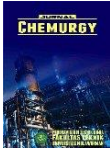


	<p style="text-align: center;"><b>JURNAL CHEMURGY</b></p> <p style="text-align: center;">E-ISSN 2620-7435</p> <p style="text-align: center;">Available online at <a href="http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK">http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK</a></p>	 <p style="text-align: center;">SINTA Accreditation No. 200/M/KPT/2020</p>
---	--	---

## DESAIN INVERS *DECOUPLING* PADA SISTEM MIMO 3×3 DENGAN PENGENDALI PID

### *INVERTED DECOUPLING DESIGN FOR MIMO 3×3 SYSTEMS WITH PID CONTROLLER*

**Zahrotul Azizah\***

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Nahdlatul Ulama Sidoarjo, Sidoarjo 61218, Indonesia

\*email: azizah.tkm@unusida.ac.id

(Received: 12 April 2022; Reviewed: 19 Mei 2022; Accepted: 16 Juni 2022)

#### **Abstrak**

Proses yang ada di industri dikategorikan ke dalam sistem multi input multi output (MIMO) yang terdiri dari banyak masukan dan keluaran dimana antar variabel pada proses saling berkaitan satu sama lain. Adanya interaksi menyebabkan perancangan pengendali menjadi tidak mudah. Bahkan interaksi yang sangat kuat dapat memperburuk kinerja dari pengendali. Salah satu cara untuk mengurangi interaksi adalah menambahkan *decoupling* pada sistem pengendali. Terdapat beberapa macam *decoupling*, namun invers *decoupling* dipilih karena mampu mengurangi interaksi secara signifikan. Penelitian ini bertujuan menambahkan invers *decoupling* pada sistem MIMO dengan ukuran yang lebih besar yaitu 3×3. Ukuran sistem yang lebih besar menyebabkan perhitungan *decoupling* yang semakin rumit. Pengendali PID dan skema invers *decoupling* menjadi strategi pengendalian yang dipilih. *Shell Heavy Oil Fractionator* (SHOF) oleh Garcia digunakan sebagai contoh ilustrasi sistem MIMO 3×3 untuk menunjukkan hasil kinerja terhadap skema pengendali yang diusulkan. Berdasarkan hasil simulasi, nilai IAE pada penambahan invers *decoupling* lebih kecil dibandingkan dengan tanpa *decoupling*.

**Kata Kunci:** invers *decoupling*, MIMO 3×3, Pengendali PID

#### **Abstract**

*The processes in the industry are categorized into a multi-input multi-output (MIMO) system, which consists of many inputs and outputs where the variables in the process are interrelated with each other. The interaction causes the controller design to be difficult. Even very strong interactions can worsen the performance of the controller. One way to reduce interaction is to add decoupling to the control system. There are several kinds of decoupling, but inverse decoupling was chosen because it can reduce the interaction significantly. This study aims to add inverse decoupling to the MIMO system with a larger size, namely 3×3. Larger system sizes lead to more complicated decoupling calculations. PID controller and inverse decoupling scheme became the chosen control strategy. Shell Heavy Oil Fractionator (SHOF) by Garcia is used as an illustrative example of a 3×3 MIMO system to demonstrate the performance results against the proposed control scheme. Based on the simulation results, the IAE value with the addition of inverse decoupling is smaller than without decoupling.*

**Keywords:** *inverted decoupling, MIMO 3×3, PID controller*

#### **1. PENDAHULUAN**

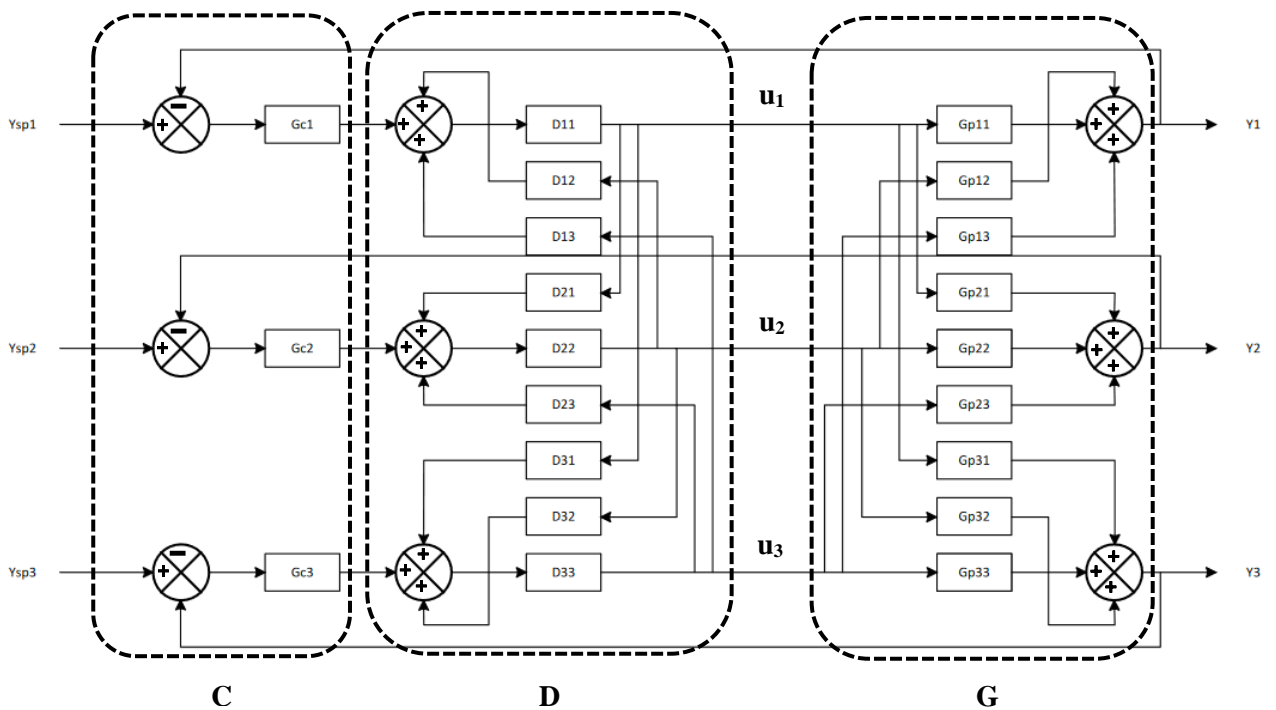
Terdapat beberapa jenis *decoupling* yaitu ideal *decoupling* (Luyben, 1970), *simplified decoupling* (Gagnon, Pomerleau dan Desbiens, 1998), dan invers *decoupling* (Wade, 1997). Penelitian terdahulu

menyebutkan bahwa skema *decoupling* hanya fokus pada sistem dua input dua output (TITO). Azizah dkk., melakukan penelitian tentang invers *decoupling* pada sistem MIMO 2x2 dengan menggunakan pengendali *One Degree of Freedom Internal Model Control* (1DoF IMC). Hasil yang diperoleh pada penambahan invers *decoupling*, nilai IAE yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan tanpa invers *decoupling* (Azizah et al., 2020). Kemudian penelitian dilanjutkan dengan mengganti pengendali dengan 2DoF IMC. Hasil yang didapatkan adalah invers *decoupling* mampu mengurangi interaksi secara signifikan (Juwari Purwo Sutikno et al., 2019). Namun, tidak banyak penelitian yang mengemukakan tentang *decoupling* untuk sistem MIMO 3x3. Hal ini karena ukuran sistem yang lebih besar menyebabkan perhitungan *decoupling* yang semakin rumit. Penelitian ini bertujuan menambahkan invers *decoupling* pada sistem MIMO dengan ukuran yang lebih besar yaitu 3x3.

Adanya pengendali terpusat dengan menggunakan PID dan *decoupling* merupakan strategi pengendalian yang dipilih dalam proses di industri untuk memecahkan masalah pengendalian yang bersifat multivariabel dibandingkan dengan *model predictive control* (MPC) (Garrido, Vázquez dan Morilla, 2011; Garrido, Vázquez dan Morilla, 2014).

Garrido dkk., (2014) menjelaskan bahwa *decoupler* terbagi menjadi dua matriks yaitu matriks Dd yang merupakan jalur langsung antara keluaran pengendali (c) dan input proses (u) dan matriks Do yang merupakan loop umpan balik (*feedback*) antara input proses (u) dan output pengendali (c).

Matriks Dd memiliki sejumlah n elemen dan bukan nol karena hanya ada koneksi langsung untuk setiap input proses. Namun hubungan ini tidak diperlukan dalam matriks Do. Hal ini karena arah aliran Do berlawanan arah dengan Dd. Elemen Do yang harus sama dengan nol adalah transpos elemen bukan nol dari Dd (Garrido, Vázquez dan Morilla, 2014).



Gambar 1. Skema invers *decoupling* pada sistem MIMO 3x3

Misalnya dalam proses 3x3, apabila elemen Dd (3,1) ditetapkan sebagai jalur langsung antara u3 dan c1 maka tidak ada umpan balik dari u3 ke c1 sehingga elemen Do (1,3) harus sama dengan nol.

Berdasarkan gambar decoupler pada Gambar 1, matriks decoupler D diperoleh sebagai berikut:

$$D = Dd \times (1 - Do \times Dd)^{-1} \quad (1)$$

Matriks transfer fungsi dari konvensional *decoupling* berhubungan dengan struktur invers *decoupling* berdasarkan persamaan (9). Karena persamaan tersebut kompleks, lebih mudah menggunakan inversnya yang sederhana sebagai berikut:

$$D^{-1} = (1 - Do \times Dd) \times Dd^{-1} = Dd^{-1} - Do \quad (2)$$

Persamaan invers *decoupling*

$$D^{-1} = Q^{-1} \times G \quad (3)$$

Substitusi persamaan 11 ke persamaan 10 menjadi

$$Dd^{-1} - Do = Q^{-1} \times G \quad (4)$$

Persamaan 12 digunakan untuk menghitung elemen dari invers *decoupling*. Persamaan tersebut sangat sederhana tidak bergantung pada ukuran sistem. Matriks Q dipilih menjadi diagonal dan pengurangan yang dihasilkan dari invers Dd sedangkan Do adalah matriks transfer dengan satu elemen yang dihitung di setiap posisi. Dd harus bersifat non-singular karena berbentuk invers. Saat elemen dipilih maka hanya satu elemen di setiap baris dan kolom yang dapat dipilih sehingga untuk proses  $n \times n$  hanya ada  $n!$  yang menjadi kemungkinan pilihan Dd. Pada penelitian ini, sistem yang digunakan adalah MIMO  $3 \times 3$ , maka konfigurasi yang dipilih adalah 1-2-3 sehingga elemen Dd yang dipilih adalah (1,1), (2,2), (3,3).

Konfigurasi *decoupling* untuk sistem MIMO  $3 \times 3$  seperti pada persamaan (5).

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{dd_{11}} & -do_{12} & -do_{13} \\ -do_{21} & \frac{1}{dd_{22}} & -do_{23} \\ -do_{31} & -do_{32} & \frac{1}{dd_{33}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Gp_{11}}{q_1} & \frac{Gp_{12}}{q_1} & \frac{Gp_{13}}{q_1} \\ \frac{Gp_{21}}{q_2} & \frac{Gp_{22}}{q_2} & \frac{Gp_{23}}{q_2} \\ \frac{Gp_{31}}{q_3} & \frac{Gp_{32}}{q_3} & \frac{Gp_{33}}{q_3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Hasil perkalian matriks pada persamaan (5):

$$dd_{11} = \frac{q_1}{Gp_{11}} \quad (6)$$

$$do_{12} = -\frac{Gp_{12}}{q_1} \quad (7)$$

$$do_{13} = -\frac{Gp_{13}}{q_1} \quad (8)$$

$$do_{21} = -\frac{Gp_{21}}{q_2} \quad (9)$$

$$dd_{22} = \frac{q_2}{Gp_{22}} \quad (10)$$

$$do_{23} = -\frac{Gp_{23}}{q_2} \quad (11)$$

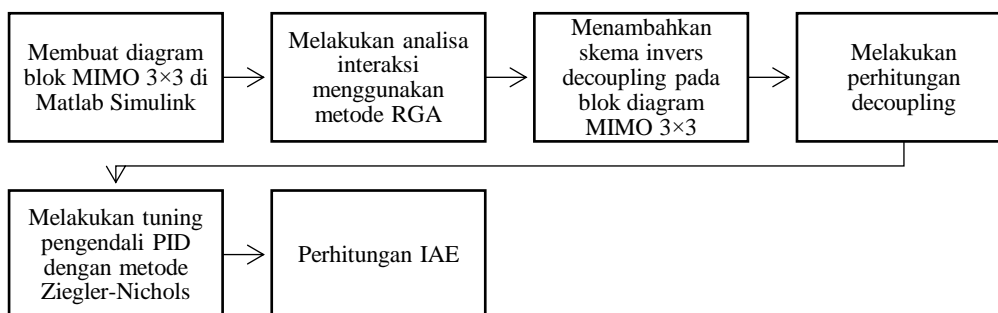
$$do_{31} = -\frac{Gp_{31}}{q_3} \quad (12)$$

$$do_{32} = -\frac{Gp_{32}}{q_3} \quad (13)$$

$$dd_{33} = \frac{q_3}{Gp_{33}} \quad (14)$$

## 2. METODOLOGI

Diagram alir penelitian ini disajikan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

### 2.1 Studi Kasus

Contoh ilustrasi yang digunakan untuk mensimulasikan sistem MIMO 3×3 yaitu menggunakan SHOF yang dikemukakan oleh Garcia dengan transfer fungsi pada persamaan (1).

$$\begin{bmatrix} \frac{4.05e^{-27s}}{50s+1} & \frac{1.77e^{-28s}}{60s+1} & \frac{5.88e^{-27s}}{50s+1} \\ \frac{5.39e^{-18s}}{50s+1} & \frac{5.72e^{-14s}}{60s+1} & \frac{6.9e^{-15s}}{40s+1} \\ \frac{4.38e^{-20s}}{33s+1} & \frac{4.42e^{-22s}}{44s+1} & \frac{7.2}{19s+1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

### 2.2 Analisa Interaksi

Matriks *gain steady state* (K) pada sistem MIMO 3×3 sebagai berikut:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Apabila R adalah matriks transpose dari invers matriks K, maka

$$R = (K^{-1})^T \quad (17)$$

RGA merupakan hasil perkalian K dengan R:

$$RGA = K * R \quad (18)$$

Hasil RGA yang dipilih adalah variabel yang menghasilkan harga elemen RGA mendekati satu dan positif (Seborg *et al.*, 2011).

### 2.3 Pengendali PID

Metode Ziegler-Nichols (Z-N) (Seborg *et al.*, 2011) digunakan untuk mendapatkan parameter pengendali yang sesuai. Persamaan (5) – (7) merupakan rumus untuk mendapatkan parameter pengendali PID dengan metode Z-N.

$$K_c = 0,6K_{cu} \quad (19)$$

$$\tau_I = \frac{P_u}{2} \quad (20)$$

$$\tau_D = \frac{P_u}{8} \quad (21)$$

Pada sistem MIMO, interaksi menyebabkan tuning pengendali sulit dilakukan. Hal ini karena metode tuning Z-N dapat berfungsi dengan baik pada sistem SISO (*Single Input Single Output*) sehingga diperlukan metode detuning pengendali, artinya parameter yang telah didapatkan dari hasil tuning selanjutnya dilakukan tuning kembali. Metode yang digunakan adalah metode detuning Mc Avoy. *Gain* pengendali dikurangi dengan harga relative gainnya, yang secara matematis ditulis:

$$K_{Cma} = (K - \sqrt{K^2 - \bar{K}}) \times Kc_{zn} \quad (22)$$

Dimana

K : Gain pengendali

K<sub>Cma</sub> : Gain pengendali Mc Avoy

K<sub>Czn</sub> : Gain pengendali Ziegler-Nichols

### 2.4 Perhitungan IAE

*Integral Absolute Error* (IAE) adalah metode untuk menghitung eror yang dihasilkan dari respon sebuah proses dengan *setpoint* yang diinginkan. Bentuk persamaan IAE disajikan dalam persamaan 23.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (23)$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi kasus dilakukan pada sistem MIMO 3×3 yaitu menggunakan SHOF yang dikemukakan oleh Garcia. Pada transfer fungsi tersebut, pertama dilakukan analisa interaksi menggunakan RGA dengan hasil pada persamaan (20).

$$\begin{bmatrix} 2.0757 & -0.7289 & -0.3468 \\ 3.4242 & 0.9343 & -3.3585 \\ -4.4999 & 0.7946 & 4.7053 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Berdasarkan hasil yang diperoleh, pairing yang dipilih adalah 1-1/2-2/3-3 karena pada diagonal tersebut bernilai positif. Pemilihan pairing yang tepat akan meminimalkan adanya interaksi antar variabel proses.

Selanjutnya melakukan tuning parameter pengendali PID. Pengendali PID merupakan salah satu strategi yang banyak dipakai pada pengendalian variabel yang ada di industri. Hasil survei yang dilakukan oleh Setiawan (2008) menjelaskan bahwa PID digunakan sekitar 97% di industr. Hal ini karena strukturnya yang sederhana dan tuning yang mudah. Tabel 1 merupakan hasil tuning parameter pengendali PID dengan metode Ziegler-Nichols. Tabel 2 merupakan hasil detuning parameter pengendali PID dengan metode Mc Avoy.

Tabel 1. Hasil Tuning Parameter dengan Ziegler Nichols

Pairing Controller	Parameter			PID		
	$\omega_c$	$K_{cu}$	$P_u$	$K_c$	$T_i$	$T_D$
1-1	0.069	0.88	91.52	0.53	45.76	11.44
2-2	0.122	1.29	51.56	0.77	25.78	6.45
3-3	15.726	41.50	0.40	24.90	0.20	0.05

Tabel 2. Hasil Detuning Parameter dengan Mc Avoy

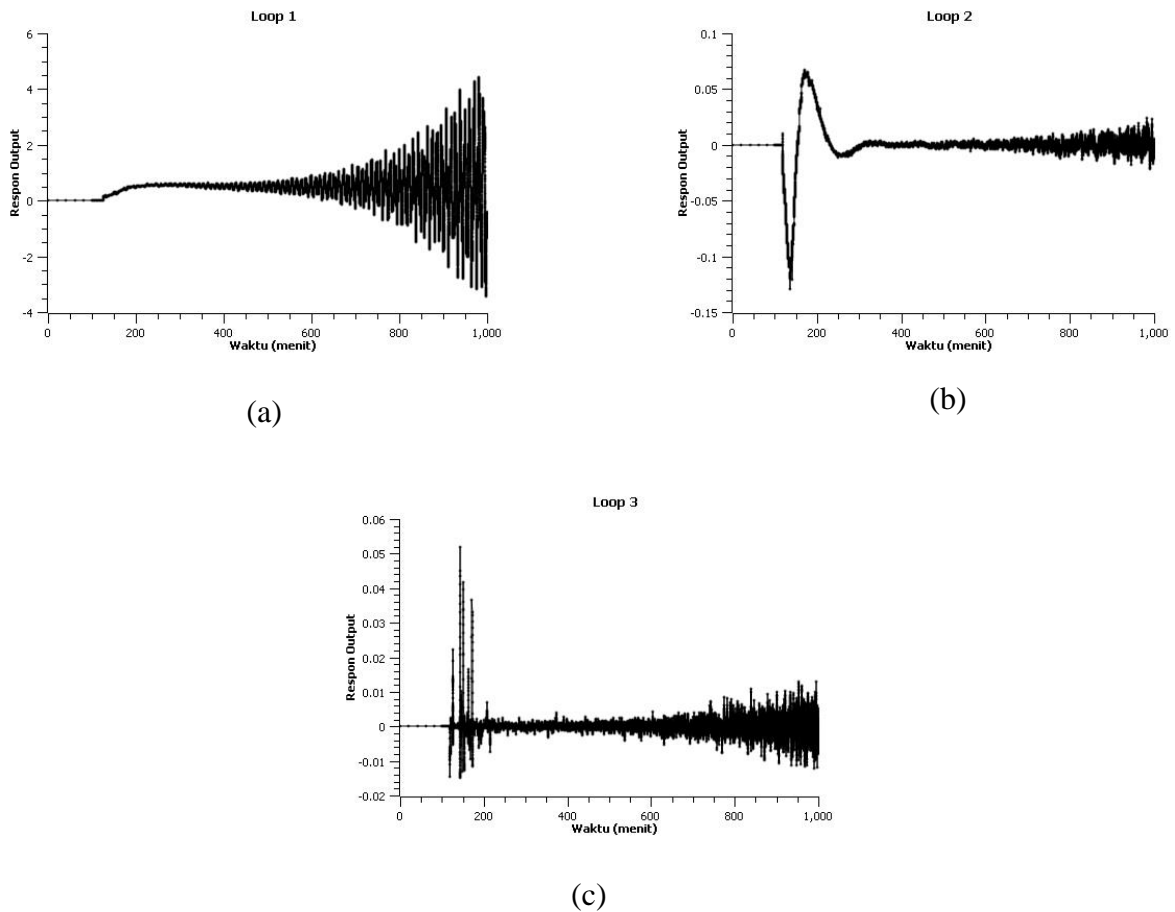
Pairing Controller	PI dan PID		
	$K_c$	$T_i$	$T_D$
1-1	0.31	45.76	11.44
2-2	0.45	25.78	6.45
3-3	14.48	0.20	0.05

Hasil perhitungan *decoupling* berdasarkan persamaan (6) sampai (14):

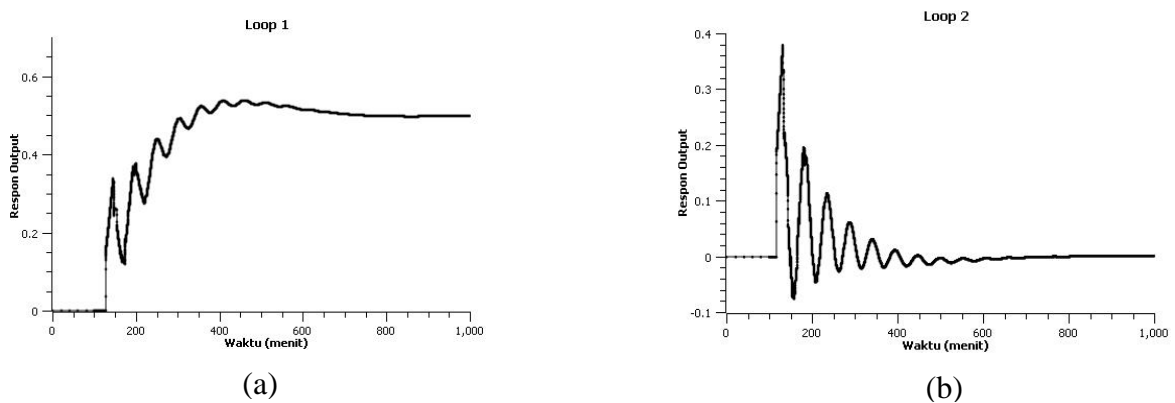
$$D = \begin{bmatrix} 1 & -0.437 \left( \frac{50s + 1}{60s + 1} \right) e^{-28s} & -1.4518 \\ -0.9423 \left( \frac{60s + 1}{50s + 1} \right) e^{-4s} & 1 & -1.2063 \left( \frac{60s + 1}{40s + 1} \right) e^{-s} \\ -0.6083 \left( \frac{19s + 1}{33s + 1} \right) e^{-20s} & -0.6139 \left( \frac{19s + 1}{44s + 1} \right) e^{-22s} & 1 \end{bmatrix}$$

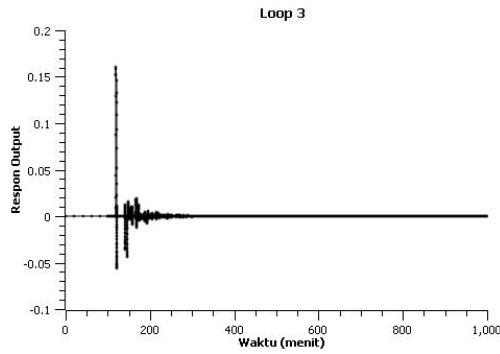
Perubahan *step* dilakukan saat respon telah *steady* yaitu pada menit ke 100. Besarnya *step* yang digunakan pada loop 1 sebesar 0,5. Respon yang dihasilkan pada Gambar 3, baik pada loop 1,2, maupun 3 menghasilkan respon yang tidak stabil. Artinya pengendali tidak mampu mengendalikan sistem saat sistem tersebut diberi perubahan.

Selanjutnya hal yang sama dilakukan pada sistem yang sudah diberi tambahan invers *decoupling*. Respon yang dihasilkan pada Gambar 4 yaitu respon output pada loop 1 mampu mencapai setpoint baru berdasarkan perubahan step yang diberikan yaitu sebesar 0,5. Loop 2 dan 3 dapat kembali ke setpoint semula. Hal ini membuktikan bahwa adanya perubahan variabel pada loop 1 tidak banyak memberikan perubahan pada loop lainnya karena interaksi antar variabel telah diminimalisir oleh invers *decoupling*.



Gambar 3. Respon output tanpa *decoupling* pada (a) Loop 1; (b) Loop 2; (c) Loop 3





(c)

Gambar 4. Respon output dengan invers *decoupling* pada (a) Loop 1; (b) Loop 2; (c) Loop 3  
 Setiap respon output yang didapat, dihitung nilai IAE nya untuk melihat eror secara kuantitatif. Berdasarkan hasil pada tabel 3, terbukti nilai IAE lebih kecil untuk penambahan invers *decoupling* dibandingkan dengan tanpa *decoupling*.

Tabel 3. Hasil Nilai IAE

Nilai IAE	Tanpa <i>Decoupling</i>	Invers <i>Decoupling</i>
Loop 1	325,5	52,9
Loop 2	6,832	19,41
Loop 3	0,4516	0,1916

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi diperoleh respon output pada skema pengendali dengan invers *decoupling* menghasilkan nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan dengan skema pengendali tanpa invers *decoupling*. Hal ini membuktikan bahwa adanya perubahan variabel pada loop 1 tidak banyak memberikan perubahan pada loop lainnya karena interaksi antar variabel telah diminimalisir oleh invers *decoupling*.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Azizah, Z., Sutikno, J. P., Handogo, R., Hikmadiyar, R. A. (2020) "Inverted decoupling MIMO internal model control using Mp tuning," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 736(2). doi: 10.1088/1757-899X/736/2/022101.
- Gagnon, E., Pomerleau, A. dan Desbiens, A. (1998) "Simplified, ideal or inverted decoupling?," *ISA Transactions*, 37(4), hal. 265–276. doi: 10.1016/S0019-0578(98)00023-8.
- Garrido, J., Vázquez, F. dan Morilla, F. (2011) "An extended approach of inverted decoupling," *Journal of Process Control*, 21(1), hal. 55–68. doi: 10.1016/j.jprocont.2010.10.004.
- Garrido, J., Vázquez, F. dan Morilla, F. (2014) "Inverted decoupling internal model control for square stable multivariable time delay systems," *Journal of Process Control*, 24(11), hal. 1710–1719. doi: 10.1016/j.jprocont.2014.09.003.
- Sutikno, J. P., Azizah, Z., Handogo, R., Hikmadiyar, R. A.. (2019) "Inverted Decoupling 2DOF Internal Model Control for MIMO Process," 10(3), hal. 502–511.
- Luyben, W. L. (1970) "Distillation decoupling," *AIChE Journal*, 16(2), hal. 198–203. doi: 10.1002/aic.690160209.
- Seborg, D., Edgar, T., Mellicamp, D., Doyle III, F. (2011) *Process Dynamics and Control*. 3rd ed.
- Setiawan, I. (2008) "*Kontrol PID Untuk Proses Industri*," Elex Media Komputindo
- Wade, H. L. (1997) "Inverted decoupling: a neglected technique," *ISA Transactions*, 36(1), hal. 3–10. doi: 10.1016/S0019-0578(97)00008-6.