



**ChemicalEngineering**  
Faculty of Engineering-Semarang State University

Partner



**SNTK UNNES**  
Seminar Nasional Teknik Kimia UNNES 2017  
Universitas Sebelas Maret  
2017

# SNTK UNNES 2017

Seminar Nasional Teknik Kimia UNNES 2017  
Bekerjasama dengan Konsorsium Halal Jawa Tengah

"Inovasi Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia menuju Efisiensi Energi Global dan Implementasi Makanan Halal"

20 September 2017  
Hotel Grasia, Jalan Letjen S.Parman no.29  
Gajahmungkur, Semarang, Jawa Tengah



## Perancangan Sistem Pengendalian Laju Alir Cairan dengan Voltase Pompa sebagai Variabel Termanipulasi

Yulius Deddy Hermawan , Daniel Agung Krisnawan, Ni Luh Dila Wahyu Kinanti

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Industri, UPN "Veteran" Yogyakarta  
Jl. SWK 104 (Lingkar Utara) Condongcatur Yogyakarta 55283

 email penulis : ydhermawan@upnyk.ac.id

**Abstrak.** Percobaan loop terbuka dinamika laju alir fluida di dalam pipa telah dilaksanakan di laboratorium. Air digunakan sebagai fluida, dan laju alir volumetriknya  $f_o(t)$  [L/s] diatur dengan mengubah voltase pompa  $v_{pu}(t)$  [volt]. Percobaan loop terbuka menghasilkan parameter tunak yaitu: laju alir volumetrik cairan  $\bar{f}_o = 0,25$  [L/s], voltase pompa  $\bar{v}_{pu} = 118$  [volt]. Studi ini mengusulkan konfigurasi pengendalian laju alir cairan yaitu dengan memanipulasi voltase pompa. PI (*Proportional Integral*) control diimplementasikan untuk mengendalikan laju alir cairan, dan kriteria kestabilan Routh-Hurwitz dipilih untuk menyetel parameter pengendali PI. Model matematika loop tertutup diselesaikan secara numerik menggunakan metode eksplisit Euler. Parameter PI yang dihasilkan dari penelitian ini kemudian diuji melalui simulasi dinamis menggunakan *software* scilab. Perubahan *set point* laju alir cairan dibuat berdasarkan fungsi tahap. Seperti yang ditunjukkan dalam simulasi loop tertutup, parameter gain pengendali  $K_c = 100$  [L/(volt.detik)] and konstanta waktu integral  $\tau_i = 0.01$  [detik] menghasilkan *integral of the absolute value of the error* (IAE) terkecil sekitar 0.0006 L. Studi ini mengungkapkan bahwa usulan konfigurasi pengendalian laju alir beserta parameter pengendalinya memberikan respons yang stabil terhadap perubahan *set point*.

Kata kunci: *Closed Loop; Flow Control; Proportional Integral (PI); Routh-Hurwitz, Stable Response.*

**Abstract.** *The open loop experiment of fluid flow dynamic in pipe has been successfully done in laboratory. Water was used as a fluid, and its volumetric rate of  $f_o(t)$  [L/s] was adjusted by changing the pump voltage of  $v_{pu}(t)$  [volt]. The open loop experiment resulted the steady state parameters; they were liquid volumetric rate  $\bar{f}_o = 0.25$  [L/s], pump voltage  $\bar{v}_{pu} = 118$  [volt]. This study has proposed the liquid flow control configuration by manipulating the pump voltage. The PI control was implemented to control the flow and Routh-Hurwitz stability criterion was chosen for tuning the PI control parameters. The closed loop mathematical model was solved numerically with the explicit Euler method. The tuning parameters resulted in this research were examine through rigorous dynamic simulation in scilab software environment. The set point change of flow was made based on step function. As shown in our closed loop simulation, the PI tuning parameters of controller gain  $K_c = 100$  [L/(volt.s)] and integral time constant  $\tau_i = 0.01$  [s] gave the smallest integral of the absolute value of the error (IAE) of about 0.0006 L/s. This study revealed that the proposed flow control configuration with its tuning parameters gave a stable response to a change in its set point.*

Keywords: *Closed Loop; Flow Control; Proportional Integral (PI); Routh-Hurwitz, Stable Response*

---

## PENDAHULUAN

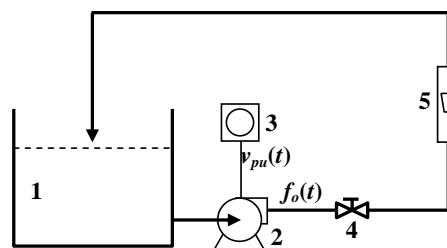
Sistem pemompaan cairan di dalam pipa sering dijumpai di dalam industri atau pabrik. Laju alir pemompaan merupakan parameter penting pada industri kimia. Misalnya, laju alir umpan reaktor, tangki pencampur, dan peralatan proses lainnya perlu dijaga (dikendalikan) konstan pada nilai tertentu. Selain itu, laju alir pemompaan perlu dikendalikan agar tidak mengganggu proses selanjutnya (Marlin, T.E., 1995). Oleh karena itu, penelitian tentang dinamika dan pengendalian laju alir cairan di dalam pipa sangat penting dilakukan.

Beberapa penelitian tentang dinamika proses dan kontrol telah dilakukan baik secara percobaan di laboratorium maupun melalui simulasi pemrograman komputer. Hermawan, Y.D. et al. (2012) telah mempelajari dinamika komposisi pada tangki pencampur, dimana komposisi cairan di dalam tangki sangat tergantung dari laju alir umpan. Selanjutnya, Hermawan, Y.D., dan Haryono, G. (2012) melanjutkan penelitian tersebut melalui simulasi loop tertutup pengendalian komposisi cairan di dalam tangki. Parameter pengendali komposisi distel berdasarkan kurva reaksi proses (*process reaction curve*) yang dihasilkan dari percobaan loop terbuka di laboratorium. Pada tahun 2016, Hermawan Y.D. et al. telah mempelajari perancangan pengendalian *level* cairan di dalam tangki *pure capacitive*, dimana *level* cairan dijaga konstan dengan mengatur voltase pompa. Pada percobaannya tahun 2016, Hermawan, Y.D. et al. menyetel parameter PI berdasarkan kriteria kestabilan Routh-Hurwitz.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari dinamika proses aliran fluida di dalam pipa menggunakan pompa. Pada penelitian ini, kami mengusulkan konfigurasi pengendalian laju alir cairan dengan memanipulasi voltase pompa. Parameter tunak ditentukan melalui percobaan loop terbuka di laboratorium. *Proportional Integral (PI) Control* diterapkan untuk mengendalikan laju alir cairan. Kriteria kestabilan Routh-Hurwitz digunakan untuk menyetel parameter pengendali PI. Model matematika loop tertutup diselesaikan secara numerik dengan metode eksplisit euler. *Software* scilab digunakan untuk melakukan simulasi loop tertutup dan menjelajahi kelakuan dinamis pengendalian laju alir cairan.

## METODOLOGI PENELITIAN

Rangkaian alat percobaan ditunjukkan pada Gambar 1. Pada penelitian ini, air dari tangki (1) dipompa menggunakan pompa (2). Laju alir fluida di dalam pipa diatur dengan *volt regulator* (3). *Valve* (4) dibuka penuh. Laju alir cairan diukur menggunakan rotameter (5). Cairan yang dipompa disirkulasi kembali masuk ke dalam tangki (1).



Keterangan: 1: tangki penampung; 2: pompa; 3: *volt regulator*; 4: *valve*; 5: rotameter

Gambar 1. Rangkaian alat percobaan.

Percobaan dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

Percobaan Pendahuluan: untuk menentukan parameter-parameter kondisi tunak, yaitu: laju alir cairan  $\bar{f}_o$  dan voltase pompa  $\bar{v}_{pu}$ .

Percobaan loop terbuka: untuk mempelajari dinamika laju alir fluida terhadap gangguan voltase pompa. Gangguan dibuat dengan menambah/mengurangi voltase pompa  $v_{pu}(t)$  berdasarkan fungsi tahap (*step increase* dan *step decrease*). Voltase pompa dapat diubah menggunakan *volt regulator* (No. 3 Gambar 1). Laju alir fluida diketahui berdasarkan pembacaan rotameter (No. 5 Gambar 1).

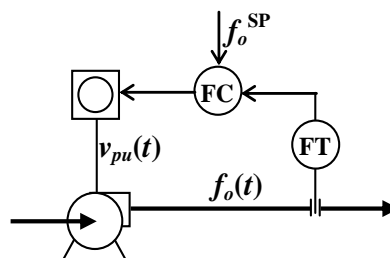
Model matematika loop terbuka hubungan antara voltase pompa dengan laju alir cairan diperoleh dari Smith, C.A. dan Corripio, A.B. (1997) sebagai berikut:

$$\tau_{pu} \frac{df_o(t)}{dt} + f_o(t) = K_{pu} v_{pu}(t) \dots\dots\dots (1)$$

Fungsi transfer loop terbuka ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$G_p(s) = \frac{F_o(s)}{V_{pu}(s)} = \frac{K_{pu}}{\tau_{pu} s + 1} \dots\dots\dots (2)$$

Simulasi loop tertutup: untuk mempelajari dan menjelajahi kelakuan dinamis pengendalian laju alir fluida. Laju alir fluida  $f_o(t)$  dijaga dengan memanipulasi voltase pompa  $v_{pu}(t)$ . *Proportional Integral (PI) Control* diterapkan untuk mengendalikan laju alir cairan. Parameter pengendali: *controller gain*  $K_c$  dan *integral time constant*  $\tau_i$  distel berdasarkan kriteria kestabilan Routh-Hurwitz. Model matematika loop tertutup diselesaikan secara numerik dengan metode eksplisit euler dan menggunakan bantuan *software* scilab. Sistem pengendalian laju alir cairan dengan variabel termanipulasi voltase pompa ditunjukkan pada Gambar 2.



Keterangan: FT: Flow Transmitter; FC: Flow Controller

Gambar 2. Usulan konfigurasi pengendalian laju alir cairan.

Persamaan matematika variabel termanipulasi adalah sebagai berikut:

$$v_{pu}(t) = \bar{v}_{pu} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \int e(t) dt \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{dimana } e(t) = f_o^{SP} - f_o(t) \dots\dots\dots (4)$$

Integral Absolut Error (IAE) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$IAE = \int_0^{\infty} e(t) dt \dots\dots\dots (5)$$

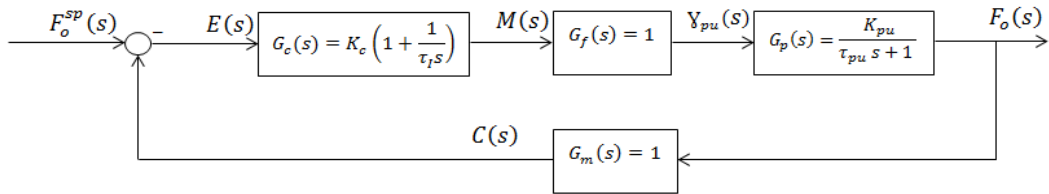
Dalam studi ini, fungsi transfer alat ukur *flow* dan elemen pengendali akhir diasumsikan sebagai berikut:  $G_m(s) = 1$  dan  $G_f(s) = 1$ . Diagram blok loop tertutup pengendalian laju alir cairan ditunjukkan pada Gambar 3.

Kasus pada studi pengendalian laju alir fluida adalah *servo problem* yaitu perubahan *set point* laju alir cairan dengan fungsi transfer *set point* sebagai berikut:

$$G_{sp} = \frac{\tau_I s + 1}{\left(\frac{\tau_{pu}}{K_{pu}K_c}\right)\tau_I s^2 + \left(1 + \frac{1}{K_{pu}K_c}\right)\tau_I s + 1} \dots\dots\dots (6)$$

Berdasarkan fungsi transfer *set point* diperoleh persamaan karakteristik sebagai berikut:

$$\tau_I \tau_{pu} s^2 + (1 + K_{pu}K_c)\tau_I s + K_{pu}K_c = 0 \dots\dots\dots (7)$$



Gambar 3. Diagram blok loop tertutup.

Persamaan karakteristik (7) digunakan untuk menyusun Routh-array seperti ditunjukkan pada persamaan (8). Selanjutnya Routh-array digunakan untuk menyetel parameter PI dan analisis kestabilan pengendalian laju alir cairan.

$$\text{Row1} \begin{bmatrix} \tau_I \tau_{pu} & K_{pu} K_c \\ (1 + K_{pu} K_c) \tau_I & \\ K_{pu} K_c & \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

Berdasarkan persamaan (8), sistem pengendalian laju alir cairan akan menghasilkan respons yang stabil jika semua anggota pada kolom pertama bernilai positif.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter kondisi tunak ditunjukkan pada Tabel 1. Konstanta waktu pompa sangat kecil (0,006 detik), hal ini menunjukkan bahwa pompa sangat sensitif terhadap laju alir fluida.

Tabel 1. Parameter kondisi tunak.

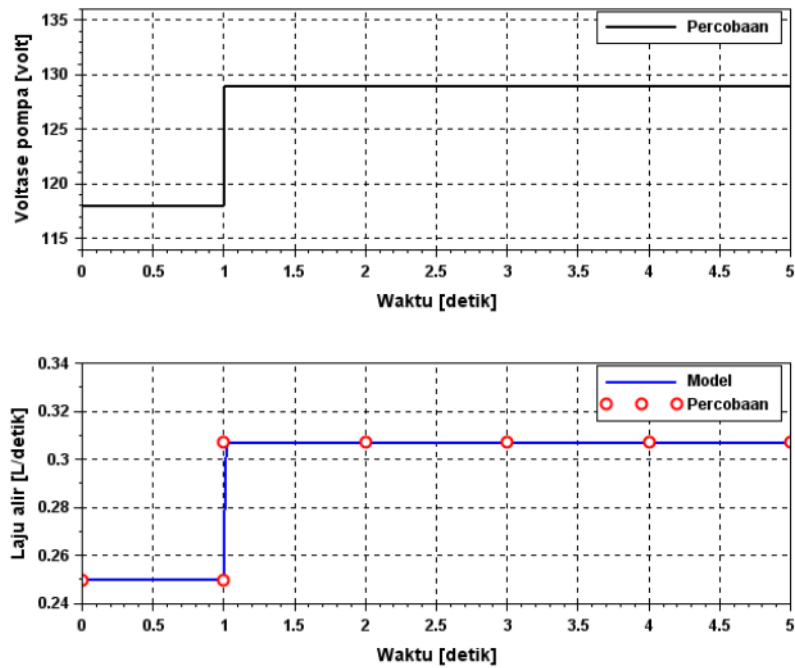
No	Parameter tunak	Nilai	Satuan
1	Voltase pompa, $\bar{v}_{pu}$	118	volt
2	Laju alir fluida, $\bar{f}_o$	0,25	L/detik
3	Gain pompa, $K_{pu}$	0,0021	L/(volt.detik)
4	Konstanta waktu pompa, $\tau_{pu}$	0,006	detik

Gambar 4 menunjukkan respons dinamis loop terbuka terhadap perubahan *step increase* voltase pompa. Pada waktu  $t = 1$  detik, voltase pompa dinaikkan secara tiba-tiba dari 118 volt menjadi 129 volt. Laju alir (*flow*) cairan naik dari 0,25 L/detik menjadi 0,307 L/detik. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, respons yang dihasilkan dari model matematika sangat mendekati respons hasil pengamatan laboratorium.

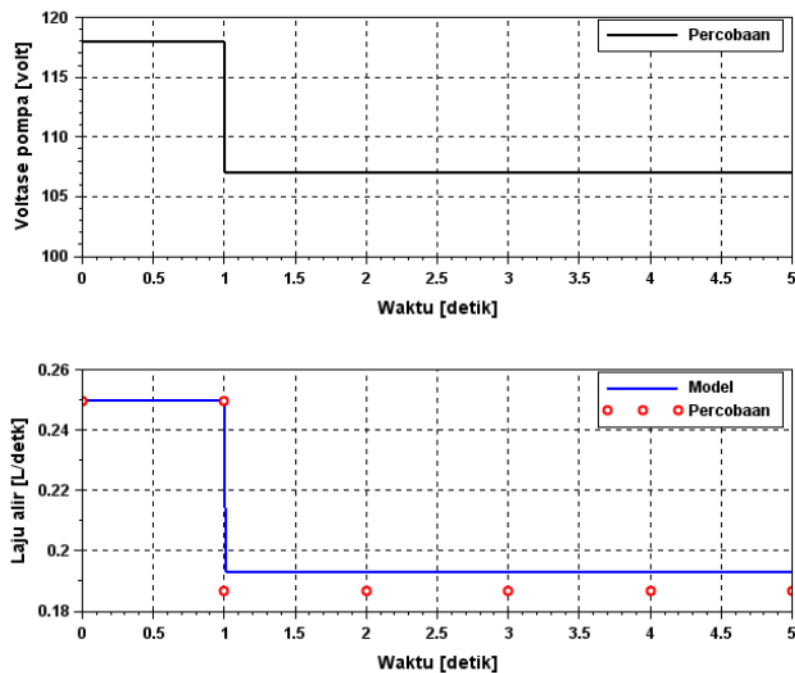
Respons dinamis loop terbuka terhadap perubahan *step decrease* voltase pompa ditunjukkan pada Gambar 5. Voltase pompa diturunkan secara tiba-tiba dari 118 volt menjadi 107 volt pada waktu  $t = 1$  detik. Laju alir (*flow*) cairan turun dari 0,25 L/detik menjadi 0,187

L/detik. Respons yang dihasilkan dari model matematika menunjukkan *trend* yang sama dengan respons hasil pengamatan laboratorium.

Berdasarkan analisis kestabilan Routh-Hurwitz, sistem pengendalian laju alir cairan akan memberikan respons yang stabil jika semua anggota pada kolom pertama persamaan (8) bernilai positif. Hal ini dapat dicapai dengan menyetel *controller gain*  $K_c > 0$  (positif). Nilai *controller gain* pada berbagai nilai konstanta waktu integral ( $\tau_I$ ) beserta hasil IAE ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 4. Respons dinamis loop terbuka terhadap perubahan *step increase* voltase pompa.



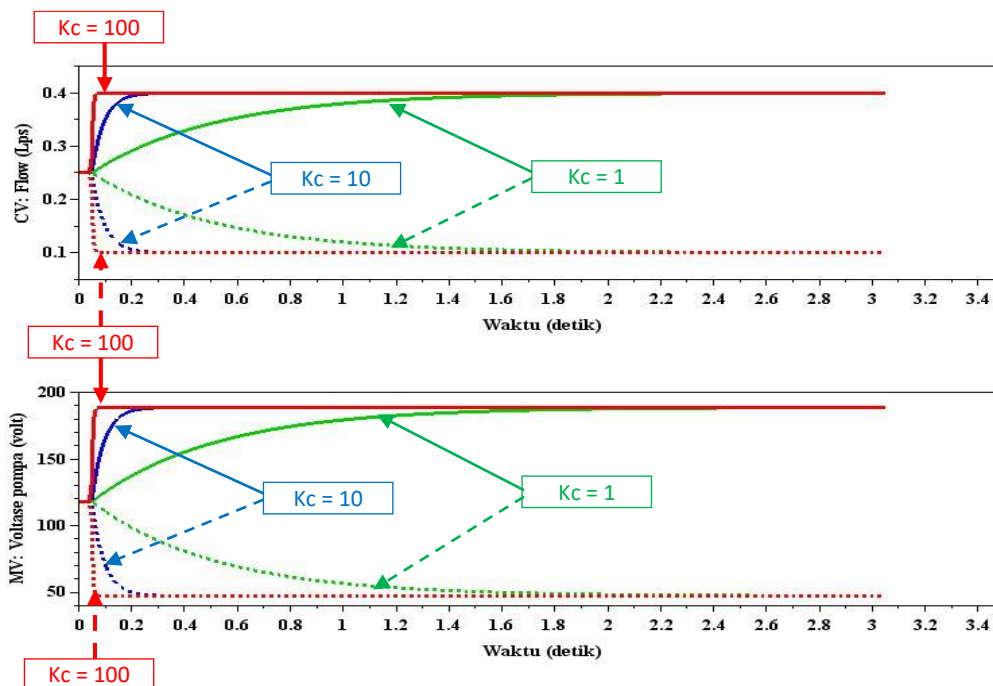
Gambar 5. Respons dinamis loop terbuka terhadap perubahan *step decrease* voltase pompa.



Simulasi dinamis loop tertutup dilakukan untuk menguji ketangguhan parameter pengendali yang telah dihasilkan. Simulasi dinamis loop tertutup dilaksanakan dengan bantuan *software* Scilab v.6.0.0 dengan mengubah *set point* ( $f^{SP}$ ) secara *step increase* dan *decrease* sebesar  $\pm 0,15$  L/detik. Respons dinamis loop tertutup terhadap perubahan *set point* pada berbagai variasi nilai *controller gain* ( $K_c$ ) dan konstanta waktu integral ( $\tau_I$ ) ditunjukkan pada Gambar 6, 7, dan 8.

Tabel 2. *Tuning* parameter  $K_c$  dan  $\tau_I$  dan hasil IAE (*Integral Absolute Error*)

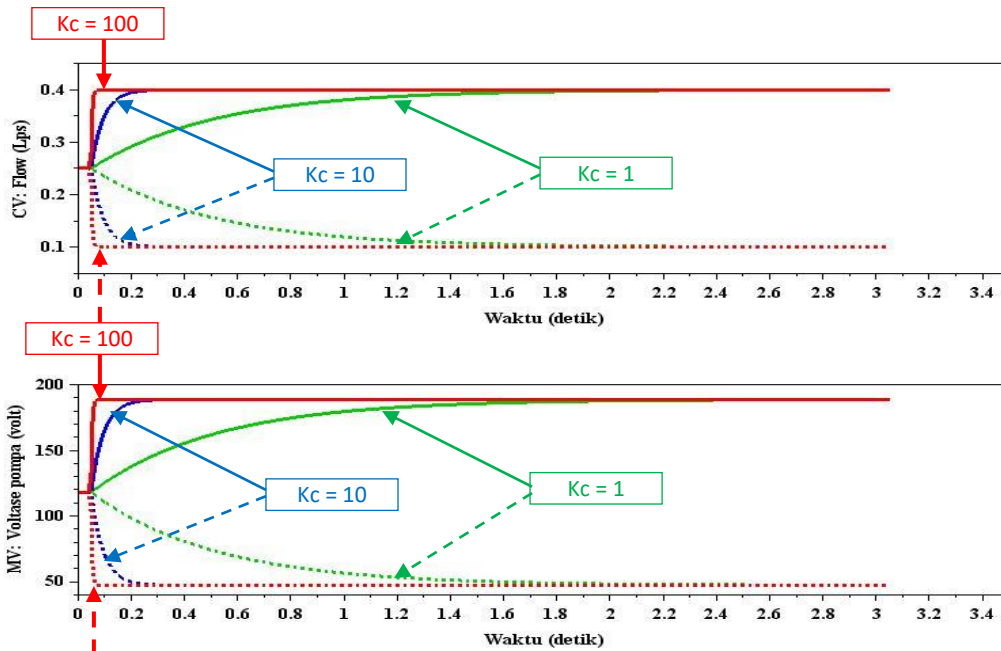
$K_c$ [L/(volt.detik)]	$\tau_I$ [detik]	IAE ( <i>Integral Absolute Error</i> )	
		Step Increase	Step Decrease
100	1	0,00071	0,00071
10	1	0,00071	0,00071
1	1	0,06228	0,06228
100	0,1	0,00070	0,00070
10	0,1	0,00070	0,00070
1	0,1	0,06189	0,06189
100	0,01	0,00064	0,00064
10	0,01	0,00644	0,00644
1	0,01	0,05814	0,05814



Keterangan: — step increase; - - - - step decrease

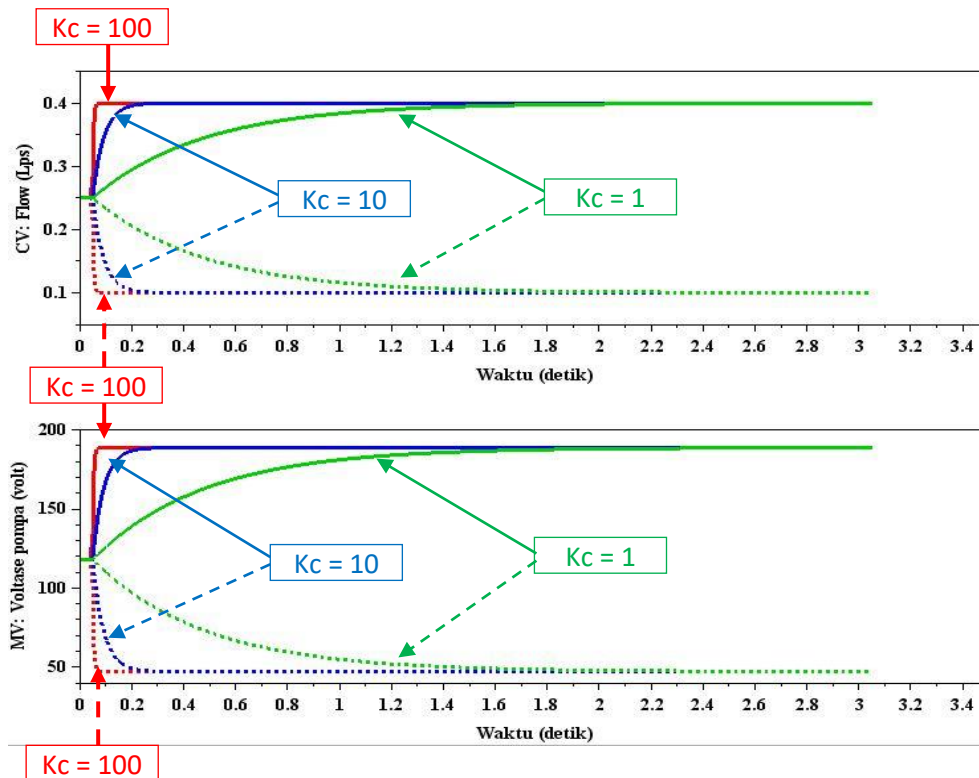
Gambar 6. Respon dinamis loop tertutup terhadap perubahan *set point*  $\Delta f = \pm 0.15$  L/detik dengan  $\tau_i = 1$  detik dan variasi  $K_c = 1, 10, 100$  [L/(volt.detik)].

*Controller gain*  $K_c$  menunjukkan besarnya perubahan *output* dalam setiap perubahan *input*. Semakin besar  $K_c$  maka *controller* semakin sensitif, artinya dengan adanya sedikit perubahan *input* akan mengakibatkan perubahan *output* yang besar. Semakin besar  $K_c$  maka semakin kecil *error* yang ditimbulkan oleh *controller*. Sementara konstanta waktu integral  $\tau_I$



Keterangan: — step increase; - - - step decrease

Gambar 7. Respon dinamis loop tertutup terhadap perubahan *set point*  $\Delta f = \pm 0.15$  L/detik dengan  $\tau_i = 0,1$  detik dan variasi  $K_c = 1, 10, 100$  [L/(volt.detik)].



Keterangan: — step increase; - - - step decrease

Gambar 8. Respon dinamis loop tertutup terhadap perubahan *set point*  $\Delta f = \pm 0.15$  L/detik dengan  $\tau_i = 0,01$  detik dan variasi  $K_c = 1, 10, 100$  [L/(volt.detik)].



---

menunjukkan cepat lambatnya controller memanipulasi variabel voltase pompa untuk mencapai set point. Semakin besar  $\tau_i$  maka semakin lambat controller memanipulasi variabel voltase pompa, sehingga error yang ditimbulkan lebih besar dari pada  $\tau_i$  yang bernilai kecil (Stephanopoulos, G., 1984). Berdasarkan simulasi dinamis loop tertutup, sistem pengendali laju alir cairan dengan controller gain  $K_c = 100$  [L/(vol.detk)] dan konstanta waktu integral  $\tau_i = 0,01$  detik menghasilkan respons tercepat dan stabil (Gambar 8) dengan nilai IAE terkecil sekitar 0,00064 L (Tabel 2).

## KESIMPULAN

Penelitian ini telah mempelajari dinamika laju alir cairan melalui percobaan di laboratorium dan mengusulkan sistem konfigurasi pengendalian laju alir cairan dengan variabel termanipulasi voltase pompa. Respons dinamis loop terbuka dan loop tertutup telah dijelajahi melalui simulasi dinamis dengan bantuan *software* scilab. Penelitian ini menghasilkan nilai parameter *controller gain*  $K_c = 100$  [L/(vol.detik)] dan konstanta waktu integral  $\tau_i = 0,01$  detik dengan nilai IAE terkecil sekitar 0,00064 L. Dengan menggunakan nilai *tuning* parameter pengendali tersebut, sistem pengendalian laju alir cairan menghasilkan respons tercepat dan stabil.

## DAFTAR PUSTAKA

- Hermawan, Y.D., Haryono, G., Agustin, M., Abiad, H. 2012. Dinamika Komposisi pada Sistem Tangki Pencampur 10 L,. Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” 2012. Prodi Teknik Kimia. FTI, UPN “Veteran” Yogyakarta, 6 Maret 2012, ISSN: 1693-4393: C15-1-C15-6.
- Hermawan, Y.D., Haryono, G. 2012. Dynamic Simulation and Composition Control in A 10 L Mixing Tank. *Jurnal Reaktor*. 14(2): 95-100.
- Hermawan, Y.D., Reningtyas, R., Kholisoh, S.D., Setyoningrum, T.M. 2016. Design of Level Control in A 10 L Pure Capacitive Tank: Stability Analysis and Dynamic Simulation. *International Journal of Science and Engineering (IJSE)*. 10 (1):10-16.
- Marlin T.E. 1995. *Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance*. 2<sup>nd</sup> ed. McGraw-Hill. USA.
- Smith, C.A., Corripio, A.B. 1997. *Principles and Practice of Automatic Process Control*. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Stephanopoulos, G. 1984. *Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice*. PTR. Prentice-Hall, Inc. A Simon and Shuster Company. New Jersey.