

Perancangan *Sliding Mode Controller* Untuk Sistem Pengaturan *Level* Dengan Metode *Decoupling* Pada *Plant Coupled Tanks*

Boby Dwi Apriyadi dan Rusdhianto Effendie A.K.

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: rusdhi@elect-eng.its.ac.id

Abstrak—Pada industri proses yang melibatkan fluida, suatu fluida akan dipompa dan dialirkan dari satu tangki ke tangki yang lain untuk diolah. Pemindahan cairan dari satu tangki ke tangki yang lain menyebabkan berubahnya *level* fluida dalam tangki. Dalam pengaturan *level*, pemindahan cairan biasa disebut sebagai pembebanan pada *level*. Perubahan beban ini dapat mempengaruhi dari kinerja kontroler. Kontroler yang banyak digunakan di industri proses adalah kontroler PID karena kesederhanaan struktur dan keahliannya. *Sliding Mode Controller* adalah suatu metodologi pengaturan yang mampu mengatasi perubahan yang mengganggu pada sistem, tanpa menyebabkan gangguan pada performa sistem itu sendiri. Struktur *Sliding Mode Control* terdiri dari bagian utama yang berfungsi memperbaiki sinyal error dengan mengarahkan sinyal tersebut pada sebuah lintasan yang diinginkan dan bagian tambahan yang berfungsi untuk mempertahankan sinyal, sehingga dapat mengatasi perubahan parameter pada *plant* dan menjaga performa dari *plant*. Berdasarkan hasil simulasi, sistem pengaturan *level* air pada *plant coupled tank* dengan *Sliding Mode Controller* mempunyai nilai RMSE 0.043 %.

Kata Kunci—*Coupled Tank, Decoupling, Sliding Mode Control.*

I. PENDAHULUAN

SISTEM pengendalian di industri merupakan faktor yang sangat penting dalam proses produksi. Agar produksi tetap tercapai, maka suatu sistem pengendalian sangat diperlukan untuk menjaga kestabilan variable proses. Variabel proses antara lain flow, level, konsentrasi, volume, dan lain sebagainya.

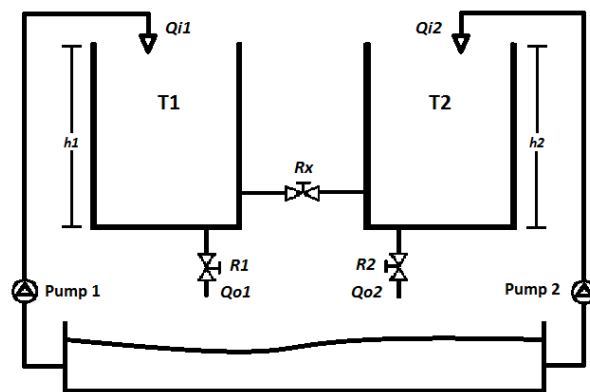
Coupled tanks merupakan salah satu bagian di industry yang memiliki fungsi yang sangat vital. Secara umum *coupled tanks* terdiri dari beberapa sistem, diantaranya adalah sistem umpan air, sistem *flow*, *level* yang terintegrasi menjadi satu kesatuan. Sistem umpan air berfungsi sebagai penyedia air untuk *coupled tanks* yang bekerja secara otomatis sesuai kebutuhan *steam* dan kemampuan dari *coupled tanks* itu sendiri. Sedangkan sistem *steam* berfungsi sebagai penyedia uap air untuk proses pada *plant* yang lain. Kedua sistem ini memerlukan suatu pengaturan agar kondisi *flow* dan *level* air dapat untuk memenuhi kebutuhan proses selanjutnya. Pengaturan air dilakukan dengan mengendalikan *level* air yang terdapat di dalam *coupled tanks* itu sendiri, sedangkan *level* air dilakukan dengan mengendalikan *flow* yang masuk ke dalam *coupled tanks* sendiri. *Flow* yang dihasilkan oleh *coupled tanks* dipengaruhi oleh kondisi dari *level* air tang terdapat di dalam *coupled tanks*.

Salah satu metode pengaturan yang digunakan untuk mengatasi ketidakpastian sistem yang dapat diaplikasikan pada *plant* ini adalah metode *Sliding Mode Control* yang adalah salah satu teknik kontrol yang dapat digunakan pada *plant* yang linier dan nonlinier. Prinsip dasar untuk *Sliding Mode Control* terdiri dari perpindahan atau pergerakan keadaan lintasan ke arah bidang geser (*sliding surface*) dan mempertahankannya sekitar bidang ini dengan sebuah fungsi geser.

Namun, metode *Sliding Mode Control* ini mempunyai kelemahan, yaitu timbulnya *chattering* atau *switching* dengan frekuensi tinggi pada sinyal kontrol, yang disebabkan oleh sifat diskontinyu pada sinyal kontrol natural dari sistem. Oleh karena itu, dalam penelitian kali ini akan digunakan *Sliding Mode Control* berbasis PID, untuk menghilangkan efek *chattering* pada sinyal kontrol.

II. DESAIN DAN PEMODELAN SISTEM

Plant coupled tanks merupakan tangki dengan konfigurasi dua tangki atau lebih yang saling berhubungan dengan sebuah pipa atau saluran air seperti pada Gambar 2.6. Adanya hubungan antara tangki ini membuat *level* cairan pada setiap tangki saling berhubungan atau berinteraksi. Konfigurasi tangki seperti ini banyak digunakan pada industri, seperti industri pembuatan kertas, industri pengolahan limbah, dan industri kimia.



Gambar 1. Model *plant coupled tanks*

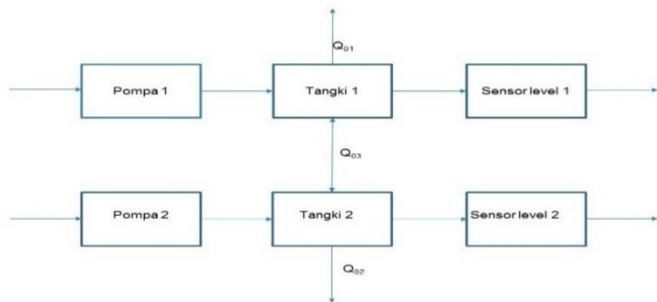
Level cairan pada tangki pertama ditunjukkan sebagai H_1 dan H_2 untuk *level* tangki kedua. *Flow* cairan yang masuk pada tangki dilambangkan sebagai Q_i . Untuk *flow* cairan yang keluar

dari tangki ditunjukkan sebagai Q_{i1} untuk tangki pertama, Q_{i2} tangki kedua, dan Q_x sebagai *flow* interaksi antara tangki pertama dan tangki kedua. Sistem *coupled tanks* dapat dikonfigurasi sebagai sistem *Single Input Single Output* (SISO), *Multi Input Multi Output* (MIMO), atau *Single Input Multi Output* (SIMO) berdasarkan manipulasi masukan pada pompa dan daerah kerja dari *rotary valve* yang terdapat pada *plant coupled tanks*. Jika berdasar model pada Gambar 2.1 maka *plant* ini bisa digolongkan sebagai sistem SIMO karena hanya memiliki satu masukan berupa aliran masuk air pada tangki satu dan untuk keluaran adalah *level* pada kedua tangki.

A. *Pemodelan Sistem Pengaturan Level Plant Coupled Tank* [1], [2]

Sistem yang akan dirancang adalah sistem pengaturan *level* dengan konfigurasi SISO yaitu pengaturan *level* pada tangki ke dua, dengan ditunjukkan masukan berupa tegangan pada pompa air untuk memberi aliran air masuk ke tangki dan *keluaran* berupa *level* air pada tangki satu atau dua. Model dari *plant coupled tank* seperti pada Gambar 2.6.

Proses pemodelan dimulai dari pemodelan pompa, pipa, tangki pada *plant coupled tanks*, dan sensor yang digunakan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok Pemodelan Sistem Pengaturan *Level*

Parameter yang digunakan pada pemodelan sistem pengaturan *level* ini dapat dilihat pada Tabel 1. Dalam pemodelan suatu sistem diperlukan juga untuk mengetahui karakteristik dari komponen setiap penyusun sistem. Sebagai contoh pada pompa perlu diketahui berapa tegangan maksimal kerja pompa, cara kerja dari pompa. Dengan diketahui dengan detail mengenai karakteristik dari sistem maka model matematis yang akan dibuat bisa lebih akurat dan juga dalam *real* sistem maka akan diketahui permasalahan yang timbul apabila ada karakteristik dari setiap komponen yang diabaikan.

Tabel 1.

Paramater Pemodelan *Plant* [3]

Symbol	Keterangan	Satuan	Nilai
H_1, H_2	Ketinggian air dalam tangki 1 dan 2	cm	40
A	Luas penampang	cm ²	66,25
a	Luas penampang lubang keluaran tangki 1 dan 2 dan saluran penghubung antara tangki 1 dan 2	cm ²	0,1963
β_1, β_2	Rasio bukaan katup (<i>valve</i>) pada lubang keluaran tangki 1 dan 2		0,35903
β_x	Rasio <i>valve</i> antara tangki 1 dan 2		0,38705
g	Gravitasi	m ² /s	9,8
Q_{i1}	Debit air yang masuk pada tangki 1	cm ³ /s	2,88
Q_{i2}	Debit air yang masuk pada tangki 2	cm ³ /s	2,588

B. *Identifikasi Sistem* [1]

Sistem *coupled tank* terdiri dari dua tangki vertical interkoneksi oleh saluran aliran air yang menyebabkan ketinggian air dari dua tangki berinteraksi. Setiap tangki memiliki pompa independen untuk masukannya berupa cairan. Luas penampang dari bukaan katup dan dasar dari masing-masing tangki dan saluran menghubungkan dua tangki ini dapat divariasikan dengan *rotary valves*. Sistem *coupled tank* ini dapat dikonfigurasi sebagai SISO (*Single Output Single Input*) atau dapat juga sebagai sistem MIMO (*Multiple Output Multiple Input*) melalui manipulasi pompa *input* dan *sectional* daerah dari *rotary valves*.

Berdasarkan hukum kesetimbangan massa, didapat persamaan setiap tangki sebagai berikut:

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = Q_{i1} - Q_{o1} - Q_{o3} \tag{1}$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = Q_{i2} - Q_{o2} - Q_{o3} \tag{2}$$

Dimana H_1 dan H_2 masing-masing adalah ketinggian dari cairan yang terdapat pada tangki 1 dan tangki 2. Lalu A_1 dan A_2 adalah luas penampang yang dimiliki oleh tangki 1 dan tangki 2. Q_{i1} dan Q_{i2} adalah debit air yang dikeluarkan dari pompa yang masing-masing menuju ke tangki 1 dan menuju ke tangki 2. Sedangkan Q_{o1} dan Q_{o2} adalah debit air keluar yang dimiliki masing-masing tangki 1 dan tangki 2.

Dari persamaan *Bernoulli* untuk cairan non-kental, kemampuan cairan dalam aliran dapat direpresentasikan sebagai berikut:

$$Q_{o1} = \beta_1 \cdot a \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_1} \tag{3}$$

$$Q_{o2} = \beta_2 \cdot a \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_2} \tag{4}$$

$$Q_{o3} = \beta_x \cdot a \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{H_1 - H_2} \tag{5}$$

Dimana, β_1 , β_2 , dan β_x merupakan konstanta proporsional dimana bergantung dari koefisien debit air area yang saling silang dan juga konstanta gravitasi. Dengan menggunakan Persamaan (3), Persamaan (4), dan Persamaan (5) ke Persamaan (1) dan Persamaan (2) didapatkan persamaan *non-linear* yang menggambarkan dinamika dari *multi-input* dan *multi-output* sistem berasal sebagai berikut:

$$A_1 \frac{dH_1}{dt} = q_1 - \frac{\alpha_1}{2\sqrt{H_1}} h_1 - \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1-H_2}} (h_1-h_2) \quad (6)$$

$$A_2 \frac{dH_2}{dt} = q_2 - \frac{\alpha_2}{2\sqrt{H_2}} h_2 + \frac{\alpha_3}{2\sqrt{H_1-H_2}} (h_1-h_2) \quad (7)$$

Dengan menguji menggunakan sinyal *step* untuk mendapatkan model *non-linear* sesuai dengan pengaruh dari tiap masukan dapat didapatkan model *plant* sebagai berikut:

$$G_{11} = \frac{0,7874}{21s+1} \quad (8)$$

$$G_{12} = \frac{0,0946}{31s+1} \quad (9)$$

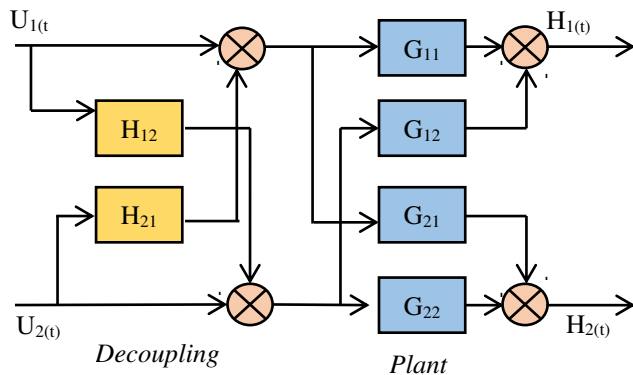
$$G_{21} = \frac{0,08915}{29s+1} \quad (10)$$

$$G_{22} = \frac{0,7829}{22s+1} \quad (11)$$

C. Dekopling [2]

Dekopling digunakan untuk meminimalisir atau menghilangkan interaksi yang terjadi pada *plant coupled tanks* yang bersifat MIMO yang menyebabkan terjadinya interaksi *input*.

Desain yang digunakan pada *plant* ditunjukkan seperti berikut:



Gambar 3. Plant dengan Decoupling

Didapatkan persamaan untuk *decoupling* dengan menganalisa secara terpisah pada setiap *input-output*. Persamaan D_{12} didapat dengan cara berikut:

$$(G_{11}D_{12} + G_{12})X_2 = 0$$

$$G_{11}D_{12} + G_{12} = 0 \quad (12)$$

$$D_{12} = -\frac{G_{12}}{G_{11}}$$

Persamaan D_{21} didapat dengan cara:

$$(G_{22}D_{21} + G_{21})X_1 = 0$$

$$G_{22}D_{21} + G_{21} = 0 \quad (13)$$

$$D_{21} = -\frac{G_{21}}{G_{22}}$$

Dengan fungsi alih yang didapatkan dari model di atas masuk ke persamaan berikut:

$$G_1(s) = G_{11}(s) - D_{12}(s).G_{12}(s) \quad (14)$$

$$G_1(s) = \frac{577,7s^2 + 37,88s + 0,6187}{1,526e04s^3 + 1729s^2 + 64,2s + 0,7829}$$

$$G_2(s) = G_{22}(s) - D_{21}(s).G_{21}(s) \quad (15)$$

$$G_2(s) = \frac{577,7s^2 + 37,88s + 0,6187}{1,63e04s^3 + 1816s^2 + 66,39s + 0,7998}$$

D. Perancangan Kontroler Sliding Mode [3]

Perancangan kontroler didesain dan diimplementasikan untuk mempercepat *rise time* dan menjadikan respon mencapai *set point* yang diinginkan. Dari Persamaan (14) dan (15) dilakukan pendekatan orde satu menggunakan reduksi *bode*. Pada hasil identifikasi menggunakan analisa reduksi *bode*, didapat fungsi alih dari *plant* seperti berikut:

$$g_1 = \frac{0.788}{20.7s + 1} \quad (16)$$

$$g_2 = \frac{0.771}{21.7s + 1} \quad (17)$$

Dari Persamaan (16) dan Persamaan (17) akan didesain kontroler *sliding mode* untuk mengendalikan model tersebut. Dimana kontroler ini akan mengatur *level* dari tangki agar sesuai dengan *set point* yang diinginkan.

Koefisien dari numerator dan denominator sebagai fungsi alih dari Persamaan (16) dan Persamaan (17) akan dimisalkan menjadi variabel tetap agar lebih mudah dalam mendesain kontroler. Sehingga fungsi alih dari *plant* menjadi:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{as + b} \quad (18)$$

Transfer function di atas pada Persamaan (18) dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan diferensial (dengan asumsi nilai awal adalah nol):

$$\begin{aligned}
 a\dot{y} + by &= Ku \\
 \dot{y} &= cy + du \\
 \ddot{y} &= c\dot{y} + d\dot{u}
 \end{aligned}$$

Dimana

$$\begin{aligned}
 c &= -\frac{b}{a} \\
 d &= \frac{K}{a}
 \end{aligned}$$

Lalu, ambil persamaan sinyal error

$$e = y_r - y \tag{21}$$

Didefinisikan suatu permukaan luncur sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \sigma_s &= \alpha e + \dot{e} \\
 \dot{\sigma}_s &= \alpha \dot{e} + \ddot{e}
 \end{aligned}$$

Sehingga didapat persamaan untuk U_{eq} seperti berikut:

$$u_{eq} = \frac{\dot{y}_r}{d} - \frac{cy}{d} + \frac{\ddot{y}_r}{\alpha d} - \frac{c\dot{y}}{\alpha d} - \frac{\dot{u}_{eq}}{\alpha} \tag{23}$$

Setelah ditemukan sinyal kontrol ekivalen, selanjutnya adalah mencari sinyal kontrol natural.

$$\dot{\sigma}_s = \alpha \dot{y}_r - \alpha cy - \alpha du + \ddot{y}_r - c\dot{y} - d\dot{u} \tag{24}$$

Dimana

$$u = u_{eq} + u_n \tag{25}$$

Berdasarkan syarat kestabilan *Lyapunov*, maka dipilih:

$$\dot{\sigma}_s = -W \cdot \text{sat}(\sigma_s) \tag{22}$$

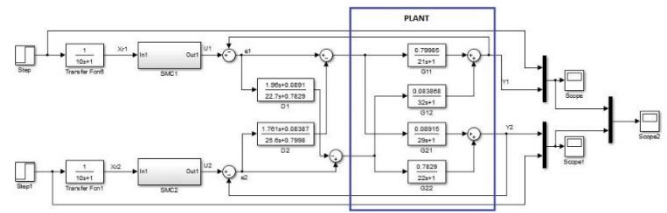
Sehingga U_n didapatkan sebagai berikut:

$$u_n = \frac{W}{\alpha d} \cdot \text{sat}(\sigma_s) - \frac{\dot{u}_n}{\alpha} \tag{23}$$

Dimana $W > 0$.

III. HASIL SIMULASI

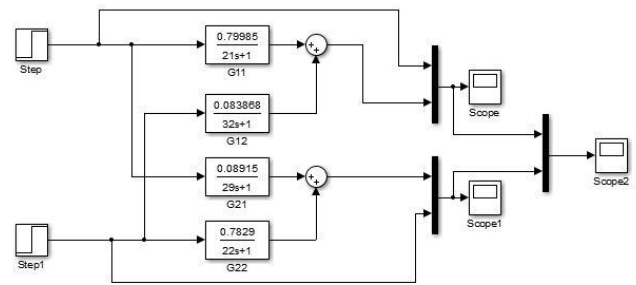
Pada bab ini, dipaparkan hasil simulasi dan analisis dari *open loop system* dan *Sliding Mode Control*.



Gambar 3. Desain Kontroler SMC

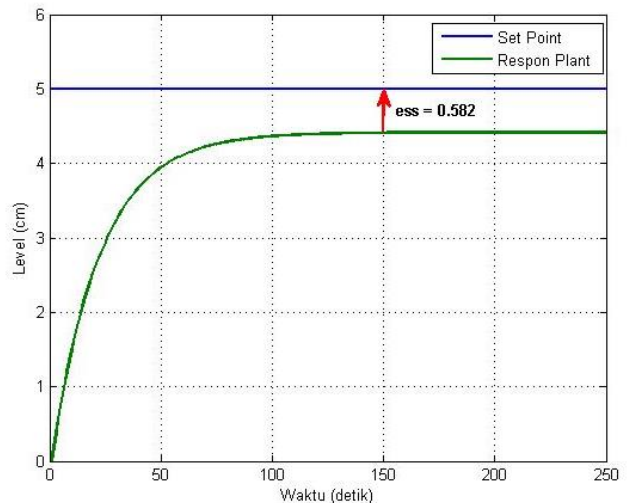
A. Pengujian Open Loop System

Pada tahap ini dilakukan simulasi sistem *plant coupled tank* pada tangki 1 dan 2. Respon *open loop* dilakukan untuk menguji respon *plant coupled tank* apabila tidak dilakukan proses control *close loop*. Dari persamaan fungsi alih G_{11} , G_{12} , G_{21} , dan G_{22} dilakukan pengujian *open loop* tanpa diberi kontroler terlebih dahulu seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Simulasi Sistem Open Loop tanpa Decoupling

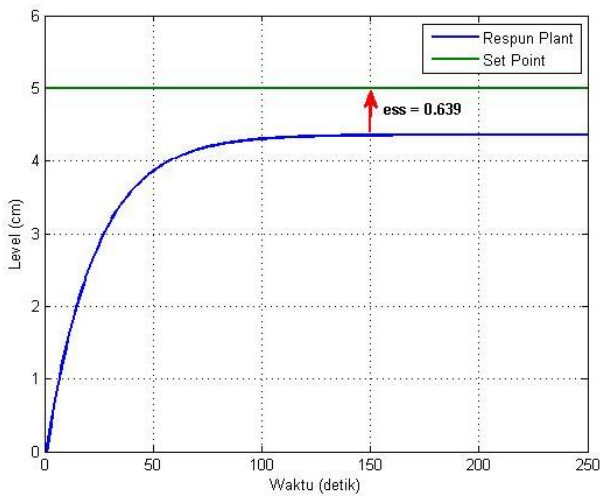
Yang pertama, dilakukan simulasi pada *plant* tangki 1. Sinyal uji yang diberikan berupa sinyal step dengan *set point* lima. Hasil simulasi didapatkan respon sistem seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Respon Sistem Open Loop tanpa Decoupling Tangki 1

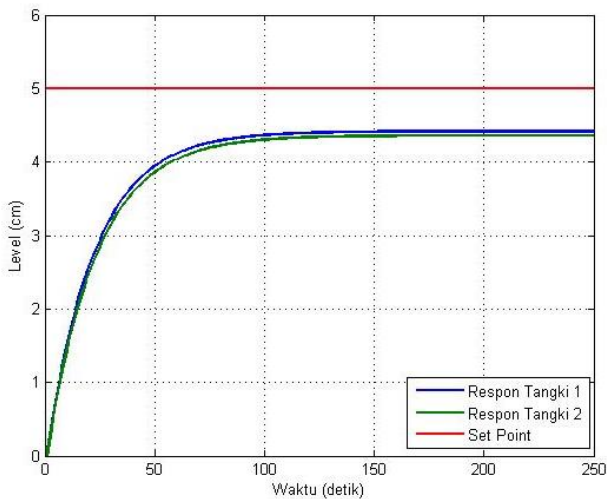
Dari respon sistem pada Gambar 5 tersebut dapat diamati bahwa sistem *open loop* tanpa *decoupling* tangki 1 masih memiliki kesalahan tunak, yaitu sebesar 0.582. Selanjutnya dilakukan simulasi pada tangki 2. Sinyal uji yang diberikan sama dengan sinyal uji yang diberikan pada *plant* tangki 1.

Hasil simulasi didapatkan respon sistem seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Respon Sistem *Open Loop* tanpa *Decoupling* Tangki 2

Dari respon sistem pada Gambar 6 tersebut dapat diamati bahwa sistem *open loop* tanpa *decoupling* tangki 2 masih memiliki kesalahan tunak, yaitu sebesar 0.639.

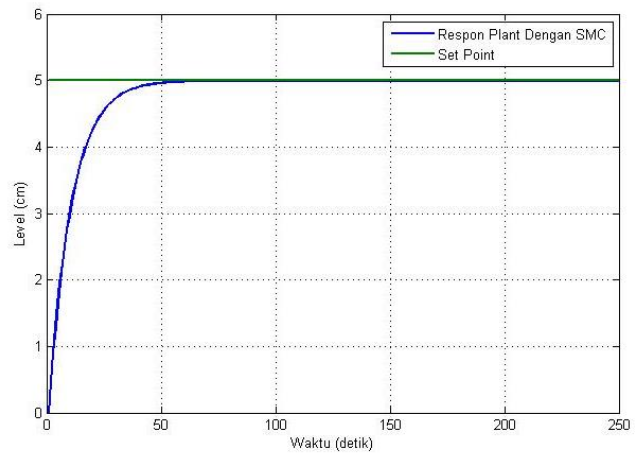


Gambar 7. Respon Sistem *Open Loop* tanpa *Decoupling* Tangki 1 dan 2

Dari Gambar 7 dapat dilihat saat kedua tangki mendapatkan sinyal uji yang sama mempunyai perbedaan waktu tunak. Dimana kesalahan tunak dari tangki 1 lebih kecil dibandingkan dengan kesalahan tunak dari tangki 2.

B. Pengujian Kontroler SMC-PID

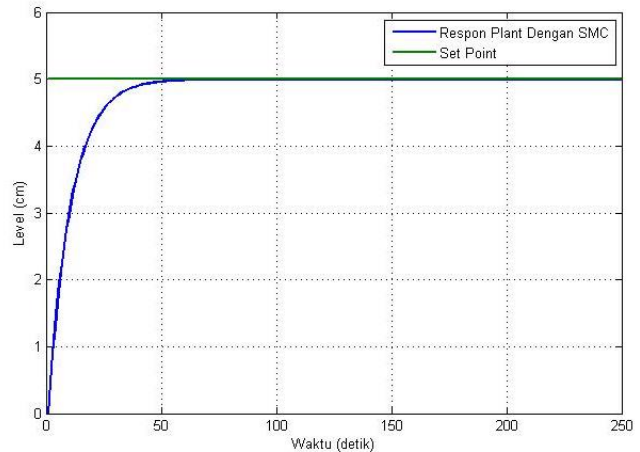
Pada tahap ini dilakukan pengujian pada *plant coupled tank* pada tangki 1 dan tangki 2 dengan menggunakan sinyal uji berupa sinyal *step*. Berikut ini merupakan hasil pengujian pada tangki 1 adalah sebagai berikut:



Gambar 8. Respon pada Tangki 1 dengan *Sliding Mode Controller*

Dari Gambar 8 dapat dilihat bahwa respon tersebut mulai *steady state* pada waktu 60 detik dan mempunyai *rise time* sekitar 30 detik.

Selanjutnya dilakukan pengujian pada tangki 2 dengan menggunakan sinyal uji berupa sinyal *step*. Berikut ini adalah hasil pengujian pada tangki 2.



Gambar 9. Respon pada Tangki 2 dengan *Sliding Mode Controller*

Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa respon tersebut mulai *steady state* pada waktu 67 detik dan mempunyai *rise time* sekitar 34 detik.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, dapat diperoleh kesimpulan bahwa Metode *Sliding Mode Control* yang diaplikasikan pada *plant coupled tanks* dengan *time constant* mendekati respon orde pertama yang diinginkan. Dari kontroler didapatkan *error* sebesar 0,042% pada tangki 1 dan 0,047% pada tangki 2.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Darmawan, Rheza Qashmal, "Desain Autotuning Kontroler PID Berbasis Algoritma Neural-Network Untuk Sistem Pengaturan Cascade Level dan Flow Liquid pada Plant Coupled Tanks", *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya, 2016.
- [2] Arjin Numsomran, Tianchai Suksri, Maitree Thumma, "Design of 2-DOF PI Controller with Decoupling for Coupled-Tank Process", *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2007.
- [3] Al Amin, Anas, "Pengaturan Tekanan Boiler-Turbine Berbasis Hybrid Fuzzy PID.", *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya, 2012.