

Analisa Performansi Pengendali Hybrid Sliding Mode (DSM) dan Sliding Mode dengan Permukaan Luncur PID Pada Proses CSTR

Dian Mursyitah¹, Ahmad Faizal², Ewi Ismaredah³, Dila Marta Putri⁴

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN SUSKA RIAU^{1,2,3,4}

Jl. HR. Soebrantas Km. 155 Pekanbaru - Riau

e-mail: dmursyitah@uin-suska.ac.id; ahmad.faizal@uin-suska.ac.id; ewi.ismaredah@uin-suska.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengajukan analisa perbandingan pengendali untuk pengendalian level dan konsentrasi pada proses CSTR. Pengendali yang dirancang untuk dianalisa performansinya adalah sliding mode. Perbandingan analisa performansi pengendali ditunjukkan oleh perbedaan permukaan luncur. Perancangan dimulai dengan merancang permukaan luncur dynamic dan PID pada pengendali sliding mode. Kemudian kedua pengendali tersebut dikombinasikan. Analisa dilakukan dengan membandingkan performansi ketiga pengendali tersebut dalam mengendalikan level dan konsentrasi pada sistem CSTR. Hasil simulasi menunjukkan pengendali hybrid mampu mencapai setpoint lebih cepat daripada dua pengendali lainnya yaitu hal ini dibuktikan dengan nilai $t_s = 0,016$ s untuk level dan $t_s = 0,072$ s untuk konsentrasi. Namun pengendali sliding mode dengan permukaan luncur PID merupakan pengendali yang mampu mengurangi error steady state yang paling besar dibandingkan dua pengendali lainnya yaitu dengan nilai $E_{ss} = 0$.

Kata Kunci : CSTR, dynamic, PID sliding mode, Hybrid

Abstract

This study proposes a comparative analysis of controls for controlling levels and concentrations in the CSTR process. The controller designed to analyze its performance is sliding mode. Comparison of controller performance analysis is shown by differences in sliding surfaces. The design starts with designing the dynamic sliding surface and the PID on the sliding mode controller. Then, the two controllers are combined. Analysis is done by comparing the performance of the three controllers in controlling the level and concentration of the CSTR system. The simulation results show hybrid controllers are able to reach the set point faster than the other two controllers, this is proved by the value of $t_s = 0.016$ s for the level and $t_s = 0.072$ s for concentration. However, sliding mode controller with PID sliding surface is a controller that is able to reduce the largest steady state error compared to the other two controllers, with the value $E_{ss} = 0$.

Keywords: CSTR, dynamic, PID sliding mode, Hybrid

1. Pendahuluan

Perkembangan ilmu di bidang teknik kendali semakin pesat. Teknik pengendalian pun semakin berkembang. Dalam merancang sistem kendali, pemilihan pengendali yang tepat sangat berpengaruh pada kesuksesan sistem kendali yang dirancang. Pengendali yang baik adalah mampu menyelesaikan persoalan sistem yang muncul. Seperti pencapaian *setpoint*, penanggulangan gangguan, dan perubahan *setpoint*. Saat ini perancangan pengendali dapat dilakukan dengan mengkombinasikan pengendali satu dengan pengendali lainnya yang lebih dikenal dengan istilah hybrid. Banyak keuntungan yang dapat diperoleh dengan mengkombinasikan pengendali. Salah satunya adalah masing-masing pengendali dapat menyelesaikan kelemahan yang terdapat pada masing-masing pengendali. Pengendali juga harus mampu menangani persoalan non linieritas sistem. Persoalan non linieritas serta pengkombinasian pengendali dapat ditemui pada sistem (CSTR) dan pengendalian prosesnya. CSTR adalah sebuah tangki pengaduk yang berguna untuk mencampurkan dua fluida atau lebih. CSTR banyak digunakan pada proses kimia industri seperti industri makanan, minuman, dan bioteknologi. Pada sistem CSTR terdapat beberapa variabel yang dapat dikendalikan diantaranya yaitu konsentrasi (*concentration*), ketinggian (*level*), suhu (*temperature*), tekanan (*pressure*), laju aliran (*flow*) dan lain sebagainya. Oleh karena itu, CSTR termasuk dalam sistem yang bersifat non linier multivariabel. Beberapa penelitian telah dilakukan pada sistem CSTR dengan pengendali kombinasi. Yang pertama adalah pengendalian level dan konsentrasi sistem CSTR dengan memodelkan sistem CSTR dengan menggunakan pengendali *sliding mode* yang dikombinasikan dengan pengendali Proporsional dan Integral (PI) yang dirancang pada permukaan luncur SMC. Hasil yang diperoleh disimpulkan bahwa pengendali *sliding mode* dengan permukaan luncur PI

menunjukkan performansi yang lebih baik dari SMC. Hal ini dapat dilihat dari waktu *transient* yang cepat, kekokohnya terhadap gangguan, dan meminimumkan *error steady state*[1].

Penelitian rujukan selanjutnya adalah mengendalikan proses pada CSTR menggunakan SMC dikombinasikan dengan pengendali Proporsional dan Derivatif (PD). Pengendali PD dirancang pada permukaan luncur pengendali SMC. Kemudian hasil perancangannya dibandingkan dengan SMC dan PID. Dari penelitian yang dilakukan disimpulkan bahwa Pengendali *sliding mode* dengan permukaan luncur PD tidak berhasil membuat pengendalian *level* mencapai *setpoint* yang diinginkan. Pada saat diberikan gangguan, pengendali *sliding mode* dengan permukaan luncur PD menghasilkan kinerja yang kurang baik dibandingkan pengendali *sliding mode* dan PID, tetapi SMC dengan permukaan luncur PD dapat menghilangkan *overshoot* dibandingkan dengan pengendali SMC[2]. Penelitian dengan kombinasi PID juga telah dilakukan. Perancangan SMC dikombinasikan dengan pengendali PID yang dirancang pada permukaan luncurnya. Hasil penelitian menunjukkan pengendali *sliding mode* dengan permukaan luncur PID menunjukkan performansi yang lebih baik daripada pengendali *sliding mode*. Hal ini dapat dilihat dari waktu *transient* yang cepat, kemampuan menjaga kestabilan dan kekokohan terhadap gangguan yang diberikan, dan meminimumkan *error steady state*[3]. Kemudian, penelitian pada sistem CSTR ini dikembangkan lagi dengan merancang pengendali SMC yang dikombinasikan dengan permukaan luncur static dan dynamic. Kemudian, kedua pengendali tersebut dibandingkan performansinya. Penelitian ini membuktikan bahwa performansi *dynamic sliding mode* memiliki performansi yang lebih baik daripada *static sliding mode* dalam hal pencapaian *setpoint*[4].

Berdasarkan ketiga penelitian tersebut, pengendali *sliding mode* dipilih karena terkenal akan kekokohnya dalam menghadapi berbagai gangguan eksternal, ketidakpastian sistem maupun parameter [5]. Tujuan utama pengendali *sliding mode* adalah untuk memaksa dan membatasi variabel yang dikendalikan berada pada permukaan luncur yang dirancang dan menjaganya agar dapat tetap berada pada keadaan yang diinginkan [5]. Namun, selain memiliki kelebihan dalam menghadapi berbagai gangguan, pengendali *sliding mode* juga memiliki kekurangan yaitu terjadinya fenomena *chattering*. *Chattering* merupakan osilasi keluaran pengendali dengan frekuensi tinggi yang disebabkan oleh *switching* yang sangat cepat untuk membentuk *sliding mode*. Osilasi yang sangat tinggi pada sinyal kendali ini menyebabkan ketidakstabilan pada sistem. Selain menyebabkan ketidakstabilan, *chattering* yang besar juga akan menyebabkan *error steady state* yang cukup besar. Fenomena *chattering* ternyata dapat dikurangi dengan cara mengubah fungsi *signum* pada sinyal kendali menjadi fungsi *saturation* [6][7]. Namun, perubahan fungsi *signum* ini hanya bisa mengurangi fenomena *chattering*, tetapi tidak menghilangkan efek *error steady state* secara signifikan.

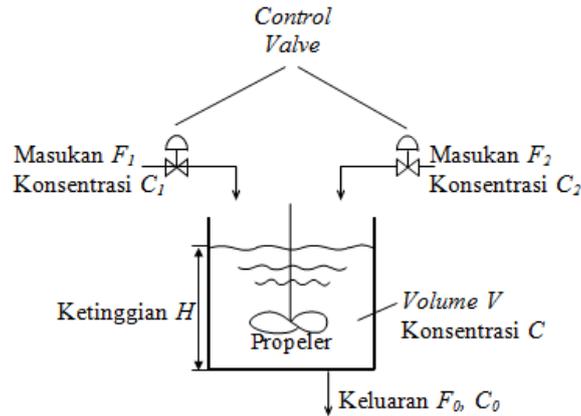
Solusi dari permasalahan *error steady state* ini memerlukan perancangan pengendali *sliding mode* yang baik. Pada perancangan pengendali *sliding mode*, yang paling penting adalah perancangan permukaan luncur. Permukaan luncur ternyata dapat dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan sistem yang dikendalikan. Hal ini dibuktikan dengan penelitian-penelitian terdahulu [1][2][3][4]. Berdasarkan tiga penelitian tersebut, yang memiliki performansi yang paling bagus adalah penelitian dari Boy Putra dengan melakukan perancangan pengendali dengan permukaan luncur PID. Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Anton (2014) yang membandingkan pengendali *static* dan *dynamic sliding mode*, penelitian ini menunjukkan bahwa pengendali *dynamic sliding mode* lebih cepat mencapai *setpoint* dari pada *static sliding mode*. Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan, penelitian tentang analisa performansi pengendali *sliding mode* dengan permukaan luncur PID yang dikombinasikan (*hybrid*) dengan *dynamic sliding mode* yang terbukti lebih bagus pada proses sistem CSTR diajukan.

2. Metode Penelitian

Alur penelitian dimulai dengan studi literature, validasi model matematis, perancangan pengendali, pengujian simulasi dan analisa, dan hasil kesimpulan.

2.1. Pemodelan Matematis Sistem CSTR

CSTR adalah tangki pengaduk yang berfungsi untuk mencampurkan 2 buah fluida atau lebih. CSTR mempunyai 2 masukan, yaitu laju alir 1 (F_1) dengan konsentrasi 1 (C_1) dan laju alir 2 (F_2) dengan konsentrasi 2 (C_2). F_0 merupakan laju aliran yang keluar dari tangki yang mempengaruhi ketinggian di dalam tangki



Gambar 1 Dinamika Sistem CSTR[1]

Berdasarkan hukum kesetaraan *volume* tangki dengan asumsi tidak adanya material yang keluar dalam bentuk uap, maka pemodelan matematis sistem pengendalian level dan konsentrasi dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A}(F_1 + F_2) - \frac{K_c}{A}\sqrt{H} \quad (2.1)$$

$$\frac{dC_0}{dt} = \frac{K_p}{AH}[(C_1 - C_0)F_1 + (C_2 - C_0)F_2] \quad (2.2)$$

Data parameter proses CSTR dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Parameter proses CSTR

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Laju aliran 1	F_1	0.15	m^3/s
Laju aliran 2	F_2	0.6	m^3/s
Konsentrasi 1 (konstan)	C_1	1	$kmol^3/s$
Konsentrasi 2 (bervariasi)	C_2	1.2 – 1.4	$kmol^3/s$
Volume	V	1	m^3
Luas permukaan tangki	A	1	m^2
Konstanta celah (beban)	K_c	0.5 – 1	-
Konstanta pengaduk	K_p	0.2	-

Untuk menghilangkan interaksi silang antara level dan konsentrasi dilakukan proses decouple, sehingga model matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$\dot{H} = \frac{1}{A}(F_1 + F_2) - \frac{K_c}{A}\sqrt{H} \quad (2.3)$$

$$\dot{C}_0 = \frac{1}{AH}(-C_0F_{in} + C_{in}F_{in}) \quad (2.4)$$

2.2. Perancangan Pengendali

2.2.1. Perancangan Pengendali Dyanmic Sliding Mode

Perancangan pengendalian *level* pengendali *dynamic sliding mode* sama dengan perancangan pengendali *sliding mode* hanya saja fungsi permukaan luncurnya yang berbeda. Karena sistem berorde 1 maka:

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

$$\dot{S} = \dot{e} + \lambda e \quad (2.5)$$

Dimana

$$e = H - H_{ref}$$

$$\ddot{e} = \ddot{H} - \ddot{H}_{ref}$$

Kemudian

$$\dot{S} = \ddot{H} - \ddot{H}_{ref} + \lambda(\dot{H} - \dot{H}_{ref}) \quad (2.6)$$

sehingga

$$\dot{S} = \ddot{H} - \ddot{H}_{ref} + \lambda(a_1 F_{in} + b_1 \sqrt{H} - \dot{H}_{ref})$$

Untuk mendapatkan U_{eq} atau \bar{F}_{in} dengan $\dot{S} = 0$.

$$0 = \ddot{H} - H_{reff}'' + \lambda a_1 F_{in} + \lambda b_1 \sqrt{H} - \lambda H_{reff}'$$

$$F_{in} = \frac{1}{a_1 \lambda} (-\ddot{H} + H_{reff}'' - \lambda b_1 \sqrt{H} + \lambda H_{reff}') \quad (2.7)$$

Keterangan: $F_{in} = U_{eq} = \text{Sinyal Kendali Ekuivalen}$

Untuk mendapatkan U_n berdasarkan fungsi Lyapunov $\dot{V} = S\dot{S}$.

$$\dot{V} = S[\ddot{H} - H_{reff}'' + \lambda a_1 F_{in} + \lambda b_1 \sqrt{H} - \lambda H_{reff}']$$

$$U_n = -\frac{\eta}{\lambda a_1} \text{sign}(S) \quad (2.8)$$

Jadi, persamaan pengendali *level* pada sistem CSTR dengan pengendali *dynamic sliding mode* adalah :

$$U = U_{eq} + U_n$$

Untuk menghilangkan fenomena *chattering* fungsi *signum* (sign) diubah menjadi fungsi *saturation* (sat).

$$F_{in} = \frac{1}{a_1 \lambda} (-\ddot{H} + H_{reff}'' - \lambda b_1 \sqrt{H} + \lambda H_{reff}') - \frac{\eta}{\lambda a_1} \text{sat}(S) \quad (2.9)$$

Keterangan: $F_{in} = \text{Sinyal Kendali Total}$

Dimana $S = \dot{e} + \lambda e$

untuk pengendalian konsentrasi

$$C_{in} = \frac{1}{c \lambda} (-\ddot{C}_0 + C_{reff}'' - \lambda a_2 b_2 + \lambda C_{reff}') - \frac{\eta}{\lambda c} \text{sat}(S) \quad (2.10)$$

Keterangan: $C_{in} = \text{Sinyal Kendali Total}$

Dimana $S = \dot{e} + \lambda e$

2.2.2. Perancangan Pengendali Sliding Mode dengan Permukaan Luncur PID

Perancangan dimulai dengan merancang permukaan luncur PID

$$S(H, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e + \lambda_1 \int_0^t e(t) dt + \lambda_2 \frac{de}{dt} \quad (2.11)$$

Untuk pengendalian level

$$F_{in} = \frac{1}{a_1} (-b_1 \sqrt{H} + H_{reff}' - \lambda_1 H + \lambda_1 H_{reff}' - \lambda_2 \ddot{H} + \lambda_2 H_{reff}'') - \frac{\eta}{a_1} \text{sat}(S) \quad (2.12)$$

Keterangan: $F_{in} = \text{Sinyal Kendali Total}$

Dimana: $S = e + \lambda_1 \int_0^t e(t) dt + \lambda_2 e$

Untuk pengendalian konsentrasi

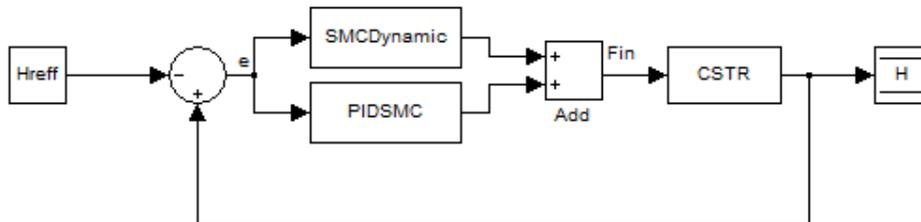
$$C_{in} = \frac{1}{c} (-a_2 b_2 + C_{reff}' - \lambda_1 C_0 + \lambda_1 C_{reff}' - \lambda_2 \ddot{C}_0 + \lambda_2 C_{reff}'') - \frac{\eta}{c} \text{sat}(S) \quad (2.13)$$

Keterangan: $C_{in} = \text{Sinyal Kendali Total}$

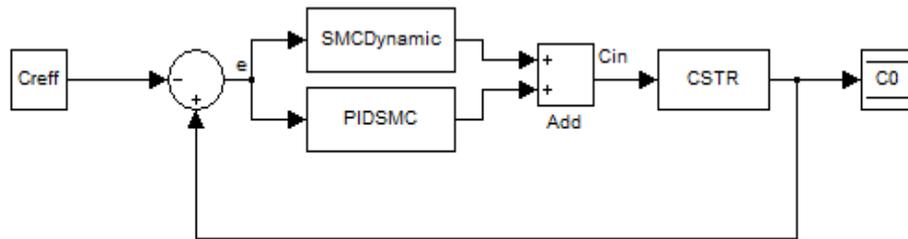
Dimana $S = e + \lambda_1 \int_0^t e(t) dt + \lambda_2 e$

2.2.3. Perancangan pengendali Hybrid

Perancangan pengendali hybrid dilakukan dengan menambahkan sinyal kendali total dari kedua pengendali, digambarkan dengan diagram blok berikut :



Gambar 2. Diagram Blok *Simulink Hybrid* Pengendali *Dynamic Sliding Mode* dan Pengendali *Sliding Mode* dengan Permukaan Luncur PID untuk Pengendalian *Level*

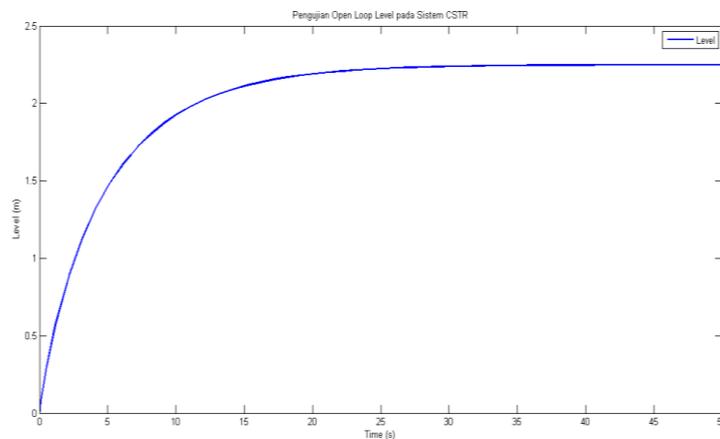


Gambar 3. Diagram Blok *Simulink Hybrid* Pengendali *Dynamic Sliding Mode* dan Pengendali *Sliding Mode* dengan Permukaan Luncur PID untuk Pengendalian Konsentrasi

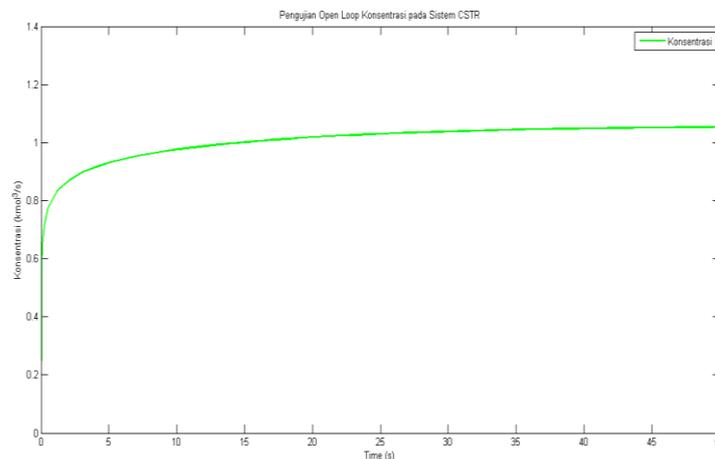
3. Hasil dan Analisa

3.1. Hasil Simulasi Validasi Model Matematis Sistem CSTR

Persamaan model matematis dari sistem CSTR yang ditunjukkan pada persamaan 2.3 dan 2.4 kemudian diuji tanpa menggunakan pengendali sehingga menghasilkan keluaran seperti pada Gambar 4 dan 5



Gambar 4. Keluaran Level pada saat simulasi *open loop*

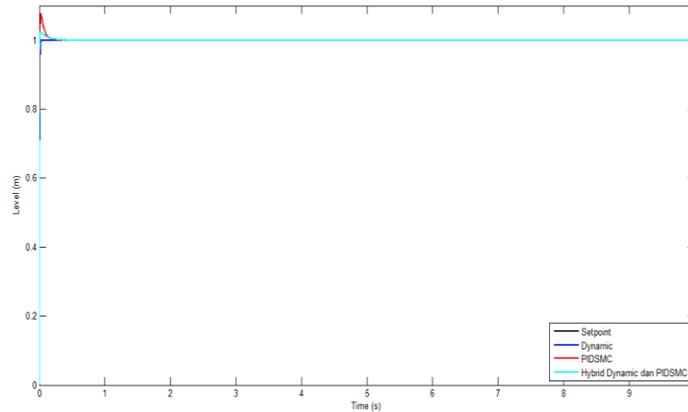


Gambar 5. Keluaran Konsentrasi pada saat simulasi *open loop*

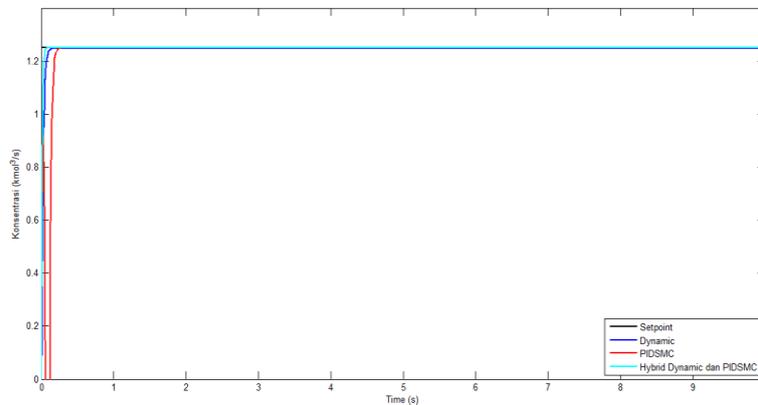
sistem CSTR menghasilkan dua keluaran berupa *level* yang diwakili dengan H, dan konsentrasi yang diwakili C_0 . Setelah selesai mendesain blok diagram *simulink* tersebut, maka *software simulink* Matlab disimulasikan dan menghasilkan grafik yang menyatakan respon keluaran *open loop* sistem. Hasil simulasi menunjukkan respon sistem belum mencapai setpoint yang diinginkan.

3.2. Hasil Simulasi Menggunakan Pengendali

Untuk pengendalian level menggunakan pengendali DMS diperoleh nilai eta (η) terbaik adalah 190, sementara nilai lamda (λ) terbaik adalah 0.1.



Gambar 6. Respon Keluaran Pengendalian *Level*



Gambar 7. Respon Keluaran Pengendalian Konsentrasi

Kedua parameter tersebut diperoleh menggunakan metode heuristic. Untuk pengendali konsentrasi nilai eta terbaik adalah 250 dengan lamda 0.1. Sementara untuk pengendalian level menggunakan pengendali sliding mode dengan permukaan luncur PID nilai eta disamakan dengan DSM yaitu 190 dengan terbaik yang diperoleh sementara nilai lamda 1 dan lamda 2 adalah 20 dan 0.00001. Untuk pengendalian konsentrasi diperoleh parameter secara berurutan adalah $\eta = 250$, nilai λ_1 dan λ_2 adalah 0.0001 dan 0.0001. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.

3.3. Analisa Respon Pengendali

Dari pengujian yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa pengendali *hybrid dynamic sliding mode* dan *sliding mode* dengan permukaan luncur PID mampu mencapai daerah stabil lebih cepat dari dua pengendali lainnya.

Tabel 2.2 Analisa Perbandingan Respon Transien dalam Pengendalian *Level* dan Konsentrasi

Parameter	<i>Dynamic</i>		PIDSMC		<i>Hybrid Dynamic dan PIDSMC</i>	
	<i>Level</i>	Konsentrasi	<i>Level</i>	Konsentrasi	<i>Level</i>	Konsentrasi
τ (s)	0,0068	0,0268	0,0057	0,0198	0,0033	0,0144
t_s (s)	0,034	0,134	0,029	0,099	0,016	0,072
t_r (s)	0,020	0,079	0,017	0,058	0,010	0,042
t_d (s)	0,017	0,067	0,014	0,049	0,008	0,036
E_{ss}	0,0005	0,0025	0,0000	0,0000	0,0011	0,0002

Hal ini dibuktikan dengan *settling time* untuk *level* sebesar 0,016 detik dan untuk konsentrasi sebesar 0,072 detik. Namun pengendali *sliding mode* dengan permukaan luncur PID mampu menghilangkan *error steady state* yang terjadi dari pada kedua pengendali lainnya. Ditunjukkan pada Tabel 2.2

4. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisa respon sistem yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa Dari analisa respon transien yang telah dilakukan membuktikan bahwa pengendali *hybrid dynamic sliding mode* dan *sliding mode* dengan permukaan luncur PID mampu mencapai daerah stabil dengan cepat dari pada kedua pengendali lainnya yaitu dengan $t_s=0,016$ detik untuk *level* dan $t_s=0,072$ detik untuk konsentrasi. Sedangkan pengendali yang mampu menangani permasalahan *error steady state* yang terjadi pengendali *sliding mode* dengan permukaan luncur PID merupakan pengendali yang paling baik dari kedua pengendali lainnya hal ini dibuktikan dengan $E_{ss} = 0$ untuk pengendalian *level* dan konsentrasi.

Daftar Pustaka

- [1] Mursyitah, Dian. *Decouple Sliding Mode* dengan Permukaan Luncur Proporsional dan Integral pada Sistem Non Linier Multi Variabel *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR). Institut Teknologi Sepuluh November: Surabaya. 2013
- [2] Mursyitah, Dian., dan Rice Novita. Analisis Pengaruh Kendali Proporsional Derivatif (PD) pada Permukaan Luncur *Sliding Mode Controller* pada Proses *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR). Seminar Nasional Teknologi Industri Universitas Trisakti Vol. 1 No. 48 Hal. 1-6. 2014.
- [3] Hidayat, Anton. Performansi *Sliding Mode Controller* dengan *Static* dan *Dynamic Sliding Surface*. Uin Suska Riau : Pekanbaru. 2014.
- [4] Ramanda, Boy Putra. Desain Aksi Kendali PID pada Permukaan Luncur *Decouple Sliding Mode Controller* pada Sistem Nonlinier Multivariabel *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR). Program Studi Teknik Elektro Uin Suska Riau. 2014.
- [5] Slotine, J-J.E., Weiping Li. *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall International, Inc. Hal. 276-284. 1991.
- [6] Yu, Gwo-Ruey dkk. *Optimal Positioning Control of a DC Servo Motor Using Sliding Mode*. IEEE International Conference on Control Applications. 2004.
- [7] Ogata, Katsuhiko. *Modern Control Engineering*. New Jersey : Prentice Hall, 1970.