

Pengendalian *Level Coupled Tank* Menggunakan Metode *Sliding Mode Control (SMC) Hybrid Proportional Integral Derivative (PID)* di *Simulink Matlab*

Ahmad Faizal

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Suska Riau
Jl. HR. Soebrantas No. 155 Simpang Baru, Panam, Pekanbaru, 28293
Email: ahmad.faizal@uin-suska.ac.id

(Received: 7 Januari 2016; Revised: 17 Februari 2016; Accepted: 4 Februari 2016)

ABSTRAK

Dalam dunia industri kimia, *Coupled Tank* sangat penting terutama untuk proses-proses pencampuran beberapa fluida. *Coupled Tank* merupakan tangki yang terdiri atas dua atau lebih tangki yang saling terhubung. Ada berbagai macam sistem pengendali di antaranya *Proportional Integral Derivative (PID)*, *Sliding Mode Control (SMC)*, dan sebagainya. Pada penelitian ini membandingkan pengendali SMC, PID, dan SMC hybrid PID pada sistem *level Coupled Tank*. Simulasi dilakukan dengan parameter yang sama. Untuk nilai parameter PID digunakan nilai $K_p=10000$, $K_i=0.1$, $K_d=0.1$ sedangkan SMC digunakan konstanta $K=80$ dan $\alpha=0,15$. Penggunaan parameter yang sama membuat hasil simulasi pengendali SMC hybrid PID tidak mampu mendapatkan nilai set point yang diinginkan. Namun penggunaan nilai parameter yang berbeda mampu memberikan nilai respon transien yang lebih cepat dibandingkan pengendali PID dan SMC, dengan menggunakan nilai parameter $K_p=3$, $K_i=0.1$, $K_d=0.1$, dan parameter $K=320$ dan $\alpha=0,05$.

Kata Kunci: *Coupled Tank, Level, Proportional Integral Derivative (PID), Sliding Mode Control (SMC)*

ABSTRACT

In the chemical industry, *Coupled Tank* are very important especially for mixing multiple fluid. *Coupled Tank* is a tank which consist of two part or more tanks are interconnected. There are a wide variety of control system including *Proportional Integral Derivative (PID)*, *Sliding Mode Control (SMC)*, and so on. In this research will analyze the comparative controller SMC, PID, and SMC PID Hybrid on *Coupled Tank* system. simulation performed with the same parameters. For PID Parameters values used $K_p=10000$, $K_i=0.1$, $K_d=0.1$. Where as for SMC parameter used $K=80$ dan $\alpha=0,15$. Using the same parameters, make the result of simulation from controller SMC PID hybrid not able to get the desired setpoint value. But using different parameters the simulation be able to get the setpoint value more faster as PID or SMC controller, by Using parameter value $K_p=3$, $K_i=0.1$, $K_d=0.1$, dan $K=320$ dan $\alpha=0,05$.

Keywords: *Coupled Tank, Level, Proportional Integral Derivative (PID), Sliding Mode Control (SMC)*

Corresponding Author:

Ahmad Faizal
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi,
UIN Suska Riau
Email: ahmad.faizal@uin-suska.ac.id

Pendahuluan

Seiring berkembangnya teknologi instrumentasi pada industri, serta tuntutan terhadap keberhasilan sistem melakukan proses kerjanya agar produksi tetap tercapai perlu

dilakukan pengendalian, yang tujuannya adalah agar sistem dapat menjaga kestabilannya dalam suatu proses yang sedang berlangsung secara efektif dan efisien. ada banyak pengendalian yang harus dikendalikan dalam suatu proses di industri, diantaranya *pressure, flow, temperature, concentration* dan *level*. Pengendalian yang

dilakukan diharapkan dapat mempertahankan *life time* unit, memudahkan kerja manusia, mengurangi biaya perawatan, mendapatkan kualitas produksi yang baik, keselamatan dan keamanan lingkungan proses.

Dalam dunia industri yang melibatkan fluida, pengolahan cairan sering melibatkan beberapa jenis tangki, ada jenis tangki yang tidak terhubung dengan tangki yang lain (*Single Tank*), dan ada pula yang tersusun dari beberapa tangki (*Coupled Tank*).

Metode Penelitian

Coupled Tank

Coupled Tank merupakan tangki yang biasanya terdiri atas dua atau lebih tangki yang saling terhubung. Tangki ini banyak digunakan dalam dunia industri pengolahan fluida untuk mencampur beberapa bahan kimia. *Coupled Tank* yang digunakan yaitu *Level and Flow Process Rig 38-100*.



Gambar 1. *Level and Flow Process Rig 38-100*

Identifikasi Loop Tertutup

Penggunaan pengendali proporsional pada identifikasi loop tertutup membantu mendapatkan model matematika *plant* untuk model identifikasi loop terbuka. Sehingga mendapatkan persamaan sebagai berikut (okky, 2012) :

$$G_T(s) = \frac{a_1s + a_0}{b_2s^2 + b^0} \quad (1)$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K_p \cdot G(s)}{1 + K_p \cdot G(s)} = G_T(s)$$

$$G_T(s) + G_T(s) \cdot K_p \cdot G(s) = K_p \cdot G(s)$$

Maka model matematika *plant* adalah sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{G_T(s)}{K_p [1 - G_T(s)]} \quad (2)$$

Identifikasi Metode Strejc

Strejc merupakan metode identifikasi dengan cara menarik garis singgung pada titik belok respon step *plant* dalam domain waktu.

Tabel 1. Tabel untuk Parameter dengan Identifikasi *Strejc* (leonardus, 2012)

N	$\frac{T_u}{T}$	$\frac{T_u}{T}$	$\frac{T_u}{T_a}$
1	1,000	0,000	0,000
2	2,718	0,282	0,104
3	3,695	0,805	0,218
4	4,463	1,425	0,319
5	5,119	21,000	0,410

Berdasarkan tabel diatas dengan parameter-parameter persamaan matematika dengan metode strejc adalah sebagai berikut:

$$G_T(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{(1 + Ts)^n} \quad (3)$$

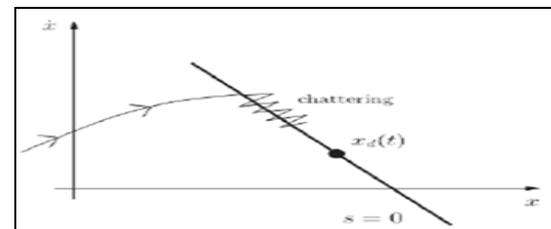
Pengendali Proporsional Integral Derivative (PID)

Pengendali PID merupakan pengendali otomatis yang merupakan gabungan dari pengendali *Proporsional*, *Integral*, dan *Derivatif*. Bentuk umum dari pengendali PID sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (4)$$

Sliding Mode Control (SMC)

SMC merupakan pengendali berumpan balik dengan pensaklaran berkecepatan tinggi (*high speed switching feedback*), sehingga dalam proses SMC mengalami *chattering* yang dapat mengganggu kestabilan sistem (Putranto,2010)



Gambar 2. Fenomena *Chattering Effect*

Beberapa cara untuk mengurangi *chattering* adalah dengan memperluas fungsi signum menjadi saturasi, atau mengganti fungsi signum dengan arcus tangen (Andriarti,2014).

Perancangan Permukaan Luncur

Slotine (1985) dalam penelitiannya menuliskan bahwa perancangan permukaan luncur dapat dirumuskan dengan persamaan awal sebagai berikut:

$$\dot{x}^n(t) = f(x) + b(x,t).U + d(t) \quad (5)$$

Dimana u merupakan input kendali, x merupakan faktor keadaan, f(x,t) dan b(x,t) berupa fungsi terbatas, d(t) gangguan eksternal. Jika xd merupakan x yang diinginkan maka *tracking errornya* dapat dinyatakan dengan :

$$e(t) = x(t) - xd(t)$$

Fungsi *swiching* yaitu permukaan S(x,t) didalam ruang keadaan Rⁿ, memenuhi persamaan (Slotine, 1985) :

$$S(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e \quad (6)$$

Dengan λ berupa konstanta positif. Dimana fungsi *swiching* ini digunakan untuk menentukan besarnya nilai u agar memenuhi kondisi *sliding*.

Permukaan luncur (*sliding surface*) merupakan persamaan yang memenuhi :

$$s(x,t) = 0 \quad (7)$$

Besar nilai *control input* pada SMC bergantung pada nilai S, sehingga memenuhi pertidaksamaan yang disebut kondisi *sliding*. kondisi tersebut ditulis dalam bentuk sebagai berikut :

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (8)$$

Keterangan :

- S = Permukaan luncur
- λ = Konstanta Positif
- n = Orde Sistem
- e = Error

Sinyal Kendali

Untuk mendapatkan suatu sinyal kendali yang mampu membawa status *trayektori* menuju permukaan luncur dan mempertahankan status *trayektori* tetap berada di sekitar permukaan luncur, diperlukan dua macam sinyal kendali, yaitu sinyal kendali *ekivalen* yang berfungsi untuk membawa status *trayektori* menuju permukaan luncur (u_{eq}) dan sinyal kendali natural yang berfungsi untuk mempertahankan status *trayektori* agar tetap berada di sekitar permukaan luncur (u_n).Sinyal kendali total pada SMC adalah sebagai berikut :

$$u = u_{eq} + u_N \quad (9)$$

Proses identifikasi menggunakan metode Strejc

Pemodelan matematika untuk *loop* tertutup dalam kondisi beban nominal sesuai dengan metode *Strejc* pada persamaan 1 adalah:

$$G_T(s) = \frac{1,0529e^{-0,5216s}}{(10,8904s + 1)^2}$$

$$G_T(s) = \frac{0,5492s + 1,0529}{118,6008s^2 + 21,7808s + 1}$$

Langkah yang sama dilakukan terhadap kondisi beban maksimal dan minimal, hasil model *plant* pada *loop* tertutup adalah terdapat pada tabel 2 berikut:

Pemodelan Loop terbuka

Mengacu data dari peneliti sebelumnya, yang melakukan perhitungan pada modul *Level and Flow Process Rig 38-100*, kemudian dilakukan identifikasi dengan metode *Srejc* terhadap grafik yang didapatkan untuk *loop* terbuka, hasil perhitungannya adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Pembebanan level Nominal, Maksimal dan Minimal *loop* terbuka (okky,2012)

Beban	Model
Nominal	$G_T(s) = \frac{0,5492s + 1,0529}{118,6008s^2 + 21,7808s + 1}$
Maksimal	$G_T(s) = \frac{0,8881s + 0,9329}{185,3111s^2 + 27,2258s + 1}$
Minimal	$G_T(s) = \frac{0,4228s + 1,0571}{84,6014s^2 + 18,3958s + 1}$
Nominal	$G(s) = \frac{1,6026s + 3,0724}{1211,7659s^2 + 217,7307s + 1}$
Maksimal	$G(s) = \frac{1,2638s + 1,3276}{923,3721s^2 + 131,8698s + 1}$
Minimal	$G(s) = \frac{1,3414s + 3,2024}{897,3820s^2 + 191,2851s + 1}$

Desain Pengendali Sliding Mode

Fungsi transfer *plant Coupled Tank* dimisalkan menjadi fungsi transfer dimana koefisien numerator dan denominator dimisalkan menjadi variabel yang bernilai tetap. Maka fungsi transfer *plant* menjadi:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{as - b}{ps^2 + qs + w} \quad (10)$$

Dengan nilai:

- a=1,6026,
- b=3,0724,
- p=1211,7659,
- q=217,7307,
- w=1

Kemudian direpresentasikan dalam bentuk persamaan diferensial sebagai berikut:

$$p\ddot{y} + q\dot{y} + wy = au + bu$$

$$\ddot{y} = x = \frac{a}{p}\dot{y} - \frac{w}{p}y + \frac{a}{p}\dot{u} + \frac{b}{p}u \quad (11)$$

Kemudian, ambil sinyal *error* sebagai variabel *state*

$$x_1 = e$$

$$x_2 = \dot{x}_1 = \dot{e}$$

Persamaan untuk sinyal *error* adalah:

$$e = r - y \rightarrow \dot{x}_1 = r - \dot{y}$$

Karena *setpoint* tetap (permasalahan *reference*), maka:

$$\dot{x}_1 = x_2 = -\dot{y}$$

$$\ddot{x}_1 = \dot{x}_2 = -\ddot{y}$$

Sehingga:

$$\dot{x}_2 + \frac{a}{p}\dot{u} = -\frac{w}{p}x_1 - \frac{q}{p}x_2 - \frac{b}{p}u + \frac{w}{p}r$$

Sehingga didapatkan persamaan state-space:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 + \frac{a}{p}\dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{w}{p} & -\frac{q}{p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{b}{p} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{b}{p} \end{bmatrix} r \quad (12)$$

Misalkan:

$$z_1 = x_1$$

$$z_2 = x_2 + \frac{a}{p}u$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{w}{p} & -\frac{q}{p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{a}{p} \\ -\frac{ap-bp}{p^2} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{w}{p} \end{bmatrix} r \quad (13)$$

Didefinisikan suatu permukaan luncur:

$$\sigma_s = \alpha e + \dot{e} = 0$$

$$\sigma_s = \alpha e_1 + x_2 = 0$$

Dimana $\alpha > 0$

Maka akan dapat dicari sinyal kendali ekivalen dengan asumsi bahwa sinyal kendali natural adalah nol, sehingga:

$$\dot{\sigma} = 0$$

$$\alpha\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = 0$$

$$u_{eq} = \frac{1}{b}(ap - q)x_2 - wx_1 + wr - au_{eq} \quad (14)$$

Setelah didapat sinyal kendali ekivalen maka dapat ditemukan sinyal kendali natural sebagai berikut:

$$u_N = K \cdot \text{sat} \frac{1}{b}(\alpha x_1 + x_2) - au_N \quad (15)$$

dimana $K > 0$

Dengan demikian didapat untuk sinyal kendali total adalah sebagai berikut:

$$u = u_{eq} + u_N$$

$$u = \frac{1}{b}(ap - q)x_2 - wx_1 + wr - au_{eq} + \dot{u}_N +$$

$$K \cdot \text{sat} \frac{1}{b}(\alpha x_1 + x_2) - a \quad (16)$$

Parameter pengendali *Sliding Mode* pada penelitian ini adalah:

$$K=80$$

$$\alpha=0,15$$

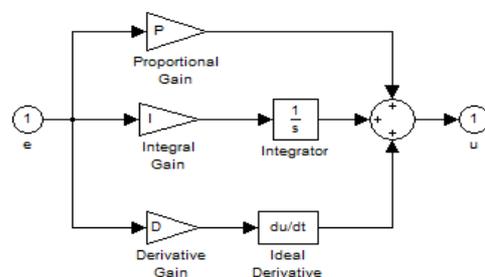
Angka tersebut dipilih berdasarkan hasil *trial and error*.

Persamaan (15) merupakan sinyal total hasil penjumlahan dari sinyal kendali ekivalen dan natural yang didesain menggunakan metode SMC di *simulink* matlab.

Desain Pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID)

Bentuk umum persamaan pengendali PID adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (17)$$



Gambar 4. Sub blok pengendali PID

Untuk mengetahui respon sistem pengendalian *level Coupled Tank* perlu dilakukan simulasi. Penalaan parameter pengendali

dilakukan secara trial and error hingga mendapatkan respon yang paling baik, dengan menetapkan nilai $K_p= 10000$, $K_i= 0.1$, $K_d= 0.1$.

Desain Pengendali SMC hybrid PID

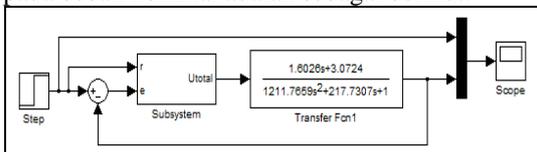
Hybrid antara SMC dan PID merupakan hasil rancangan SMC pada *Coupled Tank* ditambahkan rancangan PID, penggabungan ini diharapkan mampu memberikan keluaran yang lebih stabil dengan menetapkan nilai $K_p= 10000$, $K_i= 0.1$, $K_d= 0.1$. Sehingga didapatkan rumus sebagai berikut:

$$u = \frac{1}{b}(ap - q)x_2 - wx_1 + wr - ai_{eq} + K \cdot \text{sat} \left(\frac{1}{b}(\alpha x_1 + x_2) - ai_N + Kpe(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(t)dt \right) \quad (18)$$

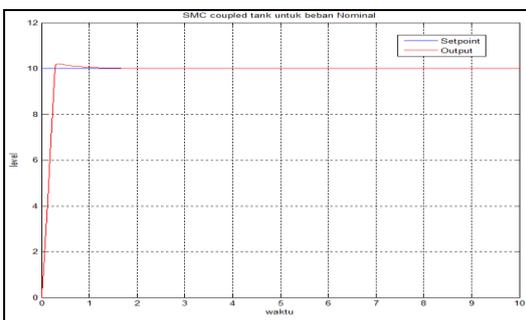
Analisa dan Hasil

Analisa pengendali SMC untuk Mencapai Setpoint pada Level Coupled Tank

Analisa pengendalian *level coupled tank* menggunakan pengendali SMC pada ketiga pembebanan yaitu nominal, minimal, dan maksimal menggunakan parameter plan untuk nilai $K=320$ dan $\alpha=0,05$. Pengendalian *level Coupled Tank* menggunakan pengendali SMC pada beban nominal adalah sebagai berikut:



Gambar 5. Diagram blok pengendalian *Level Coupled Tank* menggunakan SMC pada beban Nominal



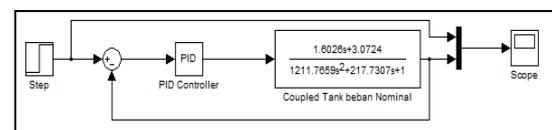
Gambar 6. Grafik simulasi pengendalian *Level Coupled Tank* menggunakan SMC pada beban nominal

Dari grafik beban nominal gambar 4.2 diatas dapat dijelaskan bahwa nilai output mencapai titik puncak pada ketinggian 10,205 meter, dan dapat mencapai keadaan tunak *setpoint*

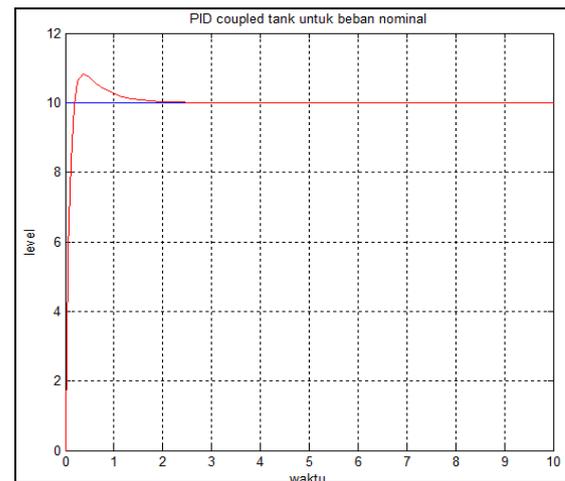
pada detik ke 2. Nilai respon transien grafik tersebut adalah: *delay time* (t_d) = 0,149 detik, *rise time* (t_r) 5% ke 95% = 0,2615 detik, *peak time* (t_p) = 0,33 detik, *settling time* (t_s) = 0,326 detik dan *Error steady state* (e_{ss}) = 10-10 = 0 %

Analisa pengendali Proporsional Integral Derivative (PID) untuk Mencapai Setpoint pada Level Coupled Tank

Analisa pengendalian *level coupled tank* menggunakan pengendali PID dilakukan dengan metode *trial and error* dengan menetapkan nilai $K_p= 10000$, $K_i= 0.1$, $K_d= 0.1$. Diagram blok dan grafik untuk beban nominal adalah sebagai berikut:



Gambar 7. Diagram blok pengendalian *Level Coupled Tank* menggunakan PID pada beban Nominal



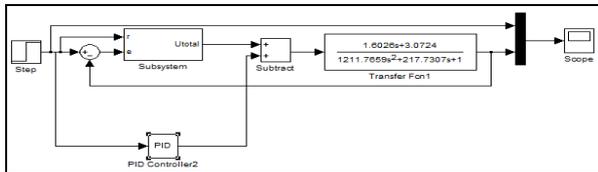
Gambar 8 Grafik simulasi pengendalian *Level Coupled Tank* menggunakan PID pada beban nominal

Dari grafik beban nominal gambar 8 diatas dapat dijelaskan bahwa nilai output mencapai titik puncak pada ketinggian 10,816 meter, dan dapat mencapai keadaan tunak *setpoint* pada detik ke 2,52. Nilai respon transien grafik tersebut adalah: *delay time* (t_d) = 0,05 detik, *rise time* (t_r) 5% ke 95% = 0,159 detik, *peak time* (t_p) = 0.352 detik, *settling time* (t_s) = 1,09 detik dan *Error steady state* (e_{ss}) = 10-9,982=0,018/0,00982= 0.183 %

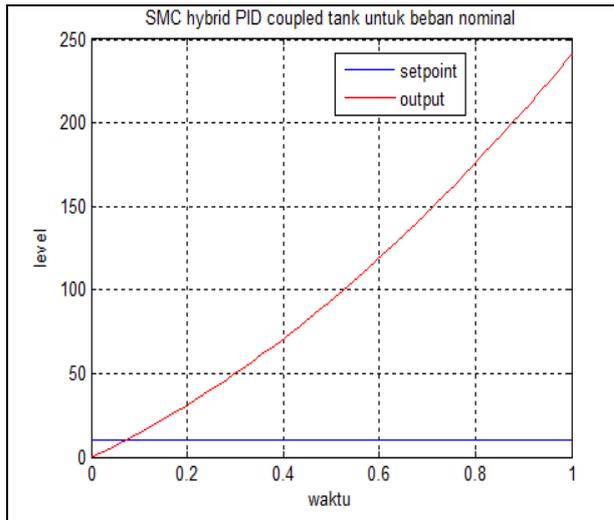
Analisa pengendali SMC hybrid PID untuk Mencapai Setpoint pada Level Coupled Tank

Analisa pengendalian *level coupled tank* menggunakan pengendali SMC hybrid PID dilakukan metode *trial and error* dengan menetapkan nilai parameter PID yang sama

dengan pengendali PID saja yaitu $K_p = 10000$, $K_i = 0.1$, $K_d = 0.1$. Diagram blok dan grafik untuk beban nominal adalah sebagai berikut:



Gambar 9 Diagram blok pengendalian *Level Coupled Tank* menggunakan SMC hybrid PID pada beban Nominal

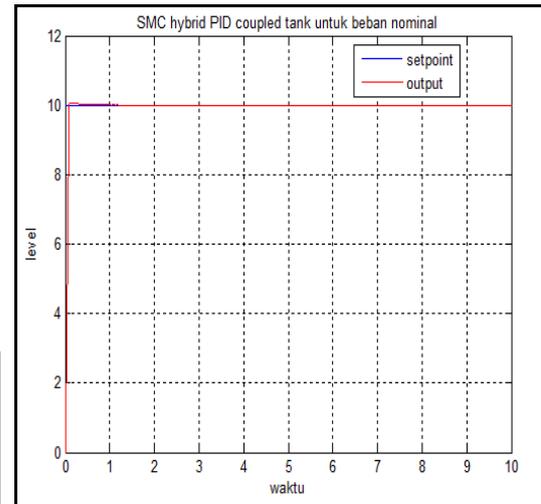


Gambar 10 Grafik simulasi pengendalian *Level Coupled Tank* menggunakan pengendali SMC hybrid PID pada beban nominal

Dari ketiga grafik pengendalian *Level Coupled Tank* menggunakan metode SMC hybrid PID, dengan parameter yang sama terhadap simulasi yang dilakukan untuk menghitung nilai SMC dan PID, maka didapatkan hasil simulasi dengan *output* yang belum mampu mengikuti *setpoint* yang diinginkan. Hal ini terjadi karena nilai parameter PI terlalu besar, sehingga memengaruhi *setpoint* dan naik dengan cepat sehingga tidak mampu lagi kembali ke *setpoint*.

Oleh karena itu perlu di dilakukan perubahan nilai parameter baik itu PID maupun SMC, dalam hal ini setelah dilakukan *trial and error* maka didapatkan nilai parameter $K_p = 3$, $K_i = 0.1$, $K_d = 0.1$, dan parameter $K = 320$ dan $\alpha = 0,05$. Dengan demikian didapatkan grafik *hybrid* untuk ketiga pembebanan sebagai

berikut:



Gambar 11 Grafik simulasi pengendalian *Level Coupled Tank* menggunakan SMC hybrid PID pada beban nominal dengan parameter yang berbeda

Dari grafik beban nominal gambar 11 diatas dapat dijelaskan bahwa nilai output mencapai titik puncak pada ketinggian 10,064 meter, dan membutuhkan waktu 0,2 detik untuk mencapai keadaan tunak. Nilai respon transien grafik tersebut adalah: *delay time* (t_d) = 0,04 detik, *rise time* (t_r) 5% ke 95% = 0,071 detik, *peak time* (t_p) = 0,102 detik, *settling time* (t_s) = 0,2 detik dan *Error steady state* (e_{ss}) = 0,01 %.

Analisa Perbandingan Hasil Respon Transien Pengendali SMC dan PID dan SMC hybrid PID

Dari analisa ketiga pengendali yaitu SMC, PID dan SMC hybrid PID, kemudian dilakukan perbandingan untuk ketiga pengendali tersebut. Perbandingan ketiga pengendali tersebut terdapat pada tabel 4, 5, dan 6 sebagai berikut:

Tabel 3 Hasil Analisa Pengendali SMC Dalam Mencapai *Setpoint*

	SMC		
	Beban Nominal	Beban minimal	Beban maksimal
t_d	0,149 detik	0,1316 detik	0,1519 detik
t_r	0,2615 detik	0,2132 detik	0,2592 detik
t_p	0,33 detik	0,1312 detik	0,3773 detik
t_s	0,326 detik	0,886 detik	1,164 detik
e_{ss}	0 %	0.05 %	0.01 %

Tabel 4 Hasil Analisa Pengendali PID Dalam mencapai *setpoint*

Tabel 5 Hasil Analisa Pengendali SMC *hybrid* PID Dalam Mencapai *Setpoint* menggunakan parameter yang berbeda

	SMC <i>hybrid</i> PID		
	Beban Nominal	Beban minimal	Beban maksimal
t_d	0,04 detik	0,035 detik	0,04 detik
t_r	0,071 detik	0,062 detik	0,070 detik
t_p	0,102 detik	0,089 detik	0,11 detik
t_s	0,2 detik	0,2 detik	1,18 detik
e_{ss}	0,01%	0,05 %	0 %

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa respon transien antara pengendali SMC, PID dan SMC *hybrid* PID dalam pencapaian *setpoint*. Dimana dalam simulasi ini dilakukan dengan parameter yang sama untuk simulasi PID, SMC maupun *hybrid*. Nilai parameter PID digunakan nilai $K_p=10000$, $K_i=0.1$, $K_d=0.1$ sedangkan SMC digunakan konstanta $K=80$ dan $\alpha=0,15$.

Untuk nilai *delay time* (t_d) dan *rise time* (t_r), pengendali PID memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan pengendali SMC. Namun untuk nilai *peak time* (t_p), *settling time* (t_s) pengendali SMC memiliki nilai respon transien yang lebih cepat. Namun untuk simulasi SMC *hybrid* PID penggunaan parameter yang sama tidak mampu mendapatkan nilai set point yang diinginkan. Namun dengan menggunakan nilai parameter yang berbeda simulasi SMC *hybrid* PID mampu memberikan nilai yang lebih cepat dibandingkan kedua pengendali PID dan SMC tersebut.

Pengujian terhadap pengendali SMC *hybrid* PID kemudian menggunakan nilai parameter yang berbeda, dimana untuk nilai parameter $K_p=3$, $K_i=0.1$, $K_d=0.1$, dan parameter $K=320$ dan $\alpha=0,05$. Hasilnya adalah respon transien pengendali SMC *hybrid* PID lebih cepat dibandingkan dengan kedua pengendali tersebut, yaitu untuk beban nominal, nilai *delay time* (t_d)=0,04 detik, *rise time* (t_r)=0,071 detik, *peak time* (t_p)= 0,102 detik dan *settling time* (t_s)= 0,2 detik. Sedangkan nilai respon transien pengendali PID untuk beban nominal memiliki nilai *delay time* (t_d) = 0,05 detik, *rise time* (t_r) = 0,159 detik, *peak time* (t_p) = 0,352 detik, dan *settling time* (t_s) = 1,09 detik, dan untuk pengendali SMC memiliki nilai *delay time* (t_d) = 0,149 detik, *rise time* (t_r) =

0,2615 detik, *peak time* (t_p) = 0,33 detik, *settling*

	PID		
	Beban Nominal	Beban minimal	Beban maksimal
t_d	0,05 detik	0,045 detik	0,05 detik
t_r	0,159 detik	0,139 detik	0,172 detik
t_p	0,352 detik	0,138 detik	0,43 detik
t_s	1,09 detik	0,886 detik	1,284 detik
e_{ss}	0,183 %	0,152 %	0,204%

time (t_s) = 0,326 detik.

Kesimpulan

Berdasarkan analisa dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut

1. Simulasi ini dilakukan dengan parameter yang sama untuk simulasi PID, SMC maupun *hybrid*. Nilai parameter PID digunakan nilai $K_p=10000$, $K_i=0.1$, $K_d=0.1$ sedangkan SMC digunakan konstanta $K=80$ dan $\alpha=0,15$. Untuk nilai *delay time* (t_d) dan *rise time* (t_r), pengendali PID memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan pengendali SMC. Namun untuk nilai *peak time* (t_p), *settling time* (t_s) pengendali SMC memiliki nilai respon transien yang lebih cepat.
2. Pengujian terhadap pengendali SMC *hybrid* PID kemudian menggunakan nilai parameter yang berbeda, dimana untuk nilai parameter $K_p=3$, $K_i=0.1$, $K_d=0.1$, dan parameter $K=320$ dan $\alpha=0,05$. Hasilnya adalah respon transien pengendali SMC *hybrid* PID lebih cepat dibandingkan dengan kedua pengendali tersebut, untuk beban nominal, nilai *delay time* (t_d)=0,04 detik, *rise time* (t_r)=0,071 detik, *peak time* (t_p)= 0,102 detik dan *settling time* (t_s)= 0,2 detik. Sedangkan nilai respon transien pengendali PID untuk beban nominal memiliki nilai *delay time* (t_d) = 0,05 detik, *rise time* (t_r) = 0,159 detik, *peak time* (t_p) = 0,352 detik, dan *settling time* (t_s) = 1,09 detik, dan untuk pengendali SMC memiliki nilai *delay time* (t_d) = 0,149 detik, *rise time* (t_r) = 0,2615 detik, *peak time* (t_p) = 0,33 detik, *settling time* (t_s) = 0,326 detik.

Daftar Pustaka

- [1] Arif,Shaumi dan Pramudijanto, Josaphat. “Desain dan Implementasi Kontroler *Fuzzy-Supervised* PID berbasis PLC pada Sistem Kontrol Level Cairan *Coupled-Tank*”. Skripsi Jurusan Teknik Elektro. ITS,Surabaya. 2013.
- [2] Engineering & Scientific Laboratory Instruments. “*Study Equipment Process Control System*”. <http://www.esli.com.dz/doc/Products/02/control/index.htm>. [Diakses tanggal 10 April 2015].
- [3] Huda, Miftahul. “Protokol komunikasi *modbus* RTU pada sistem otomasi industri”. Tenaga Professional LPP kampus industri. 2010
- [4] Krisnan, R. “*Electric Motor Drives Modeling, Analysis, And Control*”. Prentice Hall. 2001
- [5] Melvin, Jesse. “Perancangan dan implementasi pengendali Model *Predictive Control* dengan Constraine untuk pengaturan Level pada *Coupled-Tank Basic Process Rig 38-100*”. Jurusan Teknik Elektro. Universitas Indonesia.(2008)
- [6] Nur Qomarudin, Mochamad. “Kontroler *Fuzzy-PI* untuk *Plant Coupled-Tank*”. Skripsi Jurusan Teknik Elektro. ITS,Surabaya. 2013.
- [7] Rahmad Fua’ad, Mohammad dan Rozali MD, Sahazati. “Modling and Controlling Design Level Sistem: Analysis & Comparison”. Jurnal Teknologi. Universitas Teknologi Malaysia.2013.
- [8] Sadli, Muhammad. “Desain Kontroler PI dengan *Decoupling* pada Sistem Kendali *Level Coupled Tank*”. Jurusan Teknik Elektro, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe.2014
- [9] Slotine, Jean-Jacquest E. “Applied Nonlinier Control”.1991
- [10] Sugianto Okky. “Perancangan dan Implementasi Kontroler *Sliding Mode* untuk Pengaturan *Level* pada *Coupled Tank*”. Skripsi Jurusan Teknik Elektro, ITS, Surabaya. 2012.
- [11] W. L. Slotine . “Applied Nonlinear Control”.Prentice Hall.1991.