multivariabel sekaligus mempunyai karakteristik yang *Right Half Plane* (RHP). Bukti bahwa sistem ini memiliki dinamika yang multivariabel karena setiap pompa mempengaruhi ketinggian dari tangki 1 dan 2^[1].

Dalam penelitian ini, akan dirancang kontroler *Model Predictive Control* (MPC) yang diaplikasikan pada proses *quadruple tank*, sehingga diharapkan kontroler tidak hanya mampu mengikuti referensi yang diinginkan, tetapi juga mampu mengatasi masalah ketidakpastian dan gangguan yang terjadi pada proses *quadruple tank*.

2. Metode

2.1. Quadruple Tank

Quadruple tank didesain sebagai eksperimen konsep multivariabel. *Quadruple tank* merupakan suatu sistem empat tangki bertingkat yang disusun sedemikian rupa sehingga tangki yang satu berhubungan dengan tangki yang lain. Karena saling keterkaitan inilah maka jika dilakukan pengontrolan oleh tangki yang satu maka akan mempengaruhi tangki yang lain. Gambar 1 merupakan skematik *quadruple tank*^[1].



Gambar 1. Skematik proses *quadruple tank*^[1]

Variabel yang dikontrol adalah variabel ketinggian/*level* dari dua tangki di bawah, sedangkan variabel yang dimanipulasi adalah tegangan dari pompa di kedua input tangki tersebut. Sistem ini mempunyai *adjustment multivariable zero* yang dapat diatur dalam keadaan stabil disebelah kiri (*left half plane*) dan tidak stabil disebelah kanan (*right half plane*) dengan mengatur bukaan katup^[1]. Model matematika dari *quadruple tank* ini diturunkan dari persamaan kesetimbangan massa dan persamaan Bernoulli. Jadi persamaan model matematika dari *quadruple tank* seperti persamaan (1) berikut.

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= -\frac{a_1}{A_1}\sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1}\sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1}u_1 \\ \frac{dh_2}{dt} &= -\frac{a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2}\sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2}u_2 \\ \frac{dh_3}{dt} &= -\frac{a_3}{A_3}\sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3}u_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dh_4}{dt} &= -\frac{a_4}{A_4}\sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4}u_1 \\ \gamma_1 &= k_c h_1 \\ \gamma_2 &= k_c h_2 \end{aligned} \quad (1)$$

Dimana

- A_i : luas penampang area tangki i [cm²]
- a_i : luas penampang area outlet tangki i [cm²]
- h_i : level air tangki i [cm]
- g : percepatan gravitasi [cm/s²]
- k_i : konstanta pompa i [cm³V⁻¹s⁻¹]
- v_i : tegangan pada pompa i [V]
- γ_i : katup pembagi aliran air ke tangki [%]
- y_i : keluaran tangki ke i yang diukur [V]
- k_c : faktor konversi tegangan [Vcm⁻¹]

Nilai parameter dari *quadruple tank* dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter *quadruple tank*

| | | |
|------------|----------------------|-------|
| A_1, A_3 | [cm ²] | 28 |
| A_2, A_4 | [cm ²] | 32 |
| a_1, a_3 | [cm ²] | 0.071 |
| a_2, a_4 | [cm ²] | 0.057 |
| k_c | [V/cm] | 0.50 |
| g | [cm/s ²] | 981 |

Nilai parameter titik kerja dari masing-masing tangki saat kondisi P_- (*minimum phase*) dan P_+ (*non minimum phase*) dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Nilai parameter titik kerja sistem

| Parameter | P_- | P_+ |
|----------------------|--------------|--------------|
| h_1^0, h_2^0 | 12.26, 12.78 | 12.44, 13.17 |
| h_3^0, h_4^0 | 1.63, 1.41 | 4.73, 4.98 |
| v_1^0, v_2^0 | 3, 3 | 3.15, 3.15 |
| k_1, k_2 | 3.33, 3.35 | 3.14, 3.29 |
| γ_1, γ_2 | 0.7, 0.6 | 0.43, 0.34 |

Dengan menggunakan deret Taylor, persamaan matematika tersebut menjadi

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & \frac{A_3}{A_1 T_3} & \frac{0}{A_4} \\ 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} \\ (1-\gamma_1)k_1 & (1-\gamma_2)k_2 \\ \frac{A_4}{A_3} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_c & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (2)
\end{aligned}$$

Dimana nilai konstanta waktunya (T_i) adalah

$$T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2x_i^0}{g}}$$

Berikut adalah hasil perhitungan *state space* model diskrit untuk kedua kondisi, *minimum phase* dan *non minimum phase*, dengan waktu sampling yang digunakan adalah 3 detik

Model diskrit *state space* Minimum phase

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \\ x'_4 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.9530 & 0 & 0.1205 & 0 \\ 0 & 0.9674 & 0 & 0.0933 \\ 0 & 0 & 0.8765 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9051 \end{bmatrix}}_A \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} 0.2438 & 0.0089 \\ 0.0045 & 0.1854 \\ 0 & 0.1345 \\ 0.0891 & 0 \end{bmatrix}}_B u,$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_C x \quad (3)$$

Model diskrit *state space* Non Minimum phase

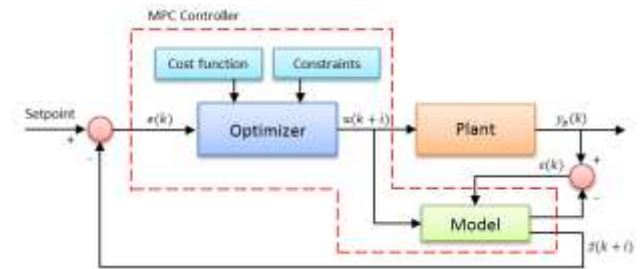
$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \\ x'_4 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.9534 & 0 & 0.0728 & 0 \\ 0 & 0.9679 & 0 & 0.0508 \\ 0 & 0 & 0.9255 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9484 \end{bmatrix}}_A \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} 0.1413 & 0.0086 \\ 0.0043 & 0.1032 \\ 0 & 0.2239 \\ 0.1634 & 0 \end{bmatrix}}_B u,$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_C x \quad (4)$$

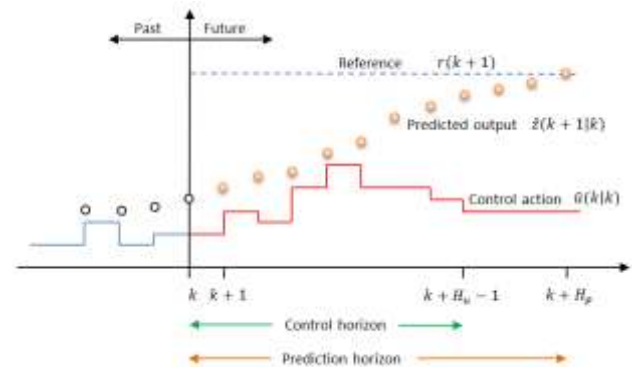
2.2. Model Predictive Control

Model Predictive Control merupakan salah satu algoritma sistem kontrol berbasis model (*model based control system*), dimana suatu model proses digunakan secara eksplisit bagi penentuan sinyal kontrol. Sistem kontrol prediktif mempunyai 3 elemen utama yaitu, model proses, untuk memprediksi output proses yang akan datang sepanjang horison prediksi. Fungsi kriteria, untuk menyatakan performansi sistem kontrol dan Prosedur optimasi, untuk meminimumkan fungsi kriteria. Blok diagram dari MPC seperti terlihat pada gambar 2.



Gambar 2. Struktur Dasar MPC

Skema MPC memanfaatkan prinsip *receding horizon*, seperti yang terlihat pada gambar 3.



Gambar 3. Skema prinsip *receding horizon*^[4]

Seperti yang telah dinyatakan sebelumnya bahwa perhitungan sinyal kontrol pada MPC dilakukan dengan meminimumkan suatu fungsi kriteria. Fungsi kriteria yang digunakan dalam algoritma MPC berbentuk kuadratik seperti berikut^[4]:

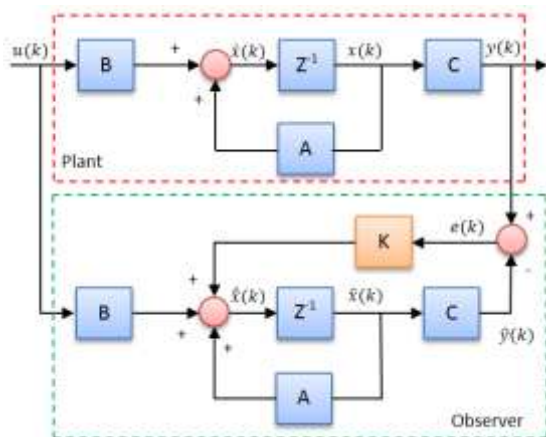
$$\begin{aligned}
J(k) &= \sum_{i=H_w}^{H_p} [\hat{z}(k+i|k) - r(k+i|k)]_Q^2 \\
&+ \sum_{i=0}^{H_u-1} [\Delta \hat{u}(k+i|k)]_R^2 \quad (5)
\end{aligned}$$

Dimana

- $\hat{z}(k+i|k)$ = keluaran terprediksi untuk i langkah kedepan saat waktu k
- $r(k+i|k)$ = nilai trayektori acuan (*reference trajectory*)
- $\Delta\hat{u}(k+i|k)$ = perubahan sinyal kontrol terprediksi untuk i langkah kedepan saat waktu k
- $Q(i)$ dan $R(i)$ = faktor bobot
- H_p = *prediction horizon*
- H_u = *control horizon*

2.3. State Observer

Algoritma untuk mendapatkan sinyal kontrol optimal pada setiap *sampling* selalu mengasumsikan bahwa vektor *state* saat ini tersedia. Karena hal ini sering tidak terjadi, estimasi state diperlukan. Dalam hal ini digunakan kalman filter sebagai estimator, sekaligus sebagai penguat observer. Dalam penelitian ini, akan digunakan dua mode, untuk mode 2 yaitu observer dengan umpan balik output, sedangkan mode yang lain adalah mode 4 yaitu observer gangguan dengan umpan balik output. Diagram blok state observer seperti pada gambar 4^[4].



Gambar 4. Diagram blok state observer

Dari diagram blok state observer, dapat dicari persamaan state observer menjadi :

$$\dot{\hat{x}}(k) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + K(y(k) - C_y\hat{x}(k)) \quad (6)$$

2.5. Strategi Model Predictive Control

Fungsi kriteria yang akan diminimumkan pada persamaan (5) dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$V(k) = \|Z(k) - T(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 \quad (8)$$

Dimana

$$Z(k) = \begin{bmatrix} \hat{z}(k + H_w|k) \\ \vdots \\ \hat{z}(k + H_p|k) \end{bmatrix} \quad T(k) = \begin{bmatrix} r(k + H_w|k) \\ \vdots \\ r(k + H_p|k) \end{bmatrix}$$

$$\Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k + H_u - 1|k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Dan matriks bobot Q dan R

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

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

Dari persamaan ruang keadaan model proses, diperoleh persamaan keluaran Y sebagai berikut:

$$Y(k) = \psi x(k) + \Gamma u(k - 1) + \theta \Delta U(k) \quad (10)$$

Didefinisikan suatu matriks (*tracking error*) penjejukan kesalahan E , dimana matriks ini merupakan perbedaan antara nilai trayektori dengan respon bebas dari sistem. Respon bebas merupakan respon yang terjadi selama *prediction horizon* dan tidak terjadi perubahan sinyal masukan ($\Delta u(k) = 0$).

$$E(k) = T(k) - \psi x(k) + \Gamma u(k - 1) \quad (11)$$

Sehingga dapat ditulis kembali dalam bentuk yang mengandung matriks $E(k)$ dan $(\Delta u(k))$ sebagai berikut

$$J(k) = \underbrace{E(k)^T Q E(k)}_{konst} - \underbrace{\Delta U(k)^T}_{G} 2\theta^T Q E(k) + \underbrace{\Delta U(k)^T}_{H} [\theta^T Q \theta + R] \Delta U(k)$$

$$J(k) = konst - \Delta U(k)^T G + \Delta U(k)^T H \Delta U(k) \quad (12)$$

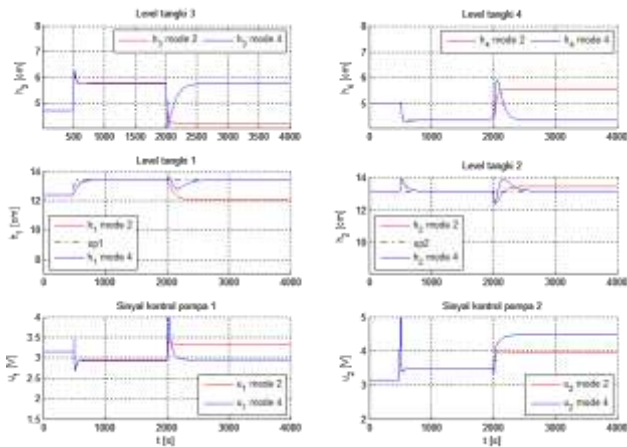
Dimana

$$G = 2\theta^T Q E(k)$$

$$H = \theta^T Q \theta + R \quad (13)$$

Nilai optimal $\Delta U(k)$ dapat dihitung dengan membuat gradien dari $J(k)$ bernilai nol. Gradien dari $V(k)$ pada persamaan (12) adalah sebagai berikut:

$$\nabla_{\Delta U(k)} J(k) = -G + 2H \Delta U(k) \quad (14)$$



Gambar 7. Simulasi MPC (state observer) ketika ada input disturbance kondisi NMP

Di simulasi kedua, kontroler mode 4 digunakan. Dalam kasus ini, observer gangguan digunakan untuk memperkirakan *state* vektor dan *state* gangguan. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 7 berupa garis warna biru, respon sistem mampu mempertahankan kondisi *steady* ketika terjadi gangguan.

3.3 Pengujian Respon Sistem

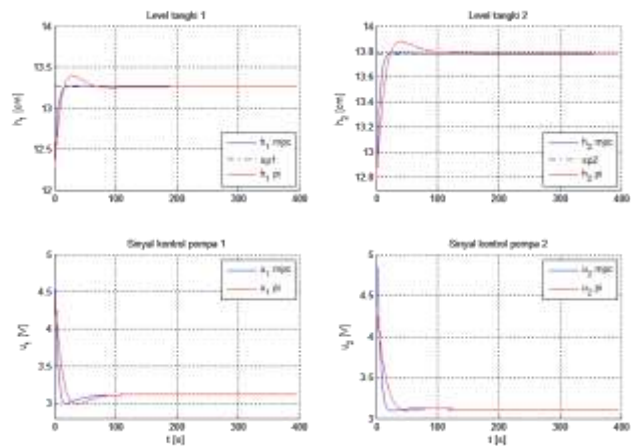
Dalam pengujian respon sistem ini, akan dilakukan tiga simulasi, diantaranya respon sistem terhadap sinyal step, kemudian respon terhadap input gangguan dan respon terhadap problem servo sekaligus problem regulator. Pengujian ini akan membandingkan respon sistem hasil MPC dan Decentralized PI, sekaligus membandingkan nilai indeks performansinya. Nilai tuning parameter PI diperoleh dari hasil percobaan Johansson, untuk kondisi *minimum phase* nilai parameter $(K_1, T_{i1}) = (3.0, 30)$ dan $(K_2, T_{i2}) = (2.7, 40)$. Sedangkan nilai parameter untuk kondisi *non minimum phase* $(K_1, T_{i1}) = (1.5, 110)$ dan $(K_2, T_{i2}) = (-0.12, 220)$.

Nilai indeks performansi kontroler ditentukan dengan IAE (*Integral Absolute Error*) dan ISE (*Integral Square Error*). Untuk mencari nilai keduanya digunakan persamaan.

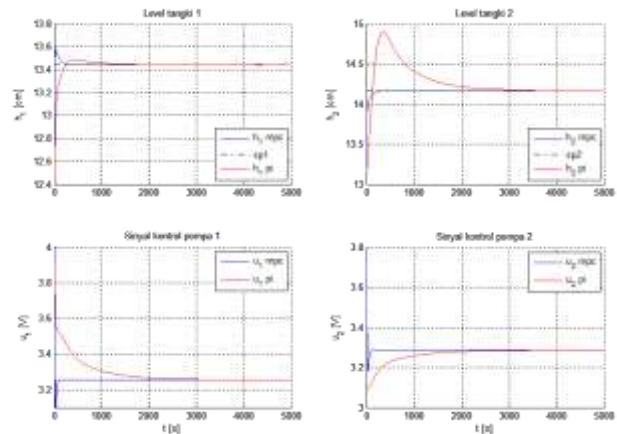
$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|.dt \quad ISE = \int_0^{\infty} e^2(t).dt$$

1. Respon sistem terhadap input step

Dalam pengujian kali ini, akan dibandingkan respon step dari masing-masing kontroler, MPC dan PI, untuk kondisi *Minimum Phase* (gambar 8) maupun *Non Minimum Phase* (gambar 9) pada *quadruple tank*. Indeks performansi dari masing-masing kontroler seperti yang ditampilkan dalam tabel 4.



Gambar 8. Perbandingan respon input step MPC dan PI kondisi MP



Gambar 9. Perbandingan respon input step MPC dan PI kondisi NMP

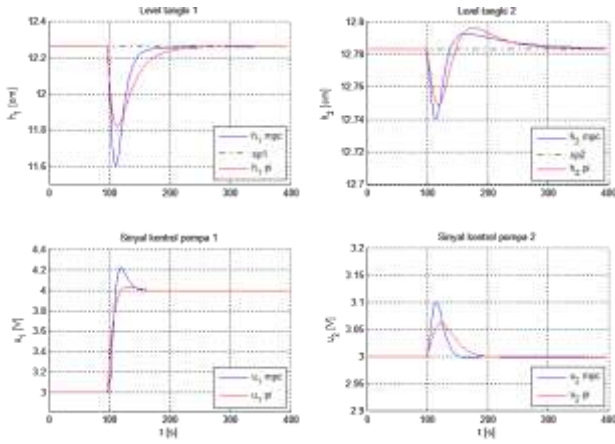
Tabel 4. Indeks Performansi kontroler MPC dengan PI

| Kontroler | IP | MP | | NMP | |
|-----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| | | Tangki 1 | Tangki 2 | Tangki 1 | Tangki 2 |
| PI | IAE | 5.234 | 6.731 | 38.49 | 315.2 |
| MPC | IAE | 2.51 | 2.732 | 9.259 | 12.31 |
| PI | ISE | 0.947 | 1.308 | 4.891 | 73 |
| MPC | ISE | 0.6619 | 0.7568 | 1.163 | 1.812 |

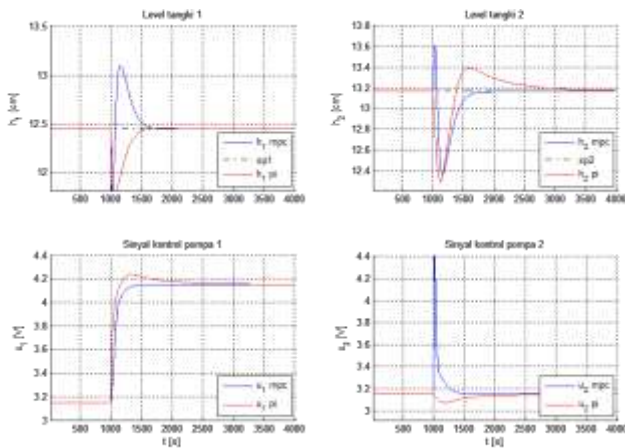
2. Respon sistem terhadap gangguan sinyal input

Pengujian selanjutnya yaitu respon sistem ketika ada gangguan pada input. Pada simulasi ini akan dibandingkan kontroler MPC, dengan kontroler Decentralized PI. Pada simulasi ini, kedua tangki dalam kondisi *steady*. Kemudian pada saat $t = 100s$ untuk kondisi *Minimum Phase*, dan pada saat $t = 1000s$ untuk kondisi *Non Minimum Phase*, terdapat gangguan berupa sinyal step pada pompa 1. Hasil respon terhadap input gangguan dapat dilihat pada gambar 10 untuk kondisi

Minimum Phase dan gambar 11 untuk kondisi Non Minimum Phase.



Gambar 10. Perbandingan respon MPC dan PI kondisi MP terhadap input gangguan



Gambar 11. Perbandingan respon MPC dan PI kondisi NMP terhadap input gangguan

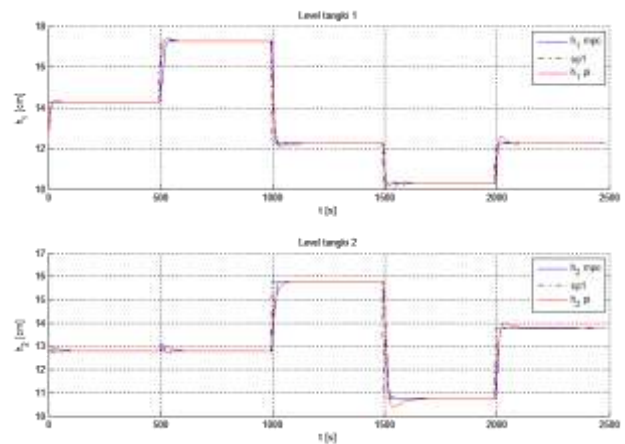
Tabel 5. Indeks Performansi kontroler MPC dengan PI

| Kontroler | IP | MP | | NMP | |
|-----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| | | Tangki 1 | Tangki 2 | Tangki 1 | Tangki 2 |
| PI | IAE | 10 | 0.9807 | 82.06 | 188.8 |
| MPC | IAE | 8.916 | 0.9494 | 97.14 | 106.9 |
| PI | ISE | 1.435 | 0.0086 | 19.45 | 38.44 |
| MPC | ISE | 1.917 | 0.0089 | 22.57 | 28.18 |

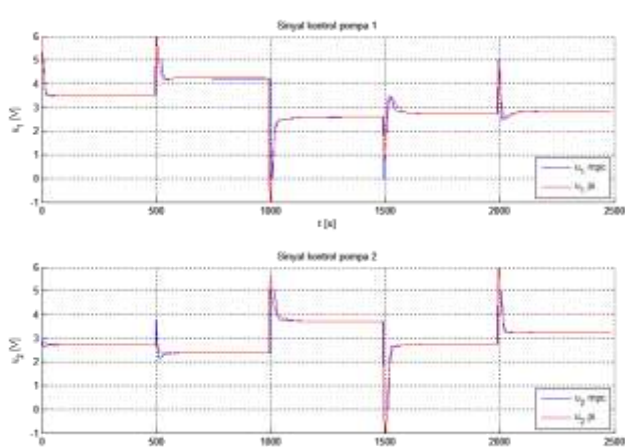
3. Respon sistem terhadap problem servo dan regulator

Dalam pengujian kali ini, akan dibandingkan respon masing-masing kontroler terhadap *problem tracking* atau servo maupun regulator. *Plant quadruple tank* idealnya merupakan *problem tracking*, karena ketinggian suatu tangki ditentukan dari nilai referensi yang diharapkan, tetapi bisa juga menjadi *problem regulator* ketika ada

gangguan baik dari input sinyal kontrol maupun dari output keluaran tangki.



Gambar 12. Respon sistem pada sinyal keluaran kondisi MP

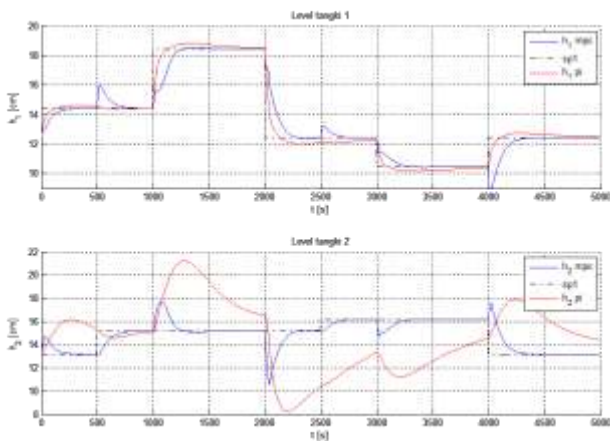


Gambar 13. Respon sistem pada sinyal kontrol kondisi MP

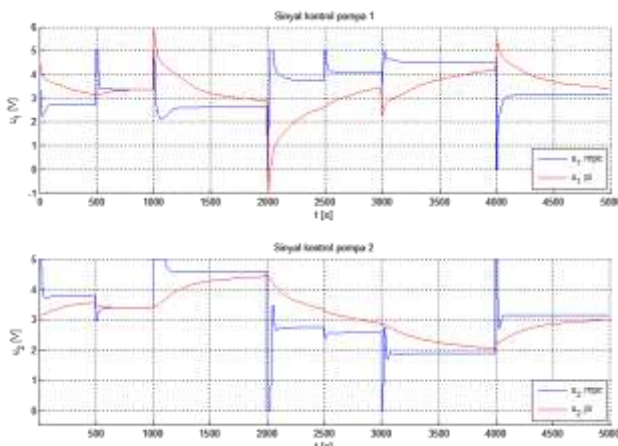
Dari hasil pengujian, diperoleh indeks performansi dari masing-masing kontroler terhadap pengaruh *proble servo* maupun regulator, seperti yang terlihat pada tabel 6.

Tabel 6. Indeks Performansi kontroler MPC dengan PI

| Kontroler | IP | MP | | NMP | |
|-----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| | | Tangki 1 | Tangki 2 | Tangki 1 | Tangki 2 |
| PI | IAE | 77.6 | 92.43 | 681.5 | 7938 |
| MPC | IAE | 71.33 | 71.55 | 901.6 | 951.1 |
| PI | ISE | 56.49 | 73.57 | 329.4 | 1.65e4 |
| MPC | ISE | 79.63 | 84.64 | 952.6 | 954.2 |



Gambar 14. Respon sistem pada sinyal keluaran kondisi NMP



Gambar 15. Respon sistem pada sinyal kontrol kondisi NMP

Untuk kondisi *minimum phase*, seperti yang terlihat pada gambar 12 dan 13, kedua kontroler baik MPC maupun PI, terlihat mampu mengikuti referensi yang diharapkan, dapat diketahui dari tabel 6, indeks performansi keduanya relatif lebih bagus. Hanya saja sinyal kontrol yang digunakan pada kontroler PI melanggar batas (*constraints*) dari yang diharapkan. Sedangkan untuk kondisi *non minimum phase*, seperti yang terlihat pada gambar 14 dan 15, kontroler MPC terbukti mampu mengikuti referensi yang diharapkan dibandingkan dengan kontroler Decentralized PI. Disamping itu juga, kontroler PI terlihat melanggar batas (*constraints*) dari yang diharapkan, baik itu pada sinyal keluaran yang melebihi 20cm, maupun pada sinyal kontrol pompa yang melebihi 5V. Pada kontroler PI, sinyal keluaran terlihat bagus hanya pada tangki 1 saja, sedangkan pada tangki 2 sinyal keluaran lebih buruk. Hal ini bisa disebabkan karena tidak adanya *decoupling* pada kontroler PI yang digunakan, sehingga menyebabkan kontroler tidak mampu mengatasi adanya pengaruh interaksi pada sistem. Seperti yang terlihat pada tabel 6, kontroler MPC

mempunyai hasil yang memuaskan, baik pada sinyal keluaran maupun pada sinyal kontrolnya. Hal ini membuktikan bahwa kontroler MPC mampu mengatasi problem *non minimum phase* sekaligus mampu mempertahankan batasan (*constraints*) pada sinyal kontrol maupun pada sinyal keluaran di tangki.

4. Kesimpulan

Dari hasil dan analisa simulasi yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu Parameter kontroler MPC yang digunakan untuk mengontrol *quadruple tank*, $H_p = 40$, $H_w = 1$, $H_u = 10$, $Q = 100$, $R = 1$, diperoleh hasil yang memuaskan dalam mengatasi masalah tracking maupun regulator, untuk kondisi minimum phase dengan IAE untuk tangki 1 = 71.33 dan tangki 2 = 71.55, sedangkan untuk kondisi non minimum phase dengan IAE untuk tangki 1 = 901.6 dan tangki 2 = 951.1, dibandingkan dengan kontroler Decentralized PI, untuk kondisi minimum phase dengan IAE untuk tangki 1 = 77.6 dan tangki 2 = 92.43, sedangkan untuk kondisi non minimum phase dengan IAE untuk tangki 1 = 681.5 dan tangki 2 = 7938.

Untuk pengembangan sistem lebih lanjut, dapat dilakukan identifikasi sistem untuk mendapatkan model yang tetap mempertahankan sifat non linear, bisa dengan menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan.

Referensi

- [1]. Johansson, Karl H. *The Quadruple Tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000.
- [2]. Camacho, E. F., and Bordons, C., *Model Predictive Control*, Springer-Verlag, 1999.
- [3]. Fahrudin, Ridwan, *Perancangan Pengendali Model Predictive Control (MPC) Pada Sistem Heat Exchanger Dengan Jenis Karakteristik Shell and Tube*, Tesis Jurusan Elektro FTUI, Depok, 2010.
- [4]. Maciejowski, J. M., *Predictive Control with Constraints*, Prentice-Hall, 2001.
- [7]. Akesson, J., *MPCtools 1.0 –Reference Manual*, Technical Report ISRN LUTFD2, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 2006. Akesson, J., *MPCtools 1.0 –Reference Manual*, Technical Report ISRN LUTFD2, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 2006.
- [8]. Fachpraktikum, IfA., *Experiment 3.4: Quad Tanks*, Automatic Control Laboratory, ETH Zurich, 2011.
- [9]. Process Control in the Chemical Industries, *Model Predictive Control: an Introduction*, Chemical Engineering Department King Saud University, 2002.