

Pemodelan dan Pengaturan Adaptif untuk Sistem Hidrolik Tak Linier

M. Mulyadi Jayanegara^{*1}, Zulfaman², Nur Alif Mardiyah³

^{1,2,3}Universitas Muhammadiyah Malang

mulyadi.jn@gmail.com^{*1}, zulfatman78@gmail.com², nuralif@umm.ac.id³

Abstrak

Elektro-hidrolik merupakan jenis aktuator yang kompleks dengan ketidaklinieran yang tinggi dan mengandung unsur ketidakpastian di dalamnya. Oleh karena itu, untuk mendapatkan performa terbaik dari sistem elektro-hidrolik diperlukan pemodelan yang lebih akurat dan sistem pengaturan yang tepat. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan pemodelan sistem secara tak linier dan dilanjutkan dengan perancangan sistem pengaturan tak linier yang robust untuk sistem elektro-hidrolik. Dalam tulisan ini pemodelan dilakukan dengan menggunakan Sistem Identification Toolbox pada Matlab dari sepasang data input-output yang diambil dari sistem sebenarnya. Model dari sistem ditampilkan dalam bentuk tak linier, karena mengakomodasi ketidaklinieran, ketidakpastian dan gangguan dari sistem elektro-hidrolik. Sistem pengaturan menggunakan Sliding Mode Control (SMC) yang dikombinasikan dengan pengaturan Fuzzy dalam format Adaptif Sliding Mode Control (ASMC) untuk mengkompensasi perubahan parameter, ketidaklinieran, ketidakpastian dan gangguan pada pengaturan SMC. Stabilitas sistem pengaturan dijamin dengan fungsi Lyapunov. Hasil pemodelan tak linier menunjukkan nilai best-fit sebesar 94.65%. Sementara pengaturan ASMC menghasilkan performa lebih baik dibandingkan dengan pengaturan SMC, hal ini dibuktikan menggunakan metode Sum of Squared Tracking Errors (SSTE) menghasilkan nilai sebesar 0,0121.

Kata kunci: Adaptif Sliding Mode Control, elektro-hidrolik, Pemodelan tak-linier, Sliding Surface, Identifikasi Sistem

Abstract

Electro-hydraulic is a complex actuator with high nonlinearity and uncertainty variable on it. In order to get the best performance of the electro-hydraulic system, the more accurate modeling and appropriate control systems are required. This research aims to create a non-linear system model, followed by robust nonlinear setting specifically designed for electro-hydraulic. This model is created by using Toolbox Identification System in MatLab taken from input-output data from the actual system. Model of the system is presented in non-linear, because it accommodates the nonlinearity, uncertainty and external disturbance from the electro-hydraulic system. Control System uses Sliding Mode Control (SMC), which is combined with Fuzzy control system in the Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control (ASMC) form to compensate the parameter changes, nonlinearity, uncertainty and external disturbance. Setting system stability is controlled by Lyapunov function. The result of nonlinear model shows best-fit score up to 94.65%. Thus, by using Sum of Squared Tracking Errors (SSTE), it is proven that ASMC could produce better performance than SMC, with score up to 0.0121.

Keywords: Adaptive Sliding Mode Control, electro-hydraulic, nonlinear modeling, Sliding Surface, System Identification

1. Pendahuluan

Elektro-hidrolik adalah salah satu komponen penting yang banyak ditemukan pada dunia industri. Elektro-hidrolik banyak digunakan karena memiliki tenaga yang besar, presisi yang tinggi dan jarak pergerakan yang dapat diatur sesuai dengan kebutuhan. Dalam era modern sistem elektro-hidrolik mempunyai peranan yang sangat penting dalam sebuah industri seperti digunakan dalam pengereman pesawat terbang, ekskavator, dan alutsista militer. Untuk mendapatkan semua keunggulan tersebut, diperlukan suatu sistem pengaturan yang mempunyai algoritma pengaturan tersendiri untuk mengatur valve dalam sistem elektro-hidrolik [1]. Pada era modern, berbagai macam jenis sistem pengaturan untuk sistem hidrolik telah

dikembangkan, seiring dengan kebutuhan akan aktuator yang terus berkembang di dunia industri.

Merancang sistem pengaturan yang tepat, harus diawali dengan pemodelan dari sistem elektro-hidrolik, salah satunya adalah melalui metode Identifikasi Sistem. Pemodelan ini menggunakan data *input* dan data respons *output* menggunakan parameter secara matematis. Model sistem yang tepat harus menghasilkan respons *output* mirip dengan sistem sebenarnya [1]. Teknik yang tepat dalam hal penentuan pemodelan dari sebuah sistem yang model dan parameternya tidak diketahui disebut identifikasi sistem [2].

Saat ini, berbagai macam teknik identifikasi sistem diterapkan untuk memperkirakan model dari aktuator elektro-hidrolik, baik dalam bentuk linier maupun tak linier. Jenis Pemodelan linier, misalnya *Auto Regressive* (AR), *Auto Regressive Exogenous* (ARX), *Auto Regressive Moving Average with Exogenous Inputs* (ARMAX), *Output-Error* (OE) dan *Box-Jenkin* (BJ). Sedangkan beberapa teknik pemodelan tak linear yang digunakan diantaranya non-linear ARX (NARX) dan non-linear ARMAX (NARMAX) [3]. ARX merupakan model yang paling banyak digunakan dalam proses pemodelan sistem elektro hidrolik, karena model ini dapat menghasilkan persentase ketepatan pemodelan (*best-fit*) yang lebih tinggi. Menurut aturan praktis, sebuah model dapat diterima ketika nilai *best-fit* yang didapatkan lebih tinggi dari 90% [3].

Sistem dinamis seperti sistem elektro-hidrolik sangat sulit untuk dibentuk secara sempurna mendekati sistem sebenarnya, karena adanya proses linierisasi dalam proses pemodelan. Selain itu, sistem pada umumnya mempunyai beberapa gangguan eksternal selama pengoperasian [4]. Akibatnya sistem pengaturan yang dirancang menggunakan model linier memiliki kelemahan, yaitu tidak disertakannya ketidaklinieran, ketidaktentuan dan perubahan parameter dalam proses penentuan parameter sistem pengaturan [5]. Hal ini menyebabkan sistem tidak bisa menyesuaikan diri dengan kondisi yang tidak tentu.

Sehingga diusulkan desain pemodelan elektro-hidrolik dengan menambahkan ketidaklinieran, ketidaktentuan, dan gangguan luar dari sistem. Model tak linier seperti metode pengaturan berbasis Lyapunov banyak digunakan [6], dengan keunggulan utama adalah kurangnya pembatasan dalam memanipulasi sistem tak linier [7]. Untuk model tak linier, pilihan sistem pengaturan yang baik adalah dengan sistem pengaturan tak linier, dalam pengaturan tak linier, sistem pengaturan paling banyak digunakan adalah sistem pengaturan *robust* [8]. Salah satu pengaturan *robust* adalah pengaturan SMC, SMC merupakan pengaturan yang *robust* karena tidak peka terhadap gangguan dan memiliki lintasan yang memaksa sistem tetap berjalan pada lintasan tersebut.

Untuk hasil yang lebih maksimal, pengaturan dikombinasikan dengan sifat pengaturan adaptif [9], dan pengaturan ini dapat melakukan penyesuaian parameter untuk menyesuaikan diri terhadap keadaan baru yang tidak diketahui. Pengaturan adaptif digunakan dengan memanfaatkan teori logika Fuzzy [9] untuk menentukan nilai parameter dari *sliding surface*, pengaturan adaptif ini digunakan untuk memperbaiki penetapan nilai parameter *sliding surface* yang menggunakan metode Tracking Error dan Dependent. Sehingga didapatkan akurasi dan kelinieran yang lebih baik.

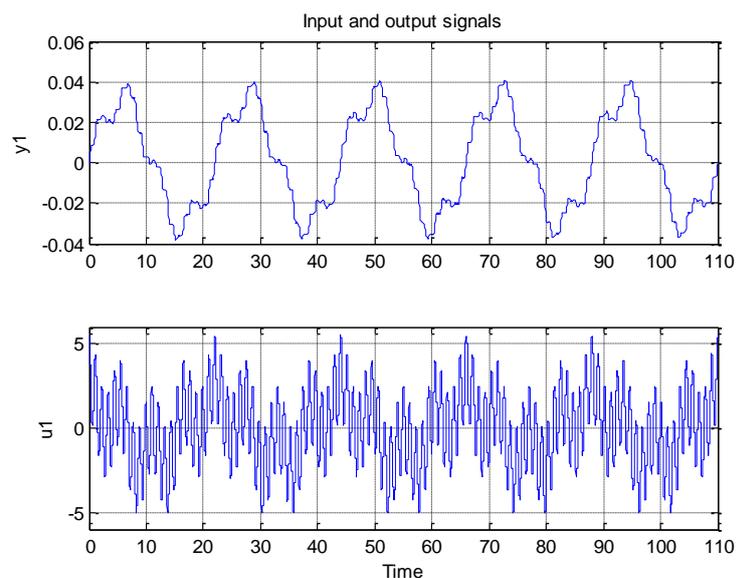
2. Metode Penelitian

2.1 Pemodelan Sistem Elektro-Hidrolis

Pemodelan sistem elektro-hidrolis merupakan bagian utama dari sistem ini, karena model tersebut nantinya di pengaturan menggunakan pengaturan SMC. Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam pemodelan adalah:

2.1.1 Pengambilan Data

Dalam penelitian ini, data *input output* diambil dari penelitian sebelumnya. Banyaknya data yang diambil adalah 2001 dengan waktu *sampling* 55 ms, dilakukan penelitian dengan memberikan *input* dari *command windows* MATLAB berupa sinyal Sinusoidal dengan multi frekuensi dengan pembacaan *output* hirdolis secara *realtime* menggunakan bantuan DAQ di laboratorium hidrolik. Data *input-output* ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Data Input Output

2.1.2 Penelitian Data

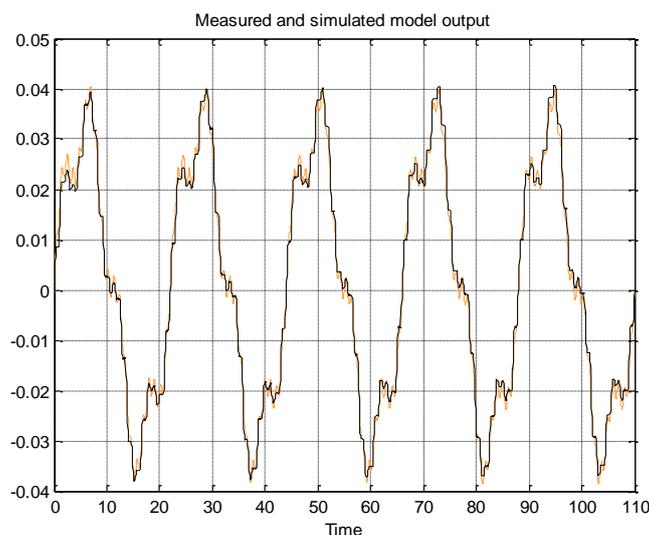
Penelitian data dilakukan dengan melakukan pengamatan terhadap tipe dan karakteristik dari data. Dari penelitian data *input-output* dalam Gambar 1, dapat dianalisis bahwa data ini merupakan data dengan tipe *time-variance*, karena memiliki domain waktu dalam data tersebut. Sedangkan karakteristik data berupa sinyal Sinusoidal multi frekuensi.

2.1.3 Pemilihan Struktur Pemodelan

Jenis struktur pemodelan yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan pemodelan ARX 331. Pemilihan struktur pemodelan ini berdasarkan nilai ketepatan (*best-fit*) terbaik dari pengamatan [3]. *Best-fit* menentukan nilai ketepatan pemodelan terhadap sistem yang sebenarnya.

2.1.4 Estimasi dan Validasi

Dari hasil Estimasi menggunakan pemodelan ARX 331, menghasilkan nilai ketepatan mencapai 94.65%, hal ini dibuktikan dari kurva validasi sesuai dalam Gambar 2. Nilai ketepatan atau *best fit* tersebut diperoleh dari perbandingan antara data validasi *output* dan *respond output* dari pemodelan dengan menggunakan Persamaan 1.



Gambar 2. Kurva Validasi

$$fit = \left[1 - \frac{\|y - \hat{y}\|}{\|y - \text{mean}(y)\|} \right] \quad (1)$$

Dari sistem identifikasi diperoleh pemodelan dalam bentuk diskrit polinomial ARX 331 [5] dan didapatkan Persamaan 2, 3, dan 4. Langkah selanjutnya data pada Persamaan 2 diubah dalam bentuk *transfer function* diskrit menggunakan Persamaan 5. Setelah mendapatkan hasil *transfer function* diskrit, kemudian data diubah ke dalam bentuk *state-space* kontinyu.

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t) \quad (2)$$

$$A(z) = 1 - 1.964z^{-1} + 1.258z^{-2} - 0.293 \quad (3)$$

$$B(z) = 0.0003821z^{-1} - 0.0004912z^{-2} + 0.0002178z^{-3} \quad (4)$$

$$H_{arx} = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (5)$$

2.1.5 Model Dinamis dari Sistem Hidrolik dengan Parameter yang Tidak Diketahui

Pemodelan matematis dari sebuah sistem hidrolik dinamis tak linier dapat dimodelkan dengan menggunakan Persamaan 6, yang dapat juga disederhanakan dengan menggabungkan $d = \Delta A + d$ sehingga didapatkan Persamaan 7.

$$\dot{x} = (A_0 + \Delta A)x + B_0u + d \quad (6)$$

$$\dot{x} = A_0(x) + B_0u + d \quad (7)$$

$$y = Cx$$

Dengan menggunakan *canonical form state space* dari sistem *single-input and single-output* berlaku Persamaan 8, 9, 10, dan 11 [5]. Sehingga dari Persamaan 2 dan Persamaan 5 bentuk *single-input and single-output* didapatkan Persamaan 12 dengan menyubstitusikan Persamaan 12 ke dalam Persamaan 7 sehingga didapatkan persamaan 13.

$$A_0 = \begin{bmatrix} -a_2 & -a_1 & -a_0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Cx = [b_2 \quad b_1 \quad b_0]x \quad (11)$$

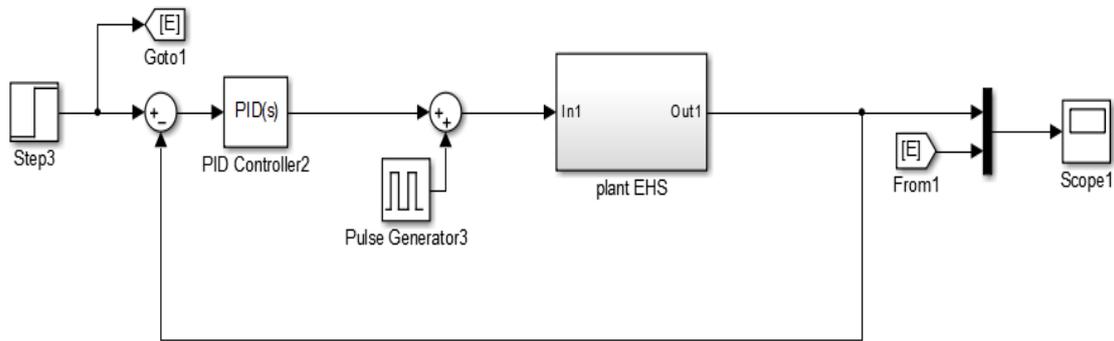
$$G(s) = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (12)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -a_2 & -a_1 & -a_0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [u + d] \quad (13)$$

2.2 Perancangan Pengaturan *Proportional Integral Derivative*

Desain pengaturan *Proportional Integral Derivative* (PID) dilakukan untuk penelitian pendahuluan mengenai perubahan respons sistem setelah diberikan sebuah pengaturan konvensional PID. Diagram blok PID ditunjukkan dalam Gambar 3. Adapun untuk *setting*

pengaturan PID menggunakan metode Tuning MATLAB untuk menentukan nilai yang optimal dari parameter K_p , K_i and K_d ditetapkan sesuai dengan Tabel 1.



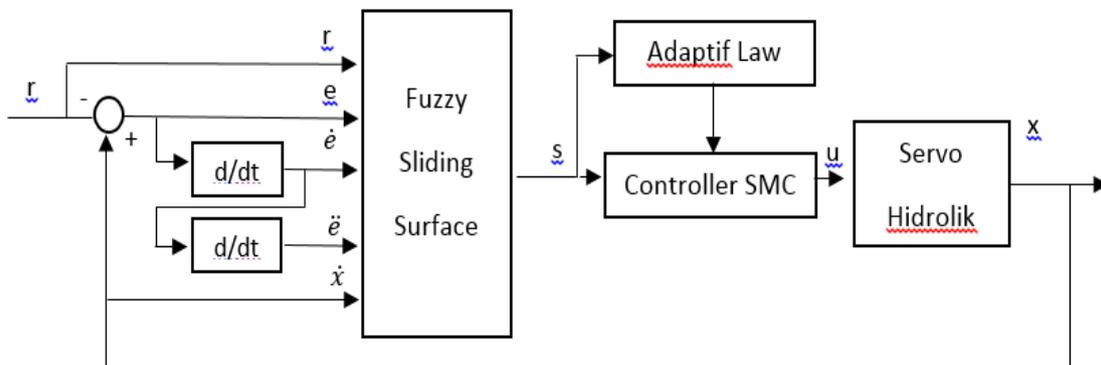
Gambar 3. Blok Simulink Pengaturan PID dengan Gangguan pada Model State Space

Tabel 1. Parameter PID menggunakan Metode Tuning MATLAB

ARX331	
K_p	4
K_i	0.2383
K_d	0.0380

2.3 Perancangan Pengaturan Adaptive Sliding Mode Control

Adaptive Sliding Mode Control (ASMC) pada perancangan ini merupakan penambahan pengaturan Fuzzy dan penggunaan teori adaptif *switching gain* untuk menentukan penetapan parameter pada pengaturan SMC konvensional. Pengaturan Fuzzy digunakan untuk menentukan nilai dari parameter λ_1 dan λ_2 berdasarkan perubahan *error* sedangkan adaptif *switching gain* digunakan untuk menentukan nilai *gain* "Q". Diagram blok perancangan ASMC ditunjukkan dalam Gambar 4.

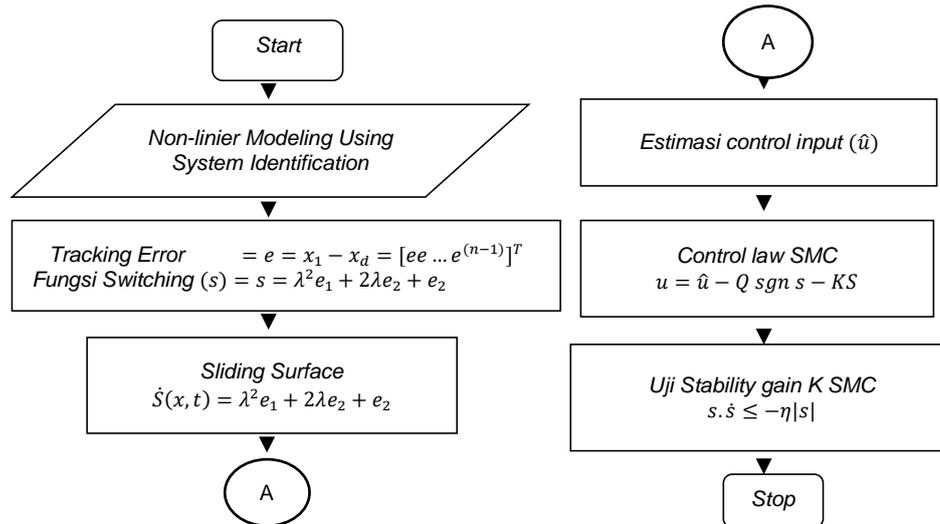


Gambar 4. Blok Pengaturan AFSMC pada Sistem Elektro-Hidrolik

Dalam perancangan pengaturan ASMC umumnya terdapat tiga langkah, yaitu merancang pengaturan SMC konvensional, merancang adaptif *switching gain* dan merancang pengaturan Fuzzy.

2.3.1 Perancangan Pengaturan Sliding Mode Control

Perancangan pengaturan SMC dilakukan dengan diagram alur perancangan sesuai dengan Gambar 5. Dalam perancangan pengaturan SMC terdapat beberapa parameter dalam bentuk pemodelan matematis.



Gambar 5. Diagram Alur Perancangan SMC

2.3.2 Menentukan Tracking Error

Langkah kedua dalam perancangan sistem pengaturan SMC adalah menentukan *error* dari sistem sesuai dengan Persamaan 14. Dimana x_d dalam Persamaan 14 diperoleh dengan menggunakan Persamaan 15, 16, dan 17. Sehingga dapat ditetapkan nilai e sesuai dengan Persamaan 18, 19, 20, dan 21.

$$e = x - x_d \quad (14)$$

$$\dot{x}_{1d} = x_2 \quad (15)$$

$$\dot{x}_{2d} = x_3 \quad (16)$$

$$\dot{x}_{3d} = -a_0 x_1 - a_1 x_2 - a_3 x_3 + bu + d \quad (17)$$

$$e = [e_1 \quad e_2 \quad e_3]^T \quad (18)$$

$$e_1 = x_1 - x_{1d} \quad (19)$$

$$e_2 = x_2 - x_{2d} = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} \quad (20)$$

$$e_3 = x_1 - x_{3d} = \ddot{x}_1 - \ddot{x}_{1d} \quad (21)$$

2.3.3 Menentukan Sliding Surface

Langkah ke tiga dalam perancangan adalah menentukan *sliding surface* orde 3 *sliding surface* dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 22 dan Persamaan 23. Nilai dari λ ditentukan menggunakan fungsi *dependent*, yaitu dengan menggabungkan antara λ_1 dan λ_2 menggunakan metode Trial and Error dan ditetapkan nilai dari $\lambda = 1000$.

$$S(e, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 e_1 \quad (22)$$

$$S = \lambda^2 e + 2\lambda \dot{e} + \ddot{e} \quad (23)$$

2.3.4 Reaching Law

Langkah ke empat adalah menentukan *reaching law* agar *reaching time* dan *chattering* dari sistem dapat berkurang. *Reaching law* juga digunakan dalam proses penentuan *control law* Persamaan dinamis tentang *reaching law* sesuai dengan Persamaan 24. Nilai dari Q dan K ditentukan menggunakan metode Trial and Error dan ditetapkan nilai dari Q sebesar 200,

dengan K sebesar 1750. Nilai dari Q digunakan untuk mereduksi *chattering* dan nilai dari K digunakan untuk memperkecil *reaching time* [6].

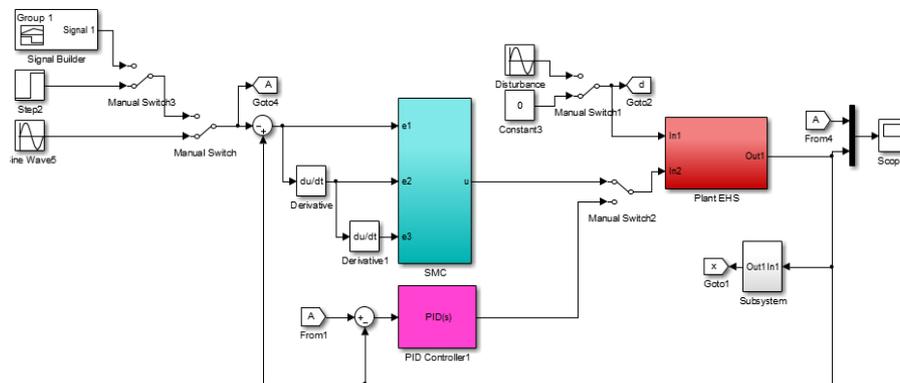
$$\dot{S} = -Qsgn(S) - KS \tag{24}$$

2.3.5 Menentukan Control Law Sliding Mode Control

Langkah terakhir dalam perancangan adalah penentuan *control law*. *Control law* digunakan dalam menentukan sinyal masukan sistem hidrolik yang berasal dari *output* SMC sesuai dengan persamaan 25. Untuk mereduksi nilai dari *chattering* digunakan teknik *boundary layer* dengan menggunakan Persamaan 26. Nilai ϕ ditetapkan menggunakan metode Trial and Error, serta ditetapkan ϕ sebesar 100. Hasil dari perancangan pengaturan SMC konvensional didapatkan blok Simulink sesuai dengan Gambar 6.

$$u = B(x)^{-1}(-q - A(x) - d(t) - Qsgn(S) - KS) \tag{25}$$

$$u = B(x)^{-1}(-q - A(x) - d(t) - Qtanh(S/\phi) - KS) \tag{26}$$



Gambar 6. Blok Simulink Pengaturan SMC pada Sistem Elektro-Hidrolik

2.3.6 Perancangan Adaptif Switching Gain

Adaptif *switching gain* dirancang untuk meningkatkan performa dari sistem pengaturan [9]. Peningkatan ini dilakukan dengan cara mengubah penetapan nilai dari variabel *gain* “ Q ” yang awalnya ditetapkan dengan metode Trial and Error menjadi metode adaptif. Penetapan nilai berdasarkan pada teorema Lyapunov dalam Persamaan 27, sehingga didapatkan persamaan untuk menentukan nilai *switching gain* sesuai dalam Persamaan 28.

$$V = \frac{1}{2}S^2 \tag{27}$$

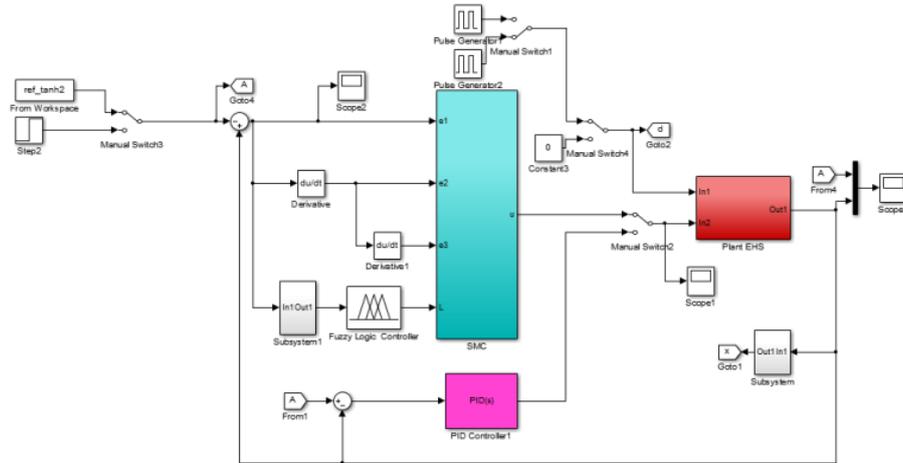
$$Q|S| \geq S((\beta - 1)|q + A(x)| + \beta(E + D)) + \beta\eta|S| \tag{28}$$

$$Q \geq \beta(E + \eta + D) + (\beta - 1)|q + A(x)|$$

Diasumsikan bahwa nilai dari koefisien dalam Persamaan 15 dapat berfluktuasi sebesar 20% dari nilai nominalnya, batas-batas ketidakpastian dan *error* estimasi ditentukan dengan Tabel 2 [7]. Hasil dari perancangan yang telah dilakukan didapatkan blok Simulink dari pengaturan ASMC sesuai dengan Gambar 7.

Tabel 2. Parameter Adaptif Switching Gain

Parameter Adaptif Switching Gain	
β	$\sqrt{Bmax/Bmin} = \sqrt{(\hat{B}.1.2)/(\hat{B}.0.8)} = \sqrt{1.5}$
E	$ A(x) - \hat{A}(x) = 0.2 \hat{A}(x) $
η	4200

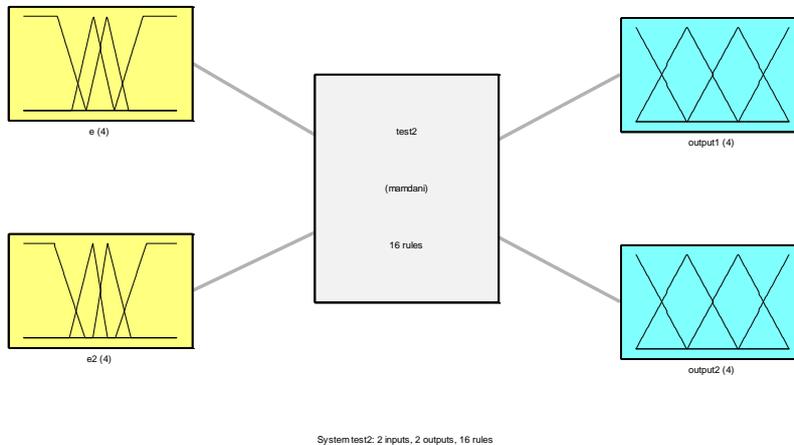


Gambar 7. Blok Simulink Pengaturan AFSMC pada Sistem Elektro-Hidrolik

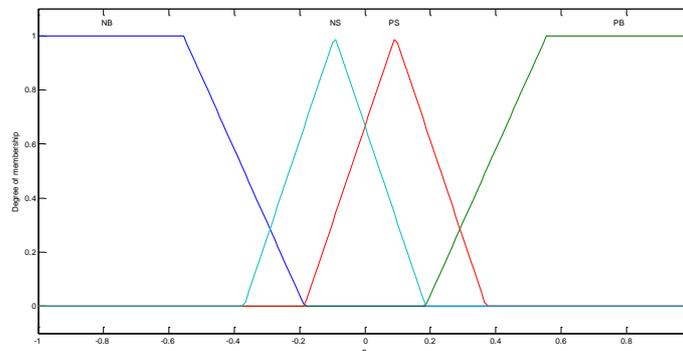
2.3.7 Perancangan Pengaturan Fuzzy

Nilai dari λ sebelumnya ditentukan menggunakan fungsi *dependent* dan menggunakan metode Trial and Error diubah menjadi fungsi independen dan ditetapkan menggunakan logika Fuzzy. Berdasarkan pada karakteristik dari aktuator elektro-hidrolik, pengaturan SMC metode Agregasi, serta Defuzzifikasi ditetapkan menggunakan *max-min* dan metode Centroid.

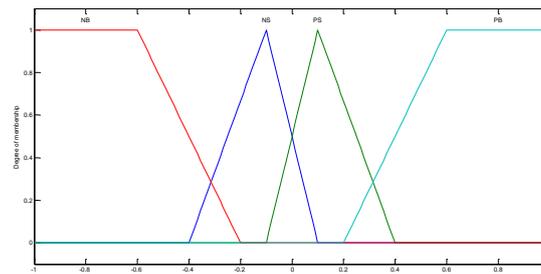
Model Mamdani diterapkan sebagai struktur Fuzzy inferensi. *Input* dari struktur Fuzzy ini, terdapat dua masukan Fuzzy Inferensi: *error e (t)* dan turunan dari kesalahan *de (t)*, dan dua *output* untuk $\lambda 1$ dan $\lambda 2$. Blok inferensi Fuzzy dari desain pengaturan ditunjukkan dalam Gambar 8 sampai dengan Gambar 12. Fungsi keanggotaan ditetapkan sesuai dalam Persamaan 29 dan 30.



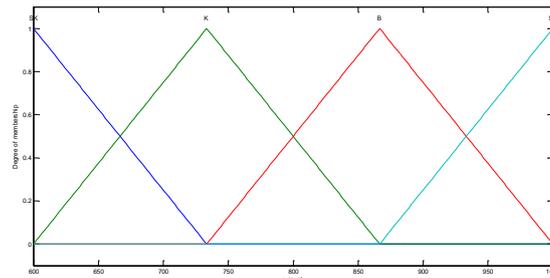
Gambar 8. Struktur Keanggotaan Fuzzy



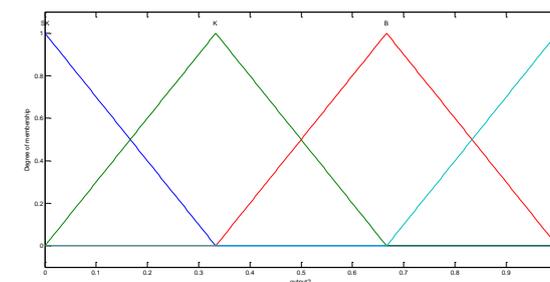
Gambar 9. Struktur Keanggotaan Input Fuzzy Error



Gambar 10. Struktur Keanggotaan Input Fuzzy Error 2



Gambar 11. Struktur Keanggotaan Output Fuzzy Lambda 1



Gambar 12. Struktur Keanggotaan Output Fuzzy Lambda 2

$$[L1 \min, L1 \max] \text{ dan } [L2 \min, L2 \max] = L1 \in [600, 1000] \text{ dan } L2 \in [0, 1] \tag{29}$$

Karena memiliki 4 variabel sebagai masukan dan 4 variabel sebagai *output*. Maka dalam desain terdapat 16 aturan Fuzzy yang ditetapkan dari Tabel 3.

Tabel 3. Rule Fuzzy Inference

Deve	PB	PS	NS	NB
PB	SB	SB	B	B
PS	SB	B	K	K
NS	B	K	K	SK
NB	B	K	SK	SK

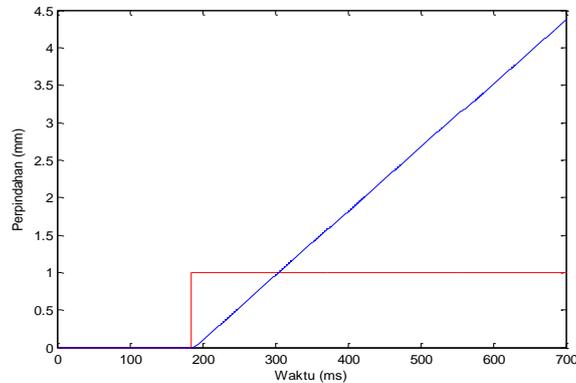
Tingkat variabel linguistik dari fungsi inferensi ditulis sebagai PB (Positif Big), PS (*Positif Small*), NS (*Negatif Small*), NB (*Negatif Big*). Tingkat linguistik *output* dari fungsi keanggotaan *output* L1 dan L2 ini dibuat sebagai SK (Sangat Kecil), K (Kecil), B (Besar), SB (Sangat Besar). Sehingga didapatkan perubahan persamaan *sliding surface* dan nilai dari pengaturan *input* (*u*) karena pengaruh dari nilai Fuzzy. Persamaan *sliding surface* akan berubah sesuai dengan persamaan 30.

$$S_{fuz} = L1_{fuz}^2 e + 2 \cdot L2_{fuz} \dot{e} + \ddot{e} \tag{30}$$

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

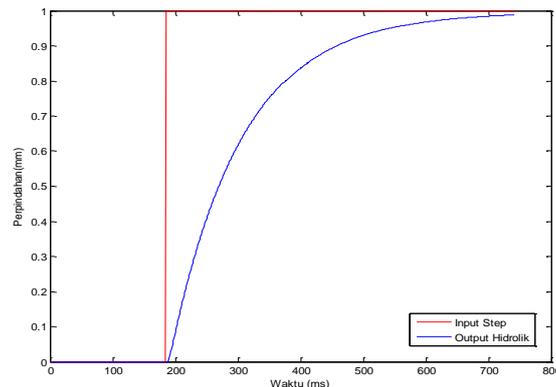
3.1 Hasil Pengujian Model Hidrolik Menggunakan *Loop* Terbuka dan *Loop* Tertutup.

Persamaan hasil konversi ke *transfer function continue* dan *state space* dimasukkan dalam blok Simulink MATLAB sebagai model dari sistem hidrolik dengan *input* berupa sinyal *step* dan *step time=1*, *initial value=0* dan *Sample time=1*. Pengujian *open loop* menghasilkan grafik yang ditunjukkan Gambar 13.



Gambar 13. Grafik Respon Transient Loop Terbuka

Dari grafik Gambar 13 dapat dianalisis, ketika menggunakan *loop* terbuka *output* dari sistem tidak sesuai dengan sinyal *input*, sehingga pemodelan menggunakan sistem *open loop* tidak sesuai untuk sistem pada penelitian ini. Sedangkan pengujian *close loop* menghasilkan grafik yang ditunjukkan Gambar 14.



Gambar 14. Grafik Respon Transient Loop Tertutup

Dari grafik Gambar 14 dapat dianalisis bahwa hasil pengujian antara model dalam bentuk *transfer function continue* dan *state space* menunjukkan hasil sama, hal ini berarti pemodelan ini dapat diterima untuk dijadikan model aktuator hidrolik dalam sistem pengaturan yang akan didesain. Dari pengujian ini didapatkan pula karakteristik dari Respon Transient menggunakan *loop* tertutup ditunjukkan dalam Tabel 4.

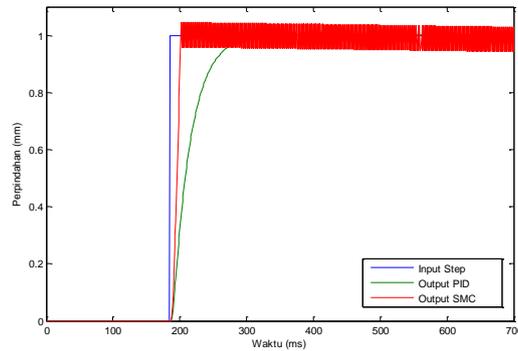
Tabel 4. Karakteristik Respon Transient Loop Tertutup

RiseTime	243.8540
Overshoot	0
Undershoot	0
Peak	0.9879
PeakTime	741

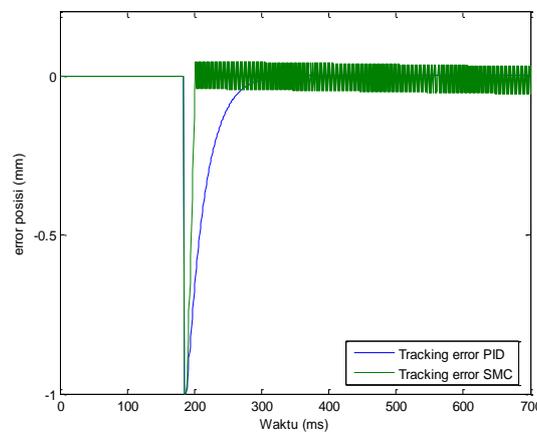
3.2 Hasil Pengujian Pengendali *Proportional Integral Derivative* dan *Sliding Mode Control*

Pengujian ini menggunakan *time sampling* 55 ms. Pertama sinyal diuji menggunakan sinyal *step* dengan dan kedua diuji menggunakan sinyal *trajectory*. Masing-masing juga akan diuji dengan diberikan gangguan berupa sinyal *pulse*. Penentuan besarnya gangguan ini berdasarkan pada pemberian gangguan yang tidak boleh lebih dari 40% dari sinyal *input*. Dari

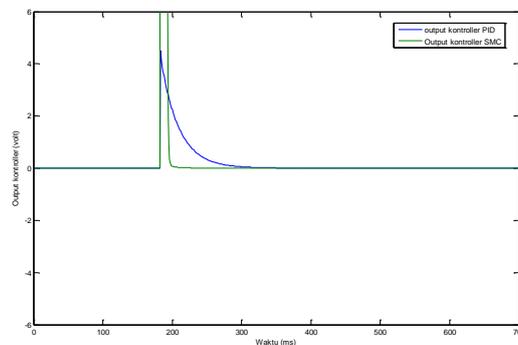
pengujian ini menghasilkan grafik yang ditunjukkan dalam Gambar 15 sampai dengan Gambar 17.



Gambar 15. Grafik Respon Transient Pengaturan PID dan SMC Tanpa Gangguan



Gambar 16. Grafik Tracking Error Pengaturan PID dan SMC Tanpa Gangguan



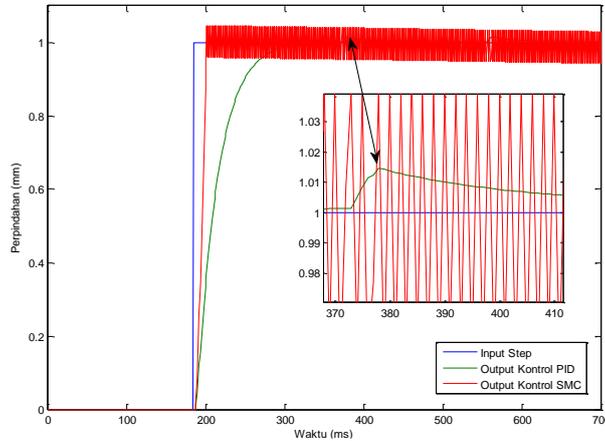
Gambar 17. Grafik Output Pengaturan PID dan SMC Tanpa Gangguan

Selain grafik dalam Gambar 16, 17, dan 18, Dari pengujian ini didapatkan pula karakteristik Respon Transient pengaturan PID dengan menggunakan sinyal *step* ditunjukkan oleh Tabel 5, berisi tentang karakteristik *rise time*, *overshoot*, *undershoot*, *peak* dan *peak time* dari sistem.

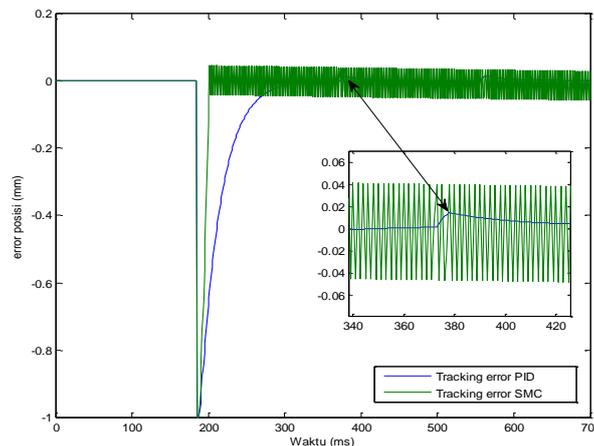
Tabel 5. Karakteristik Respon Transient Pengaturan SMC

	PID	SMC
RiseTime	58.6056	9.8574
Overshoot	0.0061	8.3831
Undershoot	0	0
Peak	1.0023	1.0459
PeakTime	497	200

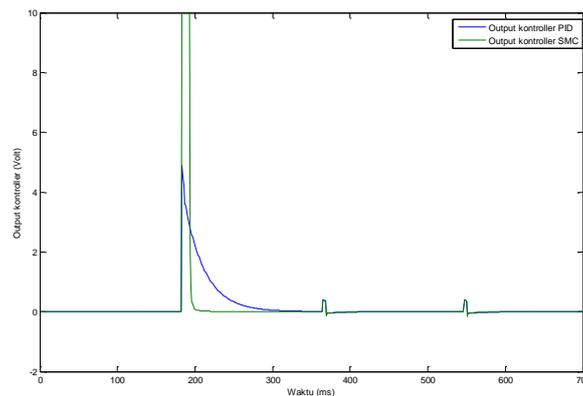
SMC memiliki *overshoot* sebesar 8.8574, dimana memiliki nilai lebih besar dari pada PID karena adanya fenomena *chattering*. Akan tetapi besarnya *overshoot* dan *setting time* ini masih bisa ditoleransi. Sedangkan pada pengujian Respon Transient dengan gangguan menghasilkan grafik yang ditunjukkan dalam Gambar 18, 19, dan 20.



Gambar 18. Grafik Respon Transient Pengaturan PID dan SMC dengan Gangguan

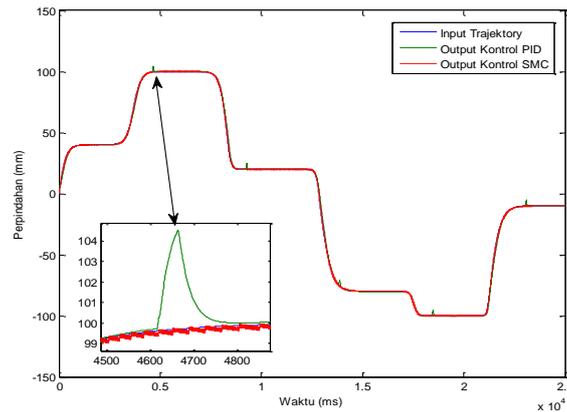


Gambar 19. Grafik Tracking Error Pengaturan PID dan SMC dengan Gangguan

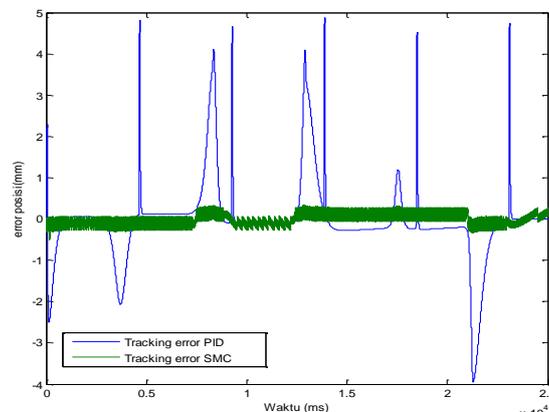


Gambar 20. Grafik Output Pengaturan PID dan SMC dengan Gangguan

Dari ketiga grafik dalam Gambar 18, 19, dan 20, dapat dianalisis bahwa pengaturan PID menjadi tidak stabil ketika diberikan gangguan dan untuk kembali dalam kondisi yang stabil, sistem membutuhkan waktu lama. Hal ini berbeda dengan pengaturan SMC yang tetap stabil meskipun diberikan gangguan. Pengujian menggunakan *trajectory* menghasilkan grafik yang ditunjukkan dalam Gambar 21, 22, dan 23.



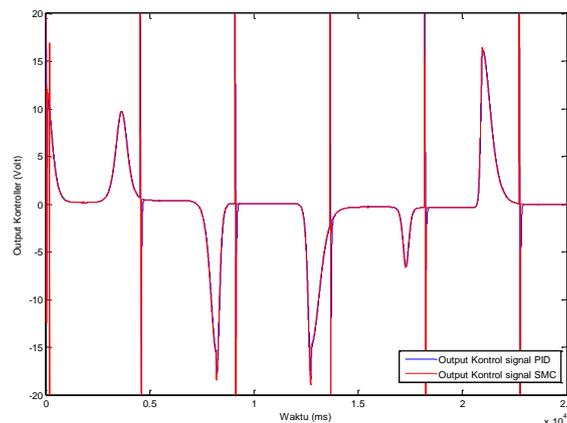
Gambar 21. Grafik Trajectory Pengaturan PID dan SMC dengan Gangguan



Gambar 22. Grafik Tracking Error Trajectory Pengaturan PID dan SMC dengan Gangguan

Data *tracking error* digunakan untuk menentukan nilai SSTE dari sistem [8] dengan Persamaan 31. Hasil perhitungan dari metode SSTE didapatkan hasil $SSTE_{PID} = 71.8466$, $SSTE_{SMC} = 2.8849$. Dari nilai ini dapat dianalisis bahwa pengaturan SMC mempunyai performa lebih baik dari PID.

$$SSTE = \sum_{t=0}^N (x_{1d}(t) - x_1(t))^2 / N \tag{31}$$



Gambar 23. Grafik Output Pengaturan Trajectory PID dan SMC dengan Gangguan

Ketika diuji menggunakan *trajectory*, pengaturan PID tampak adanya keterlambatan antara sinyal *input* dan sinyal *output* dari sistem, serta ketika diberi gangguan dengan sinyal *pulse* pengaturan menjadi tidak stabil. Sedangkan pengaturan yang berbasis SMC tetap mengikuti *trajectory* dengan stabil.

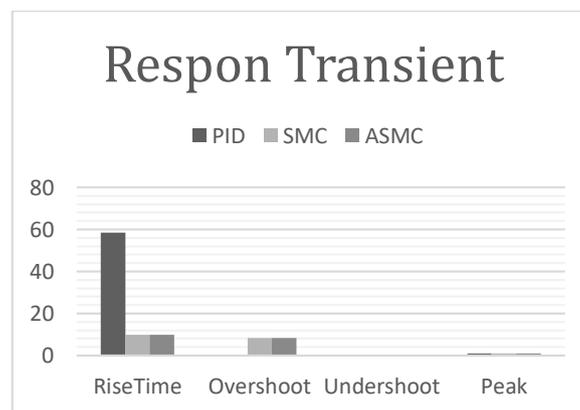
3.3 Hasil Pengujian pengendali *Sliding Mode Control* dan pengendali *Adaptive Sliding Mode Control*

Pengujian ini menggunakan *time sampling* 55 ms. Sistem akan diuji menggunakan *trajectory* dan juga akan diuji dengan diberikan gangguan berupa sinyal *pulse*. Penentuan besarnya gangguan ini berdasarkan pada pemberian gangguan yang tidak boleh lebih dari 40% dari sinyal *input*.

Dalam pengujian ini, ditetapkan beberapa nilai parameter pengaturan menggunakan metode *try and error*, didapatkan nilai dari η sebesar 4200, K sebesar 200 dan θ sebesar 100, sedangkan untuk nilai parameter λ_1 dan λ_2 menggunakan *output* dari pengaturan Fuzzy. Pada pengujian pengendali SMC dan ASMC pada sistem didapatkan karakteristik dari pengaturan ASMC berupa Tabel 6 dan grafik yang ditunjukkan dengan dalam Gambar 24.

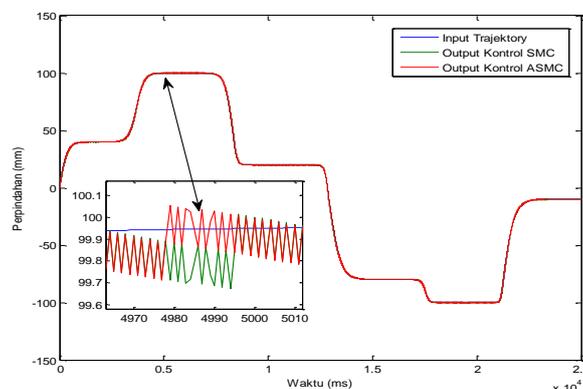
Tabel 6. Karakteristik Respon Transient Pengaturan PID, SMC, dan, ASMC

	PID	SMC	ASMC
RiseTime	58.6056	9.8574	9.8574
Overshoot	0.0061	8.3831	8.3831
Undershoot	0	0	0
Peak	1.0023	1.0459	1.0459
PeakTime	501	202	202

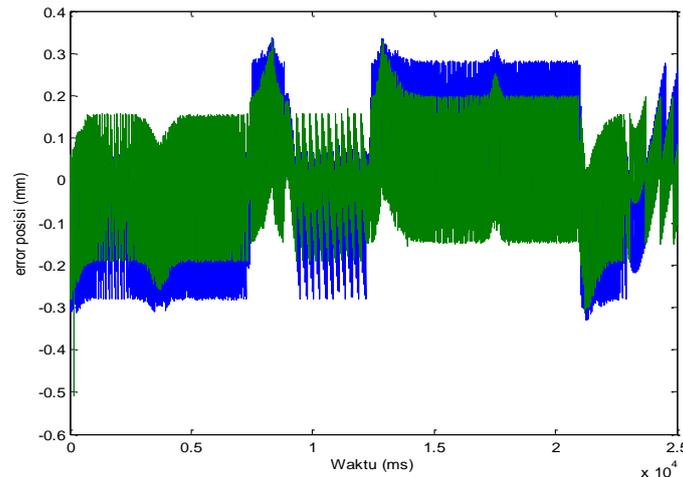


Gambar 24. Grafik Perbandingan Respon Transient PID, SMC, dan ASMC

Dari hasil pengujian dalam Tabel 6 dan Gambar 24 dapat dianalisis bahwa pengaturan SMC dan ASMC mempunyai karakteristik sistem yang sama ketika diberikan sinyal *input step* tanpa beban. Selain itu, dapat terlihat bahwa pengaturan SMC dan ASMC mempunyai perbaikan nilai *rise time* yang cukup signifikan dibandingkan dengan pengaturan PID. Dari penelitian ini juga didapatkan grafik respons sistem ketika diberikan sinyal *trajectory* menghasilkan grafik yang ditunjukkan dalam Gambar 25, 26, dan 27.



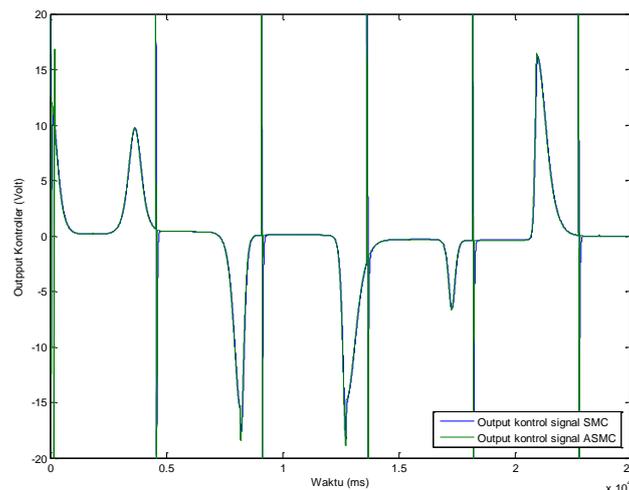
Gambar 25. Grafik Trajectory Pengaturan PID dan SMC dengan Gangguan



Gambar 26. Grafik Tracking Error Trajectory Pengaturan SMC dan ASMC dengan Gangguan

Data *tracking error* digunakan untuk menentukan nilai dari *Root Mean Square Error* (RMSE) dari sistem dengan Persamaan 32 dan mendapatkan hasil $SSTE_ASMC = 0.0121$.

$$SSTE = \sum_{t=0}^N (x_{1d}(t) - x_1(t))^2 / N \quad (32)$$



Gambar 27. Grafik Output Pengaturan Trajectory Pengaturan PID dan SMC dengan Gangguan

Pada saat kedua sistem diuji menggunakan gangguan dapat dilihat bahwa pengaturan ASMC kembali mengikuti *trajectory* lebih cepat daripada pengaturan SMC. Penambahan pengaturan adaptif mengakibatkan parameter dari pengaturan dapat menyesuaikan diri dari perubahan sinyal *input* dan gangguan dari luar sistem. Hal ini, membuktikan bahwa pengaturan ini merupakan pengaturan yang tidak peka terhadap gangguan dari luar.

4. Kesimpulan

Setelah melakukan pengujian terhadap sistem pengaturan SMC sistem elektro-hidrolik, terdapat hal-hal yang perlu disimpulkan, yaitu:

1. Pemodelan sistem elektro-hidrolik menggunakan ARX331 mempunyai persentase akurasi pemodelan mencapai 94.65%.
2. Pengaturan ASMC dapat menyesuaikan diri terhadap perubahan parameter sistem, sehingga *output* sistem elektro-hidrolik tetap stabil ketika ada gangguan dari luar sistem.
3. Pengaturan ASMC memiliki nilai SSTE sebesar 0.0121, sehingga menghasilkan performa lebih baik dibanding pengaturan PID dan SMC untuk sistem elektro-hidrolik.

5. Daftar Notasi

A_0	: Sistem dinamis tak linier
B_o	: Penguatan pengaturan <i>input</i>
\hat{B}	: Penguatan pengaturan <i>input</i> hasil estimasi
B_{max}	: Nilai maksimal dari penguatan pengaturan
B_{min}	: Nilai minimal dari penguatan pengaturan
D	: Nilai maksimal dari gangguan luar
d	: Gangguan luar dari sistem
E	: Nilai kesalahan dari sistem
e	: <i>Error trajectory</i>
K	: <i>Discontinuous gain</i>
K_p	: Koefisien proporsional pengaturan PID
K_i	: Koefisien <i>integral</i> pengaturan PID
K_d	: Koefisien <i>derivative</i> pengaturan PID
N	: Banyaknya data
Q	: <i>Discontinuous switching gain</i>
S	: <i>Sliding surface</i>
\dot{S}	: Turunan <i>sliding surface</i>
u	: Sinyal <i>input servo valve</i> (V)
V	: Fungsi Lyapunov
x	: <i>Output</i> sistem
x_d	: Sinyal referensi
x_1	: Perpindahan posisi piston (m)
x_2	: Kecepatan piston (m/s)
x_3	: Percepatan piston (m/s ²)
η	: Eta
λ	: Lambda dari <i>sliding surface</i>
L_1	: Lambda 1
L_2	: Lambda 2
ϕ	: Ketebalan dari <i>Boundary layer</i>
β	: Nilai efektif dari Bulk Modulus (Pa)

Referensi

- [1] Zulfatman, Rahmat. "Application of Self-Tuning Fuzzy PID Controller On Industrial Hydraulic Actuator Using Sistem Identification Approach", *Int. Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 2(2):246-261, 2009.
- [2] L. Ljung. "System Identification Toolbox: User Guide", Prentice-Hall Int., London, 2014.
- [3] Andersson L, et al. "A Manual for System Identification" Lund University Andersson L, et al. "A Manual for System Identification" Lund University, 2004.
- [4] Zulfatman, et al. "Robust Position Tracking Control of an Electro-Hydraulic Actuator in the Presence of Friction and Internal Leakage", *Arabian Journal for Science and Engineering* 39 (4), 2965-2978, 2014.
- [5] R Ghazali, et al. "Adaptive Discrete Sliding Mode Control for a Non-minimum Phase Electro-Hydraulic Actuator System", *The 8th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing & Power Applications*, 2014.
- [6] Indrawanto, T.X. "Sliding Mode Control of a Single Rigid Hydraulically Actuated Manipulator". *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, 2011.
- [7] Rahmat, et al. "Modeling and Controller Design of an Industrial Hydraulic Actuator System in The Presence of Friction and Internal Leakage" *International Journal of the Physical Sciences* Vol. 6(14), pp. 3502-3517, 2011.
- [8] Zulfatman, et al. "Robust Precision Control for a Class of Electro-Hydraulic Actuator System Based on Disturbance Observer" *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015.
- [9] Zulfatman, et al. "Sliding Mode Control with Switching-Gain Adaption Based-Disturbance Observer Applied to an Electro-Hydraulic Actuator System" *Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2013.
- [10] Cerman O, Husek P. "Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Electro-Hydraulic Servo Mechanism" *Expert Systems with Applications* 39. 10269–10277, 2012.