

Sliding Mode Control untuk Mengatasi Nonlinearitas Gangguan pada Kendali Kecepatan Motor DC

Feriyonika¹

Abstract—DC motor speed control is an example of plant where its feedback sensor is susceptible to noise. There are also some nonlinearities in DC motor due to changing in its internal components, white noise, driver problem, and direct external disturbances to controller signal. In this paper, Sliding Mode Control (SMC) was employed to overcome several disturbances in DC motor by localizing all states in sliding mode mechanism. Firstly, since internal components are unknown, system identification of DC motor was conducted to derive transfer function of the plant. The model was then used to design SMC by limiting amplitude of disturbances. To guarantee all states move to operating point (0,0), first order sliding surface equation and Lyapunov stability analysis were employed. The results showed that SMC could follow set point with no overshoot, rise time is 8.7 second, and error steady state is 0.009. Disturbances, represented by random signal (0.3, 0.5, and 1 times of maximum disturbance limit), were applied to check the robustness of the SMC. The result showed that SMC could still maintain the response around set point. Verification experiment was also conducted by adding disturbances which are out of maximum amplitude limit (3, 5, and 8 times of maximum amplitude limit). When 3 and 5 times of maximum amplitude limit disturbances were added, although there were oscillations, SMC could still maintain response around set point (marginally stable). It started to become unstable when 8 times of maximum amplitude limit disturbance was applied.

Intisari—Sistem kendali kecepatan motor DC merupakan *plant* yang secara alamiah rentan terhadap derau pembacaan sensor. Selain itu, terdapat juga nonlieneritas gangguan akibat perubahan komponen internal motor, derau putih, ketidaklinearan *driver*, serta gangguan eksternal terhadap sinyal aktuasi. Makalah ini menggunakan *Sliding Mode Control* (SMC) untuk mengatasi berbagai jenis gangguan pada kendali kecepatan motor DC dengan melokalisasi perubahan *state* melalui mekanisme *sliding*. Pada langkah pertama, dikarenakan parameter internal motor tidak diketahui, proses identifikasi dilakukan untuk mendapatkan *transfer function plant*. Model yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk mendesain parameter SMC dengan terlebih dahulu menentukan batas maksimum amplitude gangguan yang dapat diatasi. Untuk menjamin *state* menuju ke titik *equilibrium*, persamaan *sliding surface orde-1* dan syarat kestabilan Lyapunov digunakan dalam proses desain. Hasil perancangan menunjukkan respons sistem dapat mengikuti *set point* tanpa *overshoot*, *rise time* 8,7 detik, dan *error steady-state* 0,009. Pengujian terhadap nonlinearitas gangguan dilakukan dengan memberi sinyal acak sebesar 0,3, 0,5, dan 1 kali dari batas maksimum gangguan. Hasilnya, SMC tetap menjaga kecepatan motor di sekitar *set point*. Selain itu,

pengujian juga dilakukan dengan memberi sinyal gangguan di luar batas desain (3, 5, dan 8 kali batas maksimum gangguan). Kecuali pada 8 kali batas maksimum, SMC masih menjaga respons disekitar *set point*.

Kata Kunci— *Sliding Mode Control*, stabilitas Lyapunov, Motor DC, *Variable Structure*, *Sliding Surface*.

I. PENDAHULUAN

Motor DC merupakan *plant* yang sering dijadikan model dalam pembelajaran sistem kendali dikarenakan kemudahan dalam merealisasikan hasil algoritme kendali (baik berupa tegangan DC ataupun sinyal PWM) dan waktu *steady state* yang cepat, sehingga parameter kendali yang diuji coba bisa langsung dievaluasi dan diperbaiki. Motor DC biasanya digunakan langsung atau sebagai bagian dari manipulator [1]. Pada penelitian terkini di bidang sistem kendali, misalnya dalam *Network Control Systems* (NCS) [2], [3] ataupun *event triggered control* [4], motor DC tetap digunakan sebagai model untuk menganalisis efektivitas suatu metode kendali.

Penggunaan *Sliding Mode Control* (SMC) sebagai pengendali kecepatan motor DC telah banyak diteliti [5]--[7]. Pada penelitian tersebut, perancangan SMC menggunakan model *plant* dari penurunan model fisis dengan parameter internal motor dan model gangguan diasumsikan dengan nilai-nilai tertentu. Pengujian algoritme belum pada *plant* sesungguhnya sehingga kemampuan SMC dalam mengatasi ketidakidealan *driver*, derau pembacaan sensor, perubahan parameter internal motor, serta nonlinearitas gangguan belum diketahui. Penelitian tentang SMC yang menggunakan *plant* motor DC real juga telah dilakukan [8]. Pada penelitian ini, komponen internal motor, seperti R_L , R_a , J , b , diketahui dari *datasheet* motor tersebut. Meskipun model *plant* real digunakan untuk proses perancangan SMC, pada penelitian tersebut belum digambarkan hasil pengujian terhadap berbagai gangguan. Selain itu, model *plant* yang digunakan belum diverifikasi dengan respons sinyal motor DC secara langsung. Pada penelitian lain, teknik identifikasi digunakan untuk mendapatkan model motor DC [9]. Sama halnya dengan penelitian sebelumnya, hasil perancangan SMC belum diuji coba dengan berbagai gangguan dan model yang diperoleh pun belum diverifikasi dengan sinyal asli *plant* [8], [9]. Selain itu, penentuan batas *switching* pada perancangan SMC belum dijabarkan secara jelas. Dari penelitian-penelitian di atas, diperoleh tiga hal yang dapat menjadi kontribusi makalah in, yaitu pemodelan dan verifikasi model *plant*, uji coba gangguan SMC, dan penentuan batas *switching*.

Dalam makalah ini digunakan motor DC yang modelnya diperoleh melalui proses identifikasi. Proses verifikasi model dilakukan dengan membandingkan langsung antara model *plant*, dalam bentuk *transfer function*, dengan sinyal asli.

¹ Staf Pengajar, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir, Ds.Ciwaruga, Bandung 40012, (telp: 022-2013789; fax: 022-2013889; e-mail: feriyonika@gmail.com)

Setelah model *plant* diperoleh, proses perancangan SMC dilakukan dengan membuat *sliding surface* menggunakan analisis kestabilan Lyapunov. Hasil perancangan SMC kemudian direalisasikan dengan memanfaatkan sistem *switching* di Simulink MATLAB dan mengirimkan hasil perhitungan ke modul *I/O* yang terhubung ke *plant*. Untuk menguji keandalan sistem kendali SMC, sinyal acak dengan beberapa variasi *gain* ditambahkan pada keluaran kendali (sinyal aktuasi).

II. SLIDING MODE CONTROL

SMC merupakan metode kendali yang muncul saat mencari solusi masalah osilasi pada *bang-bang control* [2]. Pada kendali ini, semua *state* didorong untuk mencapai *sliding surface* dan mengikuti *surface line* menuju titik *equilibrium*. Bagian utama dari SMC adalah mendesain *sliding surface* dan memanipulasi masukan *state* sehingga respons bergerak mengikuti *sliding surface*. Persamaan *surface* dan persamaan karakteristik dari SMC ditunjukkan oleh (1) dan (2).

$$\sigma(x) = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + X_n = 0 \tag{1}$$

$$S^{n-1} + C_{n-1} S^{n-2} + C_{n-2} S^{n-3} + \dots + C_2 S + C_1 = 0 \tag{2}$$

Sebagai contoh, terdapat sistem orde dua dengan dua *state*, X_1 and X_2 sebagaimana ditunjukkan pada (3) dan (4) [10].

$$\dot{X}_1 = X_2 \tag{3}$$

$$\dot{X}_2 = -a_1 X_1 - a_2 X_2 + b(u + \delta(x,t)) \tag{4}$$

Pada (4), $\delta(x,t)$ merepresentasikan gangguan, derau, dan ketidaklinearan sistem. Berdasarkan (1), dapat ditentukan *switching surface* sehingga diperoleh (5) dan (6). Agar sistem *stable dynamic*, maka ditentukan nilai $C_1 > 0$ [11].

$$\sigma(x) = C_1 X_1 + X_2 = 0 \tag{5}$$

$$\dot{\sigma}(x) = C_1 \dot{X}_1 + \dot{X}_2 = C_1 X_2 - a_1 X_1 - a_2 X_2 + b(u + \delta(x,t)) = 0 \tag{6}$$

Untuk mengevaluasi kestabilan sistem, digunakan persamaan Lyapunov (7).

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 \tag{7}$$

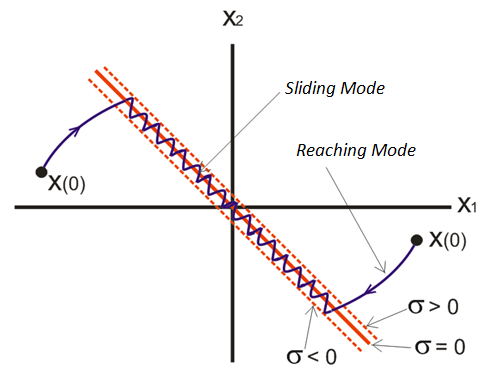
$$\dot{V} = \sigma \dot{\sigma}$$

\dot{V} bernilai negatif jika memenuhi (8).

$$\dot{\sigma}(x) \begin{cases} < 0 & \text{for } \sigma(x) > 0 \rightarrow \dot{\sigma}(x) < 0 \\ = 0 & \text{for } \sigma(x) = 0 \\ > 0 & \text{for } \sigma(x) < 0 \rightarrow \dot{\sigma}(x) > 0 \end{cases} \tag{8}$$

Kestabilan sistem tercapai jika $\sigma \dot{\sigma} < 0$. Berdasarkan teori Lyapunov, saat *sliding surface* mencapai kondisi $\sigma \dot{\sigma} < 0$,

sistem *state* akan konvergen ke titik pusat (0,0) *phase plane*, dengan menentukan nilai masukan, u , yang tepat. Ilustrasi proses menuju *sliding surface* dan titik pusat diilustrasikan pada Gbr. 1.

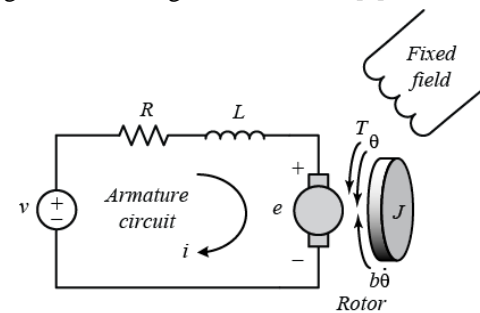


Gbr. 1 Proses *state* menuju *sliding surface* dan proses *sliding* menuju ke titik *equilibrium* [10].

III. MODEL PLANT

A. Pemodelan Fisik

Motor DC merupakan aktuator yang sering digunakan pada sistem kendali. *Plant* ini dapat langsung digunakan untuk gerakan berputar dan, jika digandeng dengan roda dan kabel, dapat digunakan untuk gerakan translasi [1].



Gbr. 2 Rangkaian ekuivalen listrik dari *armature* dan *free-body diagram* rotor.

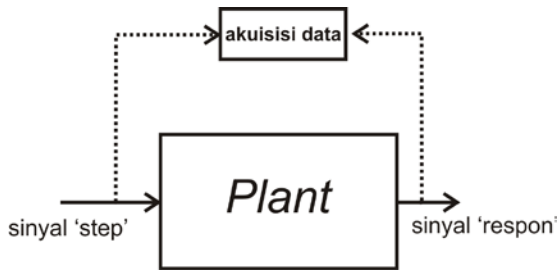
Pada Gbr. 2, masukan sistem diasumsikan sumber tegangan (V) yang diberikan ke *armature*. Keluarannya berupa kecepatan putar dari *shaft*, $\frac{d\theta}{dt}$. Di sini, rotor dan *shaft*

diasumsikan kaku (*rigid*). Selain itu, model friksi torsi memiliki hubungan proporsional terhadap kecepatan angular *shaft*. Torsi yang dihasilkan oleh motor DC proporsional terhadap arus *armature* dan besarnya medan magnet. Pada pemodelan ini, besarnya medan magnet dianggap konstan sehingga pada (9) torsi motor, T , memiliki hubungan yang proporsional dengan arus di *armature*, i , dikali dengan faktor konstanta, K_t ,

$$T = K_t i \tag{9}$$

sedangkan besarnya *back emf*, e , proporsional dengan kecepatan angular *shaft* dikalikan faktor konstanta K_e .

$$e = K_e \dot{\theta} \tag{10}$$



Gbr. 3 Proses pengambilan data untuk identifikasi model *plant*.



Gbr. 4 Set *plant* untuk pengambilan data.

Dalam satuan SI, konstanta torsi motor sama dengan konstanta *back emf*, $K_t = K_e$. Oleh karena itu, digunakan simbol 'K' untuk merepresentasikan kedua konstanta tersebut.

Dari Gbr. 2 dapat diperoleh (11) dan (12) dengan menggunakan prinsip hukum Newton kedua dan Hukum Kirchhoff Tegangan (*Kirchhoff's Voltage Law/KVL*).

$$J \ddot{\theta} + b \dot{\theta} = K i \tag{11}$$

$$L \frac{di}{dt} + R i = V - K \dot{\theta} \tag{12}$$

Dengan menggunakan transformasi Laplace, (11) dan (12) dapat dinyatakan dalam domain *S* menjadi (13) dan (14).

$$s(Js + b)\theta(s) = K I(s) \tag{13}$$

$$(Ls + R) I(s) = V(s) - Ks\theta(s) \tag{14}$$

Dengan mengeliminasi nilai $I(s)$ pada (13) dan (14), didapatkan *open loop transfer function* seperti pada (15), antara kecepatan putaran dan tegangan *armature*.

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2} \left[\frac{\text{rad/sec}}{V} \right] \tag{15}$$

Dengan menjadikan kecepatan putar dan arus listrik sebagai variabel *state*, maka (15) dapat diubah menjadi (16).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V \tag{16}$$

B. Identifikasi Model Plant

Pada penelitian ini, metode *black box* digunakan untuk mengidentifikasi model *plant*. Gbr. 3 dan Gbr. 4 merupakan diagram blok dan susunan *plant* untuk proses identifikasi. Hasil pengambilan data ditunjukkan pada Gbr. 5.

Dengan menggunakan *Toolbox* MATLAB dan berdasarkan informasi pada pemodelan sistem *plant* motor DC pada (15), didapatkan (17) sebagai *transfer function plant*.

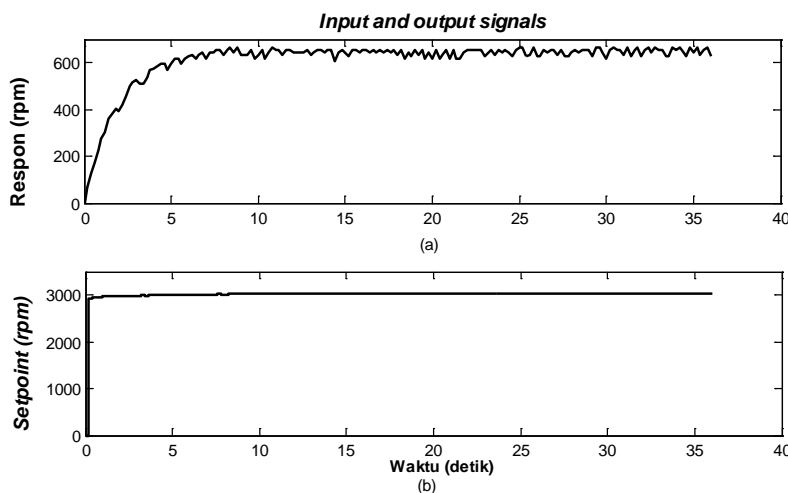
$$G(s) = \frac{0,5169}{s^2 + 4,877s + 2,442} \tag{17}$$

Model sistem tersebut selanjutnya diverifikasi dengan membandingkan sinyal *plant* dan sinyal dari model, yang hasilnya ditunjukkan pada Gbr. 6.

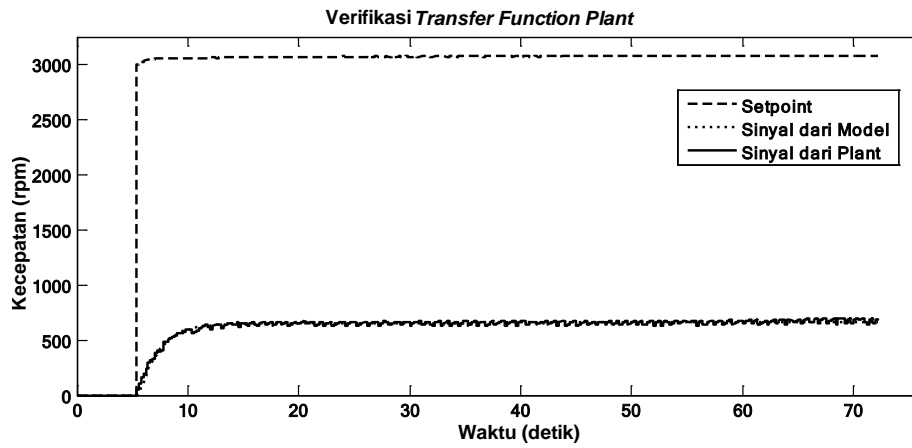
Model pada (17) selanjutnya diubah ke domain *state space* menjadi (18) dan (19).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4,877 & -2,422 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \tag{18}$$

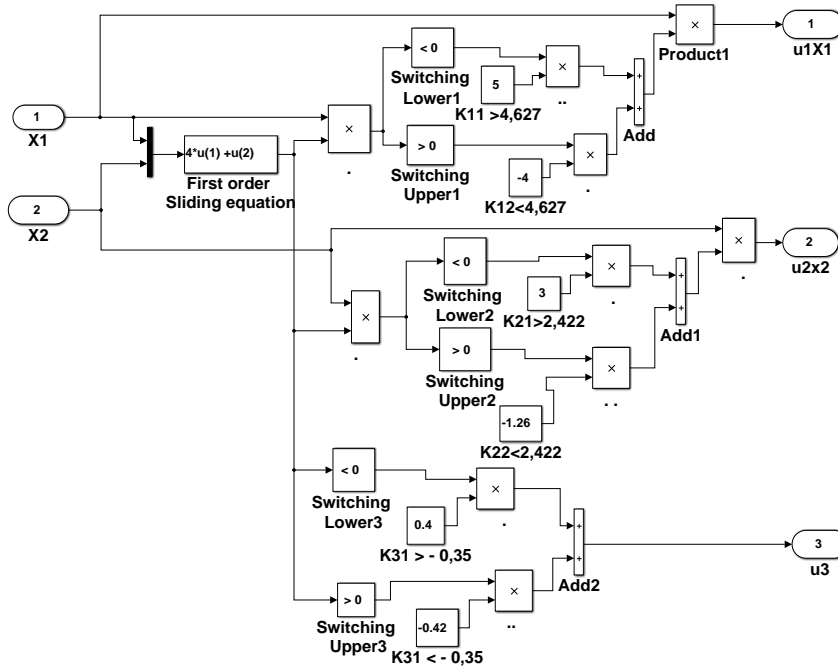
$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0,5169 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} u \tag{19}$$



Gbr. 5 Hasil perekaman data, (a) Respons; (b) *Set point*.



Gbr. 6 Verifikasi model plant.



Gbr. 7 Realisasi SMC dengan blok Simulink MATLAB.

IV. PERANCANGAN KENDALI

A. Syarat Controllability

Untuk mendesain SMC, langkah pertama yang dilakukan adalah menganalisis syarat *controllability* matriks G pada (20).

$$G = [B \quad AB] \tag{20}$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & -4,877 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Karena matriks berukuran 2×2 dan *rank*-nya 2, maka sistem bersifat *controllable*.

B. Perancangan Surface Equation

Berdasarkan (1) dan (2), ditentukan parameter $C1$ dan $C2$ sedemikian sehingga *surface equation* bersifat *asymptotically*

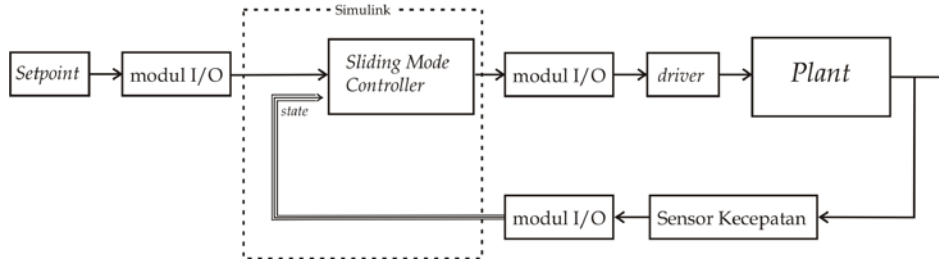
stable. Karena persamaan berorde-1 dan mengasumsikan *time constant* sebesar 0,25 detik, maka nilai $C1$ dan $C2$ adalah 1 dan 4 sehingga *sliding equation*-nya menjadi seperti (21).

$$\sigma(x) = 4X_1 + X_2 = 0 \tag{21}$$

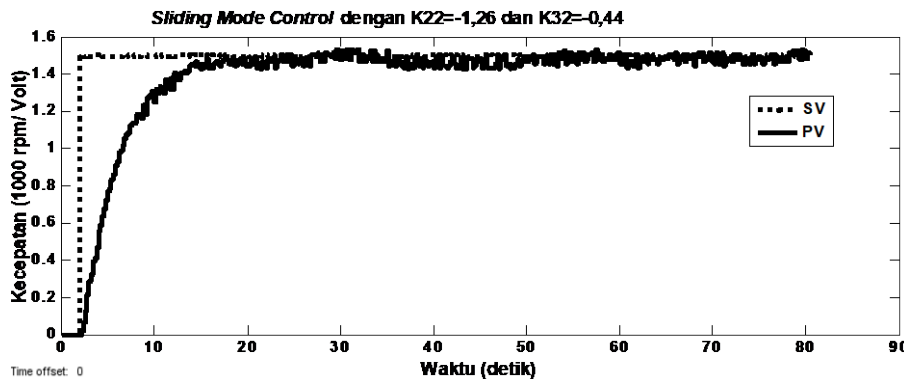
C. Analisis Kestabilan dengan Lyapunov

Berdasarkan (7), (8), dan (21), maka analisis kestabilan Lyapunov digunakan agar masukan kendali, U , terdapat di dalam (22) sehingga dengan mendesain sinyal kendali yang tepat, respons sistem akan selalu stabil.

$$\begin{aligned} \sigma \dot{\sigma} &< 0 \\ \sigma(4\dot{X}_1 + \dot{X}_2) &< 0 \\ \sigma(4(-4,877X_1 - 2,422X_2 + U + \delta[x,t]) + X_1) &< 0 \\ \sigma(-19,508X_1 - 9,688X_2 + 4(U + \delta[x,t]) + X_1) &< 0 \end{aligned} \tag{22}$$



Gbr. 8 Realisasi sistem kendali secara keseluruhan.



Gbr. 9 Respons kecepatan motor menggunakan SMC.

D. Perancangan Switching

Dari (22) didesain persamaan masukan kendali, U , menjadi (23) yang kemudian disubstitusikan ke (22) menjadi (24). Dari persamaan ini didesain mekanisme *switching* sehingga saat *state* X_1 dan X_2 menyentuh *sliding surface* secara otomatis agar diarahkan ke *operating point* (titik $[0,0]$).

$$U = \phi_1 X_1 + \phi_2 X_2 + \phi_3 \tag{23}$$

$$(4\phi_1 - 18,508)X_1\sigma + (4\phi_2 - 9,688)X_2\sigma + 4(\phi_3 + \delta[x,t]) < 0 \tag{24}$$

dengan ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 merupakan *switching* 1, 2, dan 3, sedangkan σ merupakan persamaan *sliding surface*. Dari (24) diketahui terdapat tiga bagian yang akan menentukan jumlah akhirnya bernilai positif atau negatif. Agar nilainya negatif, maka operasi aritmatika pada setiap komponen dirancang sedemikian rupa sehingga hasilnya selalu negatif.

1. Bagian pertama diatur negatif, $(4\phi_1 - 18,508)X_1\sigma < 0$.
 - Agar bernilai negatif, saat $X_1\sigma < 0$, maka $(4\phi_1 - 18,508) > 0$ atau $\phi_1 > 4,627$. Pada kondisi ini, keluaran *switching*, $K_{11} = 6$. Nilai ini ditentukan sembarang selama syaratnya terpenuhi.
 - Saat $X_1\sigma > 0$, maka $(4\phi_1 - 18,508) < 0$ atau $\phi_1 < 4,627$. Keluaran *switching*, K_{12} , ditentukan bernilai 2.
2. Bagian kedua diatur negatif, $(4\phi_2 - 9,688)X_2\sigma < 0$
 - Agar bernilai negatif, saat $X_2\sigma < 0$, $(4\phi_2 - 9,688) > 0$ atau $\phi_2 > 2,422$. Pada kondisi ini keluaran *switching*, K_{21} , ditentukan bernilai 6.

- Saat $X_2\sigma > 0$, agar tetap bernilai negatif, nilai $(4\phi_2 - 9,688) < 0$ atau $\phi_2 < 2,422$. Besarnya keluaran *switching*, K_{22} , ditentukan bernilai -1,22.

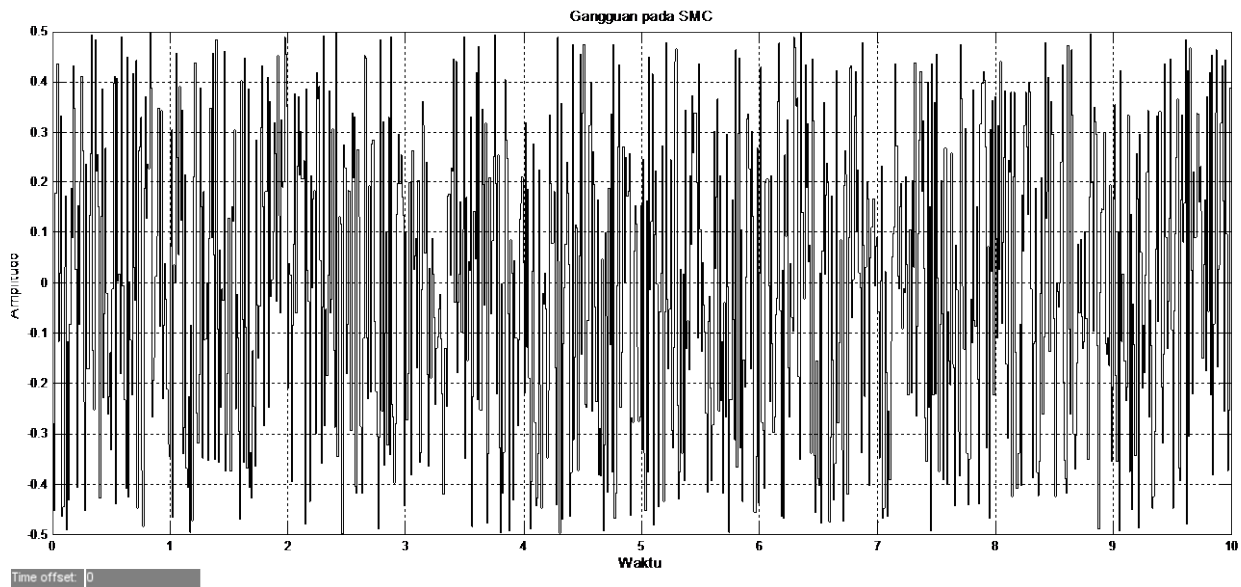
3. Bagian ketiga diatur negatif, $4(U + \delta[x,t])\sigma < 0$
 - Saat $\sigma < 0$, agar bernilai negatif, $(\phi_3 + \delta[x,t]) > 0$. Dengan memberi batas amplitude nonlinearitas gangguan $|\delta[x,t]| = 0,35$, maka nilai $\phi_3 > -0,35$, keluaran *switching*, K_{31} , ditentukan bernilai 0,4.
 - Saat $\sigma > 0$, agar bernilai negatif $(\phi_3 + \delta[x,t]) < 0$, nilai $\phi_3 < -0,35$, dipilih nilai keluaran *switching*, $K_{32} = -0,4$.

V. HASIL DAN ANALISIS

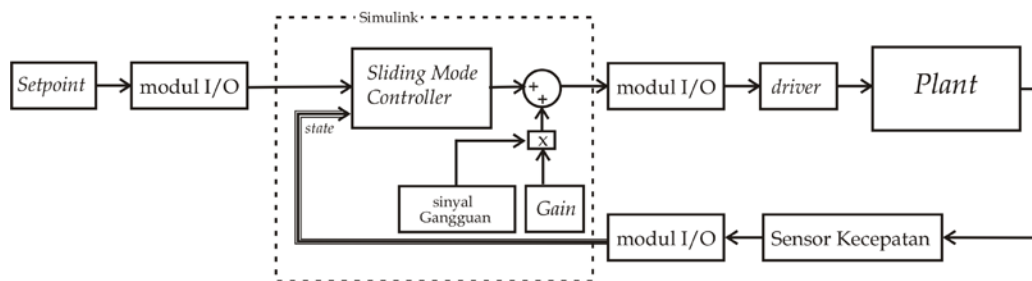
Bagian ini membahas realisasi hasil perancangan kendali, analisis perubahan batas *switching* terhadap respons *plant*, serta kemampuan SMC dalam mengatasi gangguan.

A. Realisasi Desain Kendali

Hasil perancangan SMC direalisasikan ke blok Simulink seperti ditunjukkan pada Gbr. 7, sedangkan diagram blok sistem secara keseluruhan diperlihatkan pada Gbr. 8. Berdasarkan kriteria kestabilan Lyapunov, dihasilkan batas *switching gain* yang menjamin sistem tetap stabil. Kriteria tersebut masih bersifat umum sehingga pada makalah ini penentuan batas *switching* dilakukan secara manual sedemikian rupa, sehingga respons sistem memiliki *rise time*, T_r , *overshoot* (%MP), dan *steady state error*, e_{ss} , yang kecil. Dikarenakan waktu asli dan waktu yang ada di MATLAB



Gbr. 10 Sinyal acak yang mewakili gangguan.



Gbr. 11 Blok sistem saat pengujian gangguan.

berbeda, maka pengukuran T_r dilakukan dengan terlebih dahulu mengkonversi waktu yang ditampilkan di MATLAB ke dalam waktu asli. Besarnya konstanta waktu diperoleh dengan mencari perbandingan MATLAB dan waktu asli. Dari pengukuran diperoleh 10 : 11,16 detik.

TABEL I
PENGARUH PERUBAHAN BATAS SWITCHING

No.	K_{22}	K_{32}	T_r (detik)	%MP	e_{ss}
1	-1,1	-0,4	8,7	0	-0,479
2	-1,26	-0,4	15,4	0	-0,059
3	-1,3	-0,4	18,97	0	0,048
4	-1,1	-0,42	10,26	0	-0,49
5	-1,26	-0,42	16,74	0	0,009
6	-1,3	-0,42	18,74	0	0,078
7	-1,1	-0,44	8,7	0	-0,46
8	-1,26	-0,44	14,73	0	0,009
9	-1,3	-0,44	21,42	0	0,146

Berdasarkan pengujian didapatkan bahwa batas *switching* yang berpengaruh adalah K_{22} dan K_{23} . Pada makalah ini pengamatan dilakukan dengan mengkombinasikan tiga nilai tersebut. Tabel I merupakan hasil percobaan dengan berbagai nilai batas *switching*.

Dari Tabel I diketahui bahwa semua kombinasi nilai K_{22} dan K_{32} tidak menyebabkan *overshoot*. Kualitas respons yang

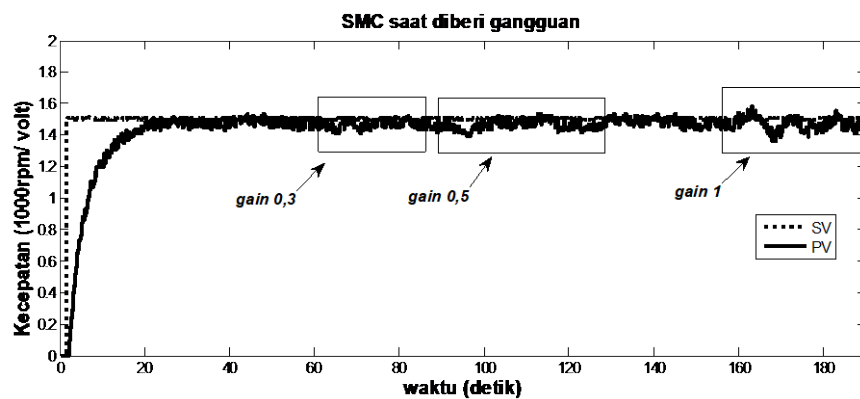
berpengaruh adalah besarnya *rise time*, T_r , dan *steady-state error*, e_{ss} . Nilai e_{ss} yang paling kecil terjadi pada percobaan ke-5 dan ke-8. Dengan mempertimbangkan nilai T_r yang lebih kecil, batas *switching* dari percobaan ke-8 digunakan sebagai nilai K_{22} dan K_{32} . Gbr. 9 memperlihatkan hasil pengujian sistem kendali dengan kedua parameter tersebut.

B. Uji Nonlinearitas Gangguan

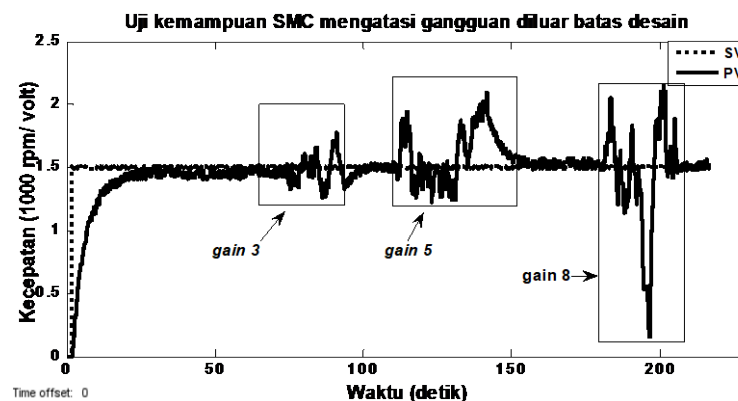
Pengujian keandalan SMC dilakukan dengan memberikan sinyal acak yang mewakili gangguan berupa derau, perubahan nilai internal komponen, dan nonlinearitas gangguan lainnya. Gbr. 10 merupakan sinyal yang diujikan, sedangkan Gbr. 11 merupakan blok pengujian gangguan yang diubah-ubah dengan mengalikan *gain* 0,3, 0,5, dan 1 terhadap sinyal gangguan.

Gbr. 12 menunjukkan respons sistem saat diberi gangguan. Terlihat pada saat diberi gangguan dengan bobot (*gain*) 0,3 dari batas maksimum, SMC dapat menjaga kecepatan motor pada sekitar *set point*. Sistem mulai sedikit berosilasi saat *gain* dinaikkan 0,5. Pada saat *gain* maksimum, osilasi mulai terjadi, tetapi SMC masih dapat menjaga kecepatan disekitar *set point*.

Pengujian SMC juga dilakukan dengan memberikan gangguan di luar batas kriteria desain. Gbr. 13 menunjukkan respons saat diberi gangguan dengan *gain* yang berbeda-beda (3, 5, dan 8). Pada saat sinyal gangguan 3 kali lebih besar dari



Gbr. 12 Respons sistem saat diberi gangguan.



Gbr. 13 Sistem saat diberi gangguan di luar batas range gangguan.

batas maksimum, sistem berosilasi di sekitar *set point* dengan amplitude yang cukup besar. Penambahan *gain* menjadi 5 kali membuat osilasi respons semakin besar, tetapi masih dijaga di sekitar *set point*. Saat *gain* diatur 8, respons sistem berosilasi dengan amplitude yang besar dengan kecenderungan menuju kondisi tidak stabil (menjauhi *set point*).

VI. KESIMPULAN

Pada sistem kendali kecepatan motor DC, pemodelan sistem dapat dilakukan dengan teknik identifikasi dengan terlebih dahulu mengetahui struktur umum *plant*. Untuk memastikan model yang diperoleh tidak terlalu jauh dari *plant* asli, perlu dilakukan verifikasi sinyal asli dan sinyal keluaran model *plant* (dalam *transfer function*). Pada desain SMC, syarat kestabilan Lyapunov menjamin respons sistem tetap stabil. Selain itu, *imperfect sistem model* mengakibatkan perlunya pengaturan ulang batas *switching gain*. Pada pengujian dengan gangguan sesuai kriteria desain, 0,3, 0,5, dan 1, SMC dapat menjaga keluaran di sekitar *set point*. Pada saat gangguan diberikan 3 dan 5 kali lebih besar dari batas desain, SMC masih tetap menjaga respons disekitar *set point* tetapi osilasinya semakin besar (*marginally stable*). Pemberian gain 8 kali dari batas maksimum desain menyebabkan sistem tidak stabil (menjauhi *set point*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada UPPM Politeknik Negeri Bandung atas bantuan dana penelitian mandiri dosen 2017.

REFERENSI

- [1] Messner B., Tilbury D., *DC Motor Speed: System Modelling*, Course Tutorial, Dept. Mechanical Engineering at Carnegie Mellon University and Dept. Mechanical Engineering and Applied Mechanics at the University of Michigan, 2012.
- [2] M. Gamal, Nayera S., MRM. Rizk, AKA. El Soud, "Delay Compensation Using Smith Predictor for Wireless Network Control System," *Alexandria Engineering Journal*, Vol.55, Issue 2, hal. 1421-1428, June 2016.
- [3] M. Ren, J. Zhang, M Jiang, M. Yu, "Minimum (h, phi)-Entropy Control for Non-Gaussian Stochastic Networked Control Systems and Its Application to a Networked DC Motor Control System," *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, Vol.23, No. 1, hal. 406-411, Jan. 2015.
- [4] S. Reimann, D.H. Van, S. Al-Areqi, S. Liu, "Stability Analysis and PID Control Synthesis under Event-Triggered Communication," *2015 European Control Conference (ECC)*, 2015, hal. 2174.
- [5] CU Maheswararao, YSK. Babu, K. Amaresh, "Sliding Mode Speed Control of a DC Motor," *2011 Int.conf. Communication Sitemis and Network Technologies (CSNT)*, 2011, hal. 387.
- [6] V Singh, V Sharma, "Sliding Mode Controller Design for DC Motor With Non-Linearities," *2015 Int. Conf. On Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, 2015, hal. 0558.
- [7] SV. Ambesange, SY. Kamble, DS. More, "Application of Sliding Mode Control for the Speed Control of DC Motor Drives," *2013 IEEE International Conference on Control Application*, 2013, hal. 832.
- [8] HS. Ramirez, MA. Aguilar-Orduna, EWZ. Bustamante, "Sliding Mode Tracking Controller for a Non-Linear Single Link-DC Motor System: An Input Output Approach," *IFAC PapersOnLine*, Vol. 50, Issue 1, hal. 11619-11624, 2017.
- [9] N. Colo, S. Masic, S. Huseinbegovic, BP. Drazenovic, "A Discrete Time Sliding Mode Speed Controller with Disturbance Compensation

- for a 5kW DC Motor," *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2016)*, 2016, hal. 2612.
- [10] Hung, J.Y., *Nonlinear Control*, A Course Note of Spring 2011. National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan, 2011
- [11] Feriyonika, Gunawan D., "Fuzzy Sliding Mode Control for Enhancing Velocity Performance in Injection Molding Machine," *International Journal of Artificial Intelligence*, Vol. 10, No. S13, hal. 75-87, 2013.