



DESAIN DAN ANALISIS KENDALI SISTEM SUSPENSI MENGGUNAKAN PID DAN LOGIKA FUZZY DENGAN SIMULINK MATLAB

Rohmad[✉], Sunarno , Sukiswo Supeni Edie

Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Semarang, Indonesia
Gedung D7 Lt. 2, Kampus Sekaran Gunungpati, Semarang 50229

Info Artikel

Diterima Mei 2015
Disetujui Mei 2015
Dipublikasikan Agustus 2015

Keywords:
Active suspension, Fuzzy logic, Linear, PID, Simulink matlab

Abstrak

Sistem suspensi merupakan salah satu komponen mekanik yang penting dalam suatu mobil. Sistem tersebut sering kali menimbulkan suatu permasalahan yang sulit dihindari yaitu getaran yang berlebih. Tujuan penelitian yaitu mengetahui kinerja/peformansi sistem kontrol pada sistem suspensi mobil, kontrol yang ditetapkan mampu meredam getaran dan memberikan kenyamanan bagi penumpang. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu pemodelan dan simulasi sistem suspensi dan kendalinya menggunakan Simulink Matlab. Kendali yang ditetapkan pada penelitian ini menggunakan kendali PID dan FLC (*Fuzzy Logic Controller*). Pengujian pada kendali *PID* dilakukan berulang kali, sehingga dapat diketahui pengaruh pemberian penguatan terhadap hasil peformansi sistem. Hasil pemberian penguatan $K_p = 9558.3589$, $K_i = 57244.9325$, $K_d = 22.9008$ menunjukkan peformansi sistem yang sesuai dengan design kriteria. Karakteristik peformansi sistem yang dihasilkan pada kendali *PID* yaitu *settling time* = 1.7 sekon, dengan *overshoot* = 2.09%, *peak time* = 1.02, *rise time* = 0.304 sekon. Pengujian pada FLC dilakukan dengan tiga variasi aturan *fuzzy* yaitu 7 aturan, 25 aturan, dan 49 aturan. Peformansi sistem yang optimal dan sesuai dengan design kriteria pada pemberian 49 aturan *fuzzy*, dengan karakteristik sistem yaitu *settling time* = 1.05 sekon, *overshoot* = 2.78%, *peak time* = 0.51, *rise time* = 0.4 sekon. Pengujian dari kedua kendali menunjukkan bahwa hasil peformansi sistem dengan kendali FLC lebih baik daripada kendali *PID*.

Abstract

The suspension system is one of the important mechanical components in a car. Mechanical systems that work often lead to a difficult problem has avoid excessive vibration. The aim of research on this suspension system is able to damped the vibration / oscillation interaction with the street car, so that the resulting of the system can be performance improve safety and comfort. The method used in this research has to perform modeling and simulation using Simulink Matlab. Control set out in this study using PID controller and FLC (*Fuzzy Logic Controller*). Tests on PID controller is done any times in order, to determine the effect reinforcement of the peformance system results. Results Award reinforcement $K_p = 9558.3589$, $K_i = 57244.9325$, $K_d = 22.9008$ shows that peformance system accordance with design criteria. Characteristics of the peformance system PID controller has generated on settling time = 1.7 second, with overshoot = 2.09%, peak time = 1.02, rise time = 0.304 second. Tests on FLC do with three variations of fuzzy rules are 7 rules, 25 rules and 49 rules. Peformance system optimal and in accordance with the design criteria has award on 49 fuzzy rules, with the characteristics of the system are second settling time = 1.05 second, overshoot = 2.78%, peak time = 0.51, rise time = 0.4 second. Testing of both controller shows that the results of the analysis peformance system of FLC method is better than PID controller method..

© 2015 Universitas Negeri Semarang

[✉] Alamat korespondensi:
E-mail: rohmad_physics@student.unnes.ac.id

ISSN 2252-6978

PENDAHULUAN

Dewasa ini kebutuhan untuk melakukan perancangan sistem kontrol telah meluas dalam berbagai bidang kehidupan. Pada awal ditemukannya teknologi tersebut, kebutuhan perancangan hanya terkonsentrasi pada sektor industri dan *manufaktur* saja. Berkembangnya teknologi instrumen dan komputasi saat ini, berdampak pada perkembangan teknologi kendali (*control*) mulai dari sistem kendali konvensional (PID) sampai sistem kendali yang modern (*optimal, robust, fuzzy*).

Sistem kendali berbasis PID merupakan teknik konvensional yang sering digunakan. Informasi mengenai karakteristik sistem yang dikontrol selalu diwujudkan dalam bentuk model matematika. Model matematika yang dibuat belum tentu dapat mewakili keadaan sistem sebenarnya. Oleh karena itu, rancangan sistem kontrol konvensional menghasilkan performansi buruk, ketika dihadapkan pada sistem yang sukar diprediksi (Ebrahimi & Gharaveisi, 2012: 37).

Sistem *Fuzzy Logic Controller (FLC)* merupakan sebuah teknik baru dalam dunia kontrol. Secara umum, penerapan *fuzzy logic* dalam sistem kontrol digunakan untuk meningkatkan performansi sistem yang dibangun berdasarkan rancangan sistem kontrol konvensional. Sistem *Fuzzy Logic Controller (FLC)* tidak dimodelkan melalui pemodelan matematika, namun mampu menghasilkan performansi sistem kontrol yang sangat baik (Ozgur & Ilknur, 2012: 67). Berbagai sistem fisis dapat dijadikan kajian dalam teknik kontrol, salah satunya yaitu sistem kontrol pada suspensi mobil.

Sistem suspensi pada mobil merupakan salah satu komponen mekanik penting dalam keseluruhan perangkat dalam mobil. Sistem mekanik yang bekerja sering kali menimbulkan suatu permasalahan yang sulit dihindari yaitu getaran yang berlebihan. Getaran ini apabila tidak diantisipasi maka menyebabkan kegagalan fungsi pada mesin, perasaan tidak nyaman pada penumpang dan suara yang mengganggu yang timbul dari sistem tersebut (Anggoro, 2013).

Penelitian tentang sistem peformansi kontrol dari sistem suspensi kendaraan pasif (PVSS), sistem kendaraan setengah aktif (SAVSS), dan sistem suspensi kendaraan aktif (AVSS) telah banyak dikembangkan, salah satunya yaitu Sakman *et al* (2005: 649) yang membahas tentang keunggulan peformansi suspensi aktif non-linier dengan kontrol logika *fuzzy* dan membandingkannya dengan hasil suspensi aktif dan setengah aktif.

Dalam penelitian Ozgur & Ilknur (2012: 2139) mengenai “*Modelling and Control of a Nonlinear Half-Vehicle Suspension System: a Hybrid Fuzzy Logic Approach*” dengan hasil penelitiannya menyatakan suatu sistem suspensi yang dikenal dengan sistem suspensi aktif mampu memperbaiki kinerja dari sistem suspensi pasif dengan pendekatan *fuzzy logic*. Hasil penelitian Tesna (2012) menunjukkan bahwa sistem suspensi aktif yang dirancang memiliki rata-rata defleksi badan, roda, dan percepatan kendaraan lebih kecil dibanding sistem suspensi pasif serta memiliki percepatan maksimum lebih kecil dari $79,7479 \text{ m/s}^2$ menjadi $63,6814 \text{ m/s}^2$ untuk gangguan berupa sinyal random.

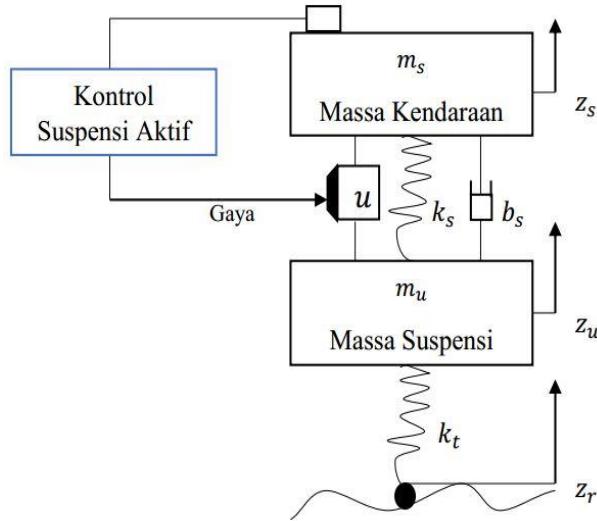
Optimalisasi karakteristik peformansi sistem merupakan suatu langkah yang tepat dalam mengatasi masalah gaya kontrol yang berlebih. Kendali ini penting agar sistem berjalan sesuai kriteria desain ideal instrumen dan dalam menghemat biaya yang harus dikeluarkan untuk perawatan serta perbaikan sistem yang mengalami getaran berlebihan.

Simulasi *design* serta analisis penelitian yang dilakukan dari sistem suspensi aktif menggunakan *Simulink Matlab*. *Matlab* merupakan bahasa pemrograman level tinggi yang dikhususkan untuk kebutuhan komputasi teknis, visualisasi dan pemrograman seperti komputasi matematik, analisis data, pengembangan algoritma, simulasi pemodelan dan grafik-grafik perhitungan (Hany, 2013). *Simulink* adalah *platform* didalam *Matlab* yang digunakan untuk mensimulasikan sistem dinamik secara *realtime*. *Simulink Matlab* dapat memudahkan dalam membangun sistem fisis aktif suspensi dari persamaan dinamika dengan berbagai macam fasilitas analisis data (MathWorks, 2014).

Sistem suspensi dapat diklasifikasi menjadi pasif, semi-aktif, dan aktif. Pada sistem suspensi pasif, komponen yang digunakan masih konvensional dan memiliki karakteristik tetap, yaitu pegas yang tidak dapat dikontrol dan peredam penyerap getaran. Sistem suspensi semi-aktif terdiri dari komponen pasif dan aktif. Sedangkan sistem suspensi aktif tidak memiliki komponen pasif (Oni, 2013).

Model matematis merupakan langkah penting untuk kontrol vibrasi dari kendaraan. Umumnya, model yang digunakan untuk sistem nyata meliputi beberapa derajat dari perkiraan karena dalam kenyataannya tidak

dapat memodelkan secara sempurna (Pfeiffer, 2007). Penelitian ini digunakan model $\frac{1}{4}$ Suspensi aktif sehingga dapat mempermudah dalam menganalisis karakteristik dari sistem suspensi. Pada model $\frac{1}{4}$ suspensi aktif kendaraan, membagi sistem suspensi menjadi 4 (empat) bagian dengan asumsi setiap suspensi pada keempat roda kendaraan simetris. Sistem $\frac{1}{4}$ Suspensi aktif dapat diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Sistem $\frac{1}{4}$ Suspensi Aktif Kendaraan

Keterangan dari parameter diatas sebagai berikut:

- (m_s) Massa badan kendaraan (*body sprung*)
- (m_u) Massa suspensi (*body unsprung*)
- (k_s) Koefisien pegas dari sistem suspensi
- (k_t) Konstanta pegas dari roda dan ban
- (b_s) Konstanta redaman dari sistem suspensi
- (u) Gaya keluaran aktuator, gaya yang didesain untuk kontrol
- (z_s) Defleksi badan kendaraan
- (z_u) Defleksi massa ban, (z_r) Daerah permukaan gangguan

Persamaan dinamik sistem dapat diketahui dengan menggunakan hukum II Newton, yaitu:

Untuk m_s ,

$$\sum F = m a$$

$$-k_s(z_s - z_u) - b_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + u = m_s \ddot{z}_s \\ \ddot{z}_s = \frac{-k_s(z_s - z_u) - b_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + u}{m_s} \quad 2.1$$

Untuk m_u ,

$$\sum F = m a$$

$$k_t(z_u - z_r) + b_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s(z_s - z_u) - u = m_u \ddot{z}_u \\ \ddot{z}_u = \frac{-k_t(z_u - z_r) + b_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s(z_s - z_u) - u}{m_u} \quad 2.2$$

Dimana,

$Z_s - Z_u$ = Defleksi suspensi

\dot{Z}_s = Kecepatan badan kendaraan

\ddot{Z}_s = Percepatan badan kendaraan

$Z_u - Z_r$ = Defleksi roda

\dot{Z}_u = Kecepatan roda

Kendali PID merupakan jenis pengatur konvensional yang banyak digunakan. Kendali PID merupakan gabungan dari tiga macam pengendali, yaitu kontroler proporsional (Proportional Controller), kontroler integral (Integral Controller), dan kontroler turunan (Derivative Controller) yang dapat dirumuskan:

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

dengan,

m = sinyal keluaran kendali

e = sinyal kesalahan penggerak

T_i = waktu integral

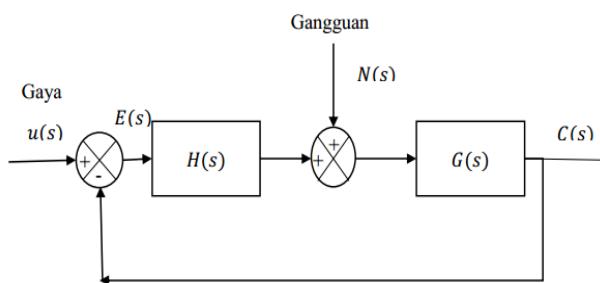
K_p = sensitifitas proporsional / penguatan

T_d = waktu derivatifnya

Kendali PID memiliki *transfer function* sebagai berikut:

$$H(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s}$$

Dalam sistem kendali loop tertutup, analisis yang dilakukan dapat ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram Blok Sistem Loop Tertutup

$$C(s) = G(s) H(s) E(s)$$

$$C(s) = H(s)[u(s) - C(s)]$$

$$C(s)\{1 + G(s)H(s)\} = G(s)H(s)u(s)$$

$$\frac{C(s)}{u(s)} = \frac{G(s)H(s)}{1+G(s)H(s)}$$

Sistem *plant* yang dikendalikan dinyatakan dalam blok $G_1(s)$ dengan kendali pada $H(s)$. Input yang digunakan berupa gangguan $N(s)$ dan masukan gaya $u(s)$ dengan keluaran yang didapatkan berupa defleksi kendaraan sistem yaitu $C(s)$. Sinyal e merupakan sinyal error, menyatakan selisih antara masukan $u(s)$ dengan keluaran $C(s)$.

Pada kendali PID (konvensional), sistem yang dikontrol dimodelkan secara analitis oleh sejumlah persamaan diferensial. Kontrol logika *fuzzy* menggunakan basis pengetahuan dan ungkapan linguistik yang merepresentasikan cara kerja operator manusia. Dimana aturan kontrol ini merupakan himpunan aturan-aturan kontrol linguistik yang diturunkan secara heuristik berdasarkan keadaan proses dan pengalaman operator, sehingga tidak memerlukan model matematik proses.

Konfigurasi dasar suatu kontrol logika *fuzzy* diperlukan empat komponen utama, yaitu:

- a. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi bertujuan untuk transformasi masukan nyata yang bersifat bukan fuzzy ke himpunan fuzzy.

- b. Basis pengetahuan

Basis pengetahuan terdiri dari basis data dan basis kaidah atur. Basis data mendefinisikan himpunan fuzzy atas ruang-ruang masukan dan keluaran. Basis kaidah atur berisi kaidah-kaidah kontrol.

- c. Logika pengambilan keputusan

Logika pengambilan keputusan adalah cara pengambilan keputusan dengan menggunakan implikasi fuzzy dan mekanisme penarikan kesimpulan.

Ada dua tipe sistem inteferensi (keputusan) *fuzzy* yang dapat diimplementasikan dalam *Fuzzy Logic Controller Matlab*, yaitu tipe Mamdani (*Metode Max-Min*) dan tipe Sugeno (Abroon & Clarence, 2014).

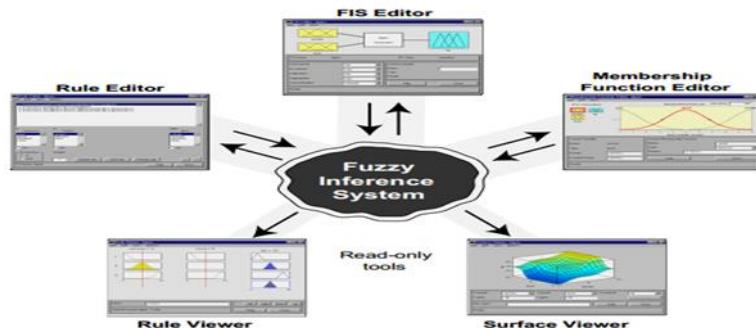
- d. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses pengubahan himpunan fuzzy ke sinyal yang bersifat bukan fuzzy. Ada dua metode yang paling banyak digunakan dalam sistem *fuzzy* dan proses kendali, yaitu:

- 1) Metode pusat bidang (*Center of Area Method*, COA atau Centroid (Matlab)), COA merupakan metode defuzifikasi dengan memperhitungkan pusat titik berat dari seluruh kemungkinan distribusi aksi kendali.
- 2) Metode maksimum rata-rata (*Mean of Maximum Method*, MOM), MOM adalah metode defuzifikasi dengan memperhitungkan nilai rata-rata dari seluruh kemungkinan aksi kendali total yang nilai keanggotaannya maksimum.

Variabel linguistik himpunan fuzzy umumnya memiliki arti, seperti NB (*negative big*), NM (*negative medium*), NS (*negative small*), ZE (*zero*), PS (*positive small*), PM (*positive medium*), PB (*positive big*) dan seterusnya.

Sistem kendali fuzzy dalam Matlab dibangun menggunakan FIS (*Fuzzy Inference System*). FIS berisi tentang FIS editor, membership function, rule Editor, dengan hasil kendali ditampilkan dalam surface viewer dan rule viewer. Sistem FIS dapat ditunjukkan pada Gambar 3.



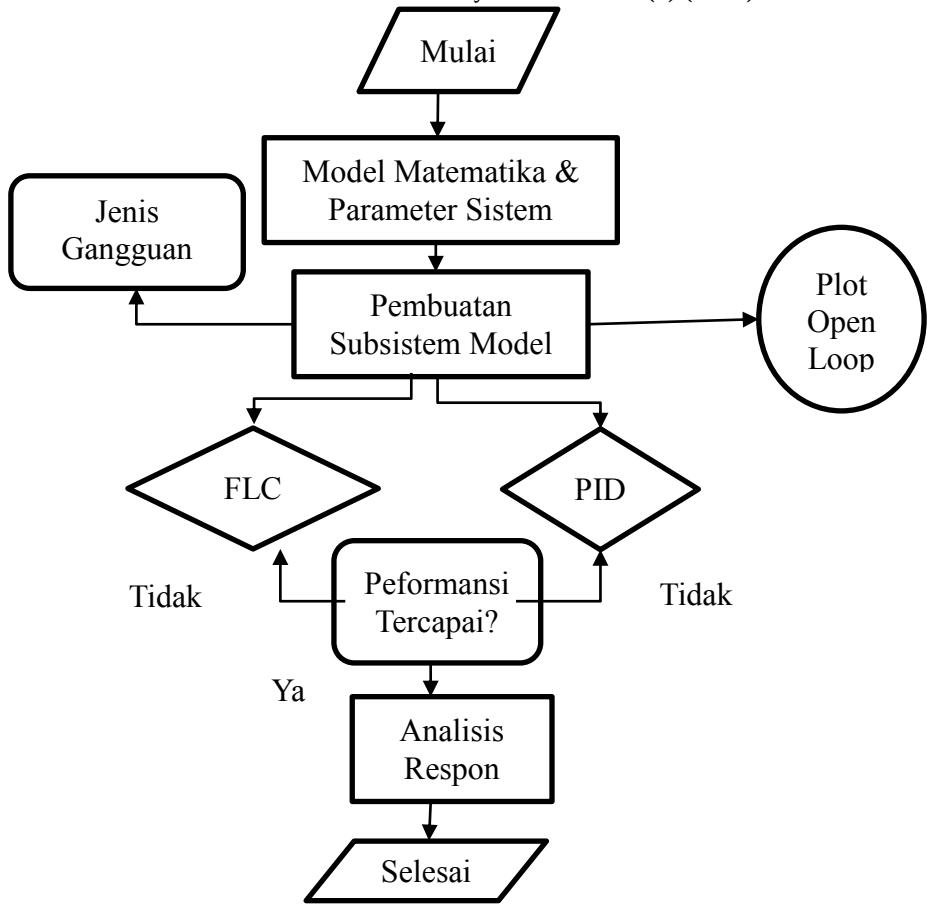
Gambar 3 FIS (Mathwork, 2014)

METODE PENELITIAN

Penelitian ini terbagi dalam 2 (dua) tahapan, yaitu:

- a. Tahap persiapan yang terdiri dari pembuatan model matematika sistem hingga penentuan peformansi sistem untuk keadaan loop terbuka.
- b. Tahap rancang bangun sistem, terdiri dari pembuatan model sistem ¼ suspensi aktif, sistem kendali PID dan FLC, penetapan desain kriteria, dan analisis hasil peformansi sistem dengan Simulink matlab.

Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 4, yaitu:



Gambar 4 Diagram Alir Penelitian

Pengujian pada penelitian ini secara garis besar terdiri dari 5 (lima) tahapan, yaitu:

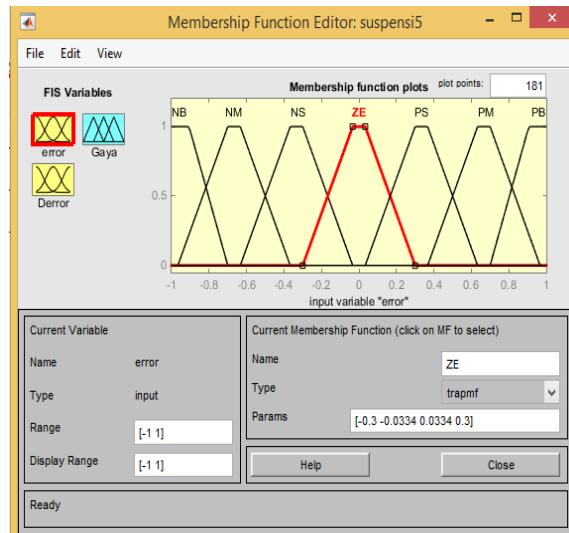
- Tahap pertama, mengimplementasikan model matematika sistem yang telah dibuat kedalam Simulink matlab untuk mendapatkan respon keadaan *open loop* sistem. Pada tahap ini juga dilakukan pengujian penentuan *range* gangguan. Peformansi sistem loop terbuka dapat diketahui pada pengujian tahap pertama.
- Tahap kedua, Tahap kedua, membangun sistem kendali PID berbasis *Simulink Matlab* dengan menggunakan metode *tuning* PID kontrol *robust*. Pengujian sistem kendali PID dilakukan berulang kali hingga mendapatkan penguatan yang sesuai dengan desain kriteria. Analisis data yang dilakukan dari pengujian berupa data penguatan K_p, K_i, K_d terhadap peformansi sistem yang dihasilkan, sehingga dapat diketahui pengaruhnya. Data pada pengujian sistem dengan kendali PID dinyatakan dalam domain waktu (karakteristik respon transien).
- Tahap ketiga, melakukan pembuatan FLC (*Fuzzy Logic Controller*) yang dibangun berbasis Simulink Matlab berisi *file FIS (Fuzzy Inference System)*, yang dibuat menggunakan *FLT (Fuzzy Logic Toolbox)* Matlab. Variabel fuzzy yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Variabel Fuzzy Sistem ¼ Suspensi aktif

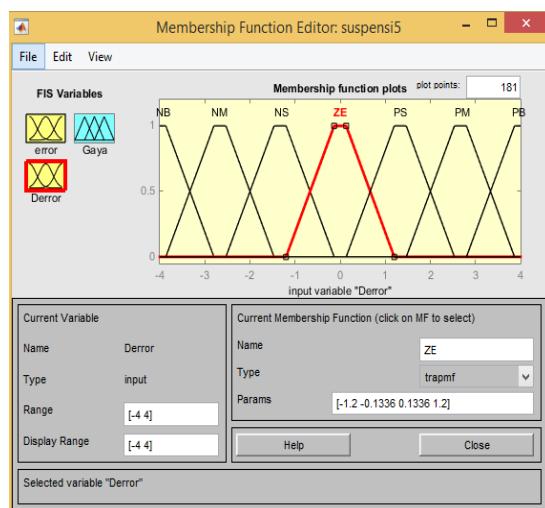
Input	Output
$e(Z_s - Z_u)$ Defleksi suspensi	Gaya
$de(Z_s - Z_u)$ Defleksi suspensi	aktuator

Metode defuzifikasi yang digunakan adalah metode *COA* (metode pusat bidang). Penentuan jumlah maksimal aturan *fuzzy* berdasarkan pada jumlah himpunan *fuzzy* untuk masing-masing input. Input himpunan *fuzzy* dari kedua variabel *fuzzy* yang digunakan yaitu ada 7 buah, sehingga aturan *fuzzy* maksimal yang dapat dibangun yaitu $7^2 = 49$ aturan.

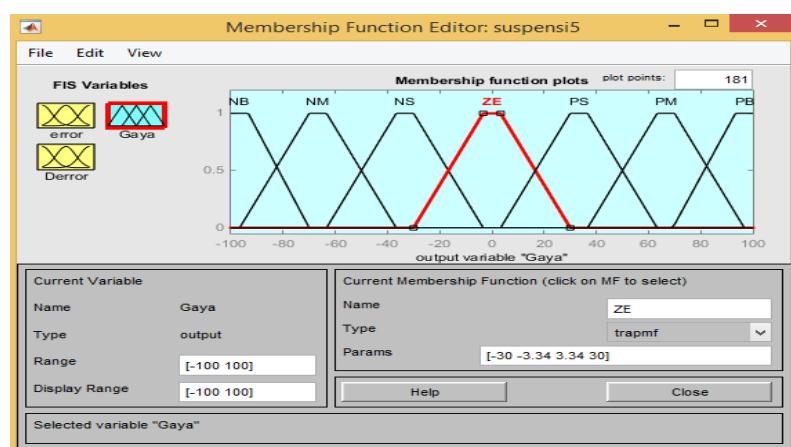
Penentuan himpunan *fuzzy* serta fungsi keanggotaan *fuzzy* bersifat bebas. Pengujian yang dilakukan menggunakan kurva trapezoidal dengan input *Error* yaitu [-1 1] dan input *dError* yaitu [-4 4]. Penentuan range kendali *fuzzy* berpengaruh terhadap hasil peformansi sistem. Himpunan *fuzzy* input *Error* ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan himpunan *fuzzy* input *dError* dan output *gaya* secara berurutan ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 5 Masukan Pertama (*Error*) Untuk Pengujian 49 Aturan



Gambar 6 Masukan Kedua (*Error*) Untuk Pengujian 49 Aturan



Gambar 7 Keluaran (Gaya) Untuk Pengujian 49 Aturan

Jumlah aturan *fuzzy* maksimal yang digunakan dalam membangun FLC (*Fuzzy Logic Controller*) untuk sistem $\frac{1}{4}$ suspensi aktif ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Aturan *Fuzzy* dengan *Fuzzy Associative Memory* (FAM)

U (Gaya)		$e(Z_s - Z_u)$ Defleksi Vertikal Kendaraan						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Defleksi Kendaraan Vertikal	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Pembacaan penentuan aturan sebagai berikut:

$R_1: IF e(Z_s - Z_u = NB) AND de(Z_s - Z_u = NB) Then (U = NB)$

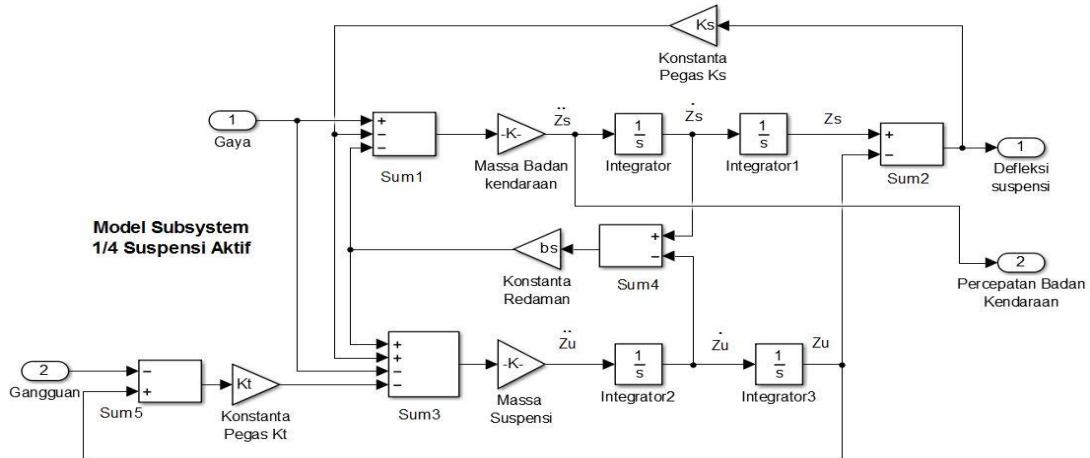
$R_1: IF e(Z_s - Z_u = NB) AND de(Z_s - Z_u = NM) Then (U = NB)$, dan seterusnya

- d. Tahap keempat, melakukan analisis hasil peformansi sistem $\frac{1}{4}$ suspensi aktif menggunakan kendali PID dan FLC. Hasil analisis kendali PID ditampilkan dalam data penguatan terhadap peformansi sistem yang dihasilkan. Hasil penelitian pada sistem suspensi aktif mobil dengan kendali PID dinyatakan dalam analisis domain waktu (*settling time, overshoot, rise time, peak time*). Hasil analisis FLC dilakukan dengan mengimplementasikan aturan *fuzzy* yang telah ditetapkan kedalam *plant* sehingga dapat diketahui peformansi sistem kontrol yang diberikan.
- e. Tahap kelima, membandingkan hasil peformansi sistem dari kedua metode kendali yang diamati dari keluaran peformansi sistem yang dihasilkan sehingga dapat memberikan informasi mengenai kendali yang baik dan memenuhi desain kriteria dengan berbagai macam kelebihan dan kekurangan dalam proses kendalinya.

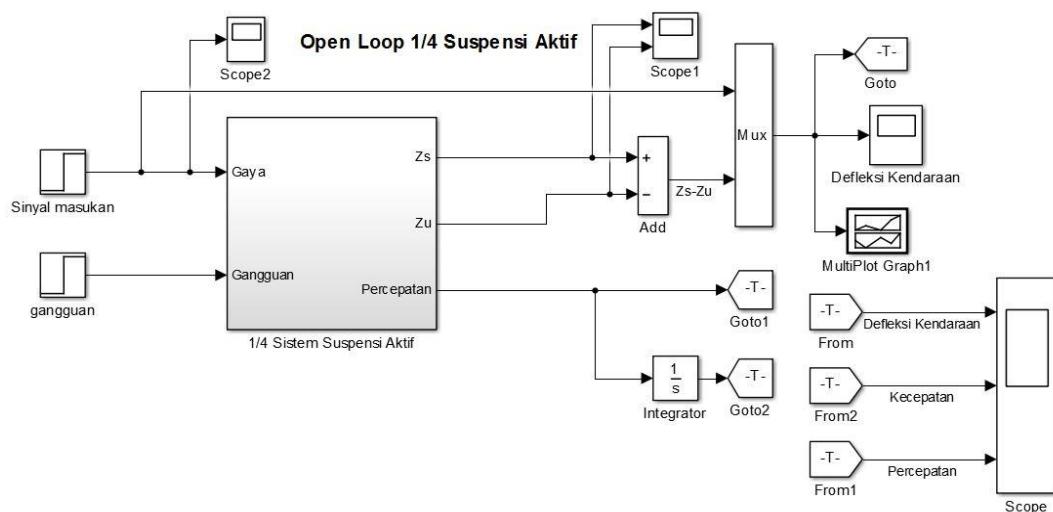
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem suspensi aktif mobil dibangun berdasarkan model matematika yang telah didapatkan dan diimplementasikan dalam Simulink Matlab. Sistem yang telah dibangun tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 8, Gambar 9, Gambar 10, Gambar 11. Berdasarkan kajian pustaka dari beberapa jurnal, maka diperoleh beberapa nilai parameter model yang diperlukan untuk simulasi, antara lain:

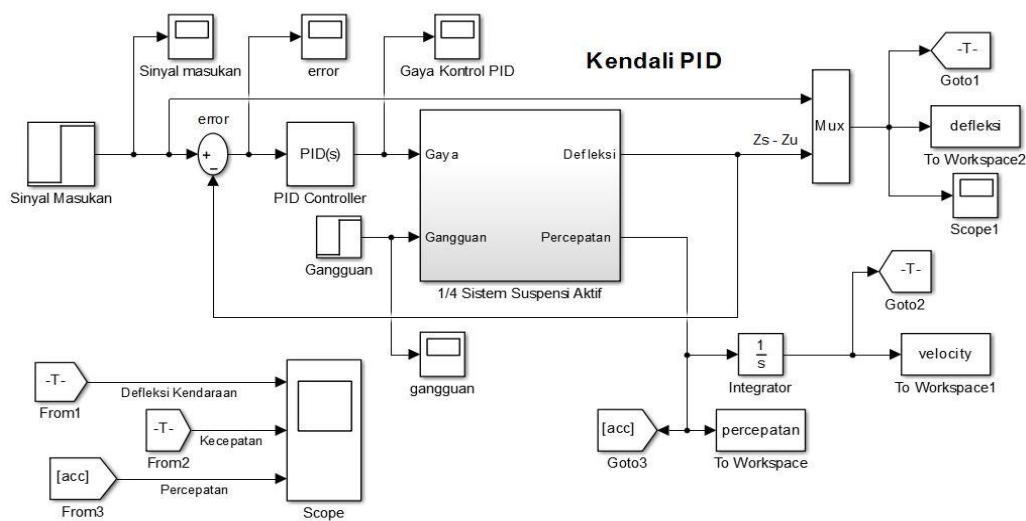
- a. Massa badan kendaraan = 290 Kg
- b. Massa suspensi = 59 Kg
- c. Konstanta pegas dari suspensi = 16812 N/m
- d. Konstanta pegas dari roda = 190000 N/m
- e. Koefisien redaman = 2000 Ns/m



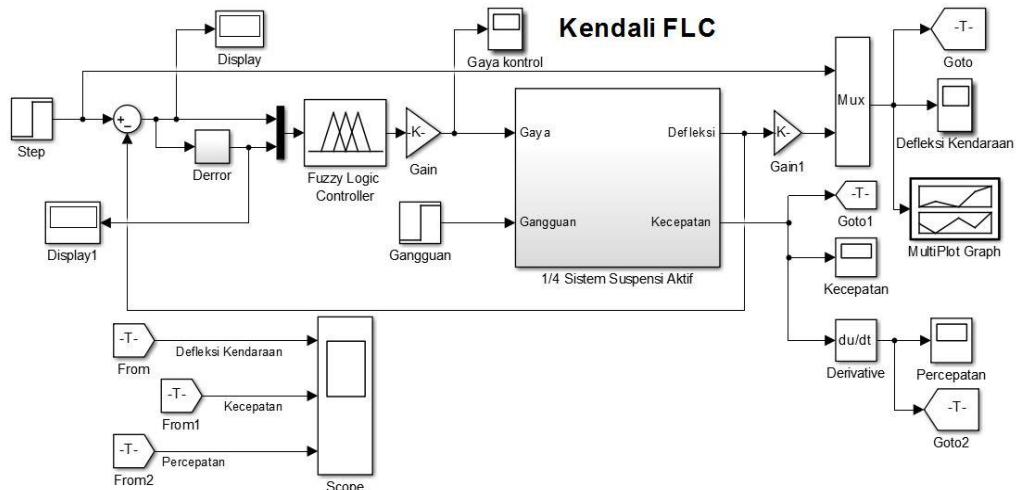
Gambar 8 Sistem Dari Model Persamaan $\frac{1}{4}$ Suspensi aktif



Gambar 9 Sistem $\frac{1}{4}$ Suspensi Aktif Loop Terbuka



Gambar 10 Sistem $\frac{1}{4}$ Suspensi Aktif Dengan Kendali PID

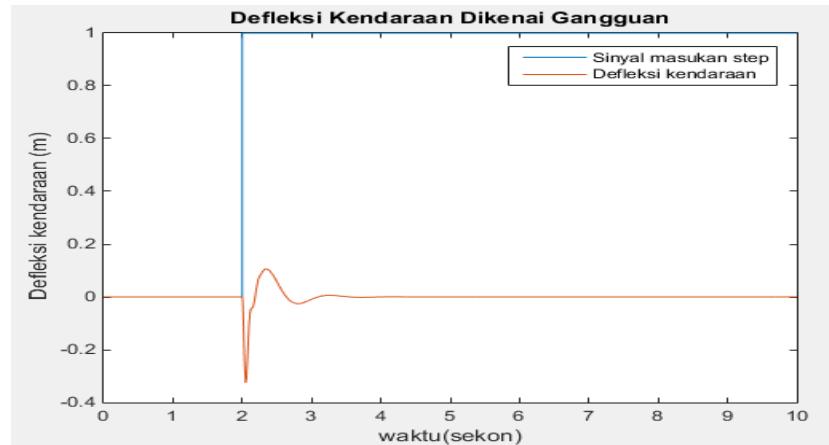


Gambar 11 Sistem $\frac{1}{4}$ Suspensi Aktif Dengan Kendali FLC

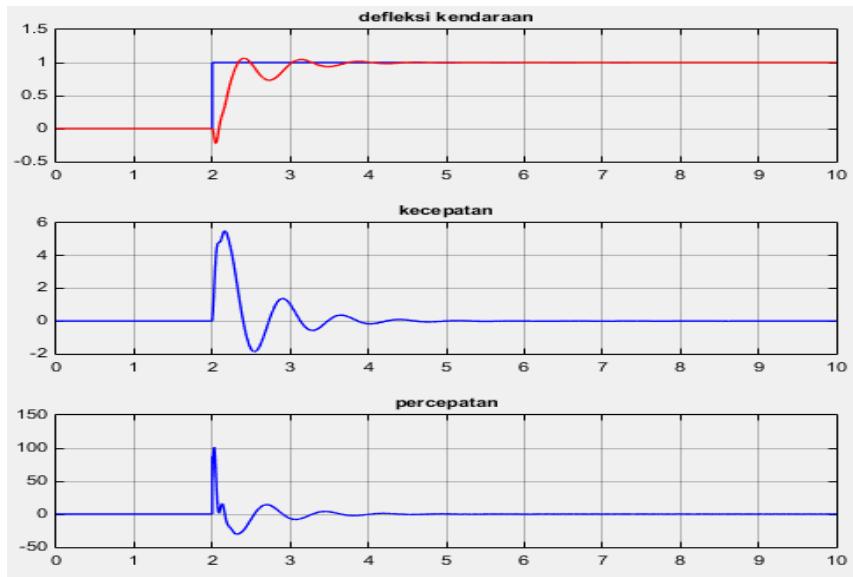
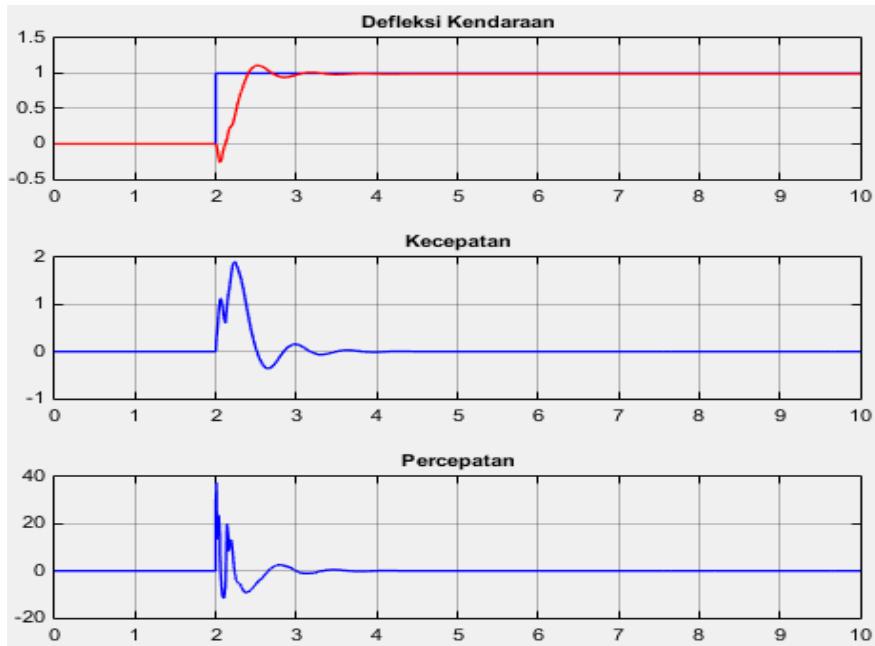
Untuk melihat sistem bekerja dengan baik atau tidak, dapat ditentukan berdasarkan desain kriteria yang telah ditetapkan terlebih dahulu, yaitu: $Overshoot = 2\% - 5\%$, $Rise time = 2$ sekon, $Settling time = 3$ sekon, SSE (*steady state error*) = 0 %. Pengujian PID yang berhasil didapatkan dengan hasil performansi sistem yang sesuai desain kriteria ditunjukkan pada Tabel 3, yaitu:

Tabel 3 Pengujian Sistem Kendali PID

Parameter Kontrol	Nilai Pengujian
P	9558.3589
I	57244.9325
D	22.9008
N	694.6441



Gambar 12 Hasil Pengujian Sistem *Loop Terbuka*

**Gambar 13** Hasil Pengujian Sistem Kendali PID**Gambar 14** Hasil Pengujian Sistem Kendali FLC

Peformansi sistem yang dihasilkan dari simulasi dan pemodelan pada sistem kendali PID dan FLC dengan menggunakan Simulink Matlab ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Peformansi Sistem $\frac{1}{4}$ Suspensi Aktif

Parameter Respon	Peformansi Sistem Kendali PID	Peformansi Sistem Kendali <i>Fuzzy</i>
Rise time	0.304 sekon	0.4 sekon
Settling time	1.7 sekon	1.05 sekon
Overshoot	2.09 %	2.78 %
Peak	1.02	0.51
Closed-loop stability	stabil	stabil

Pembuatan desain dan implementasi model matematika sistem $\frac{1}{4}$ suspensi aktif didalam Simulink matlab telah berhasil dilakukan. Gambar 8 merupakan desain model matematika sistem yang dijadikan subsistem dalam mengetahui keadaan peformansi sistem *loop* terbuka. Sinyal masukan gangguan yang diberikan pada sistem berupa sinyal fungsi undak sebesar 30 cm.

Simulasi yang dilakukan dalam selang waktu 10 sekon dikarenakan dalam penetapan waktu tersebut, respon keluaran sistem dapat terdata dengan baik. Keadaan sistem *loop* terbuka dari model Gambar 9 ditunjukkan pada Gambar 12, respon keluaran tidak sesuai dengan desain kriteria yang telah ditetapkan sebelumnya. Respon keluaran defleksi kendaraan yang dihasilkan belum sesuai dengan masukan yang diberikan. Peformansi *overshoot*, *settling time*, *rise time*, dan SSE (*Steady State Error*) yang dihasilkan pada keadaan *loop* terbuka sangat jauh dari desain yang ditetapkan. Karena sistem belum sesuai, diperlukan sistem kendali untuk memperbaiki kinerja sistem suspensinya.

Analisis pengujian desain sistem $\frac{1}{4}$ suspensi aktif pada mobil dengan dua kendali telah berhasil dilakukan. Permasalahan yang terjadi pada keadaan *loop* terbuka dapat diatasi dengan cepat pada kendali PID. Hasil peformansi sistem yang didapatkan pada kendali PID telah memenuhi desain kriteria yang ditetapkan. Penguatan sistem kendali PID pada Tabel 3 menghasilkan peformansi sistem yaitu *overshoot* 2.09 % dengan *settling time* 1.7 sekon. Hasil respon keluaran kendali PID pada gambar 13 menunjukkan secara bersamaan respon defleksi vertikal kendaraan, kecepatan vertikal kendaraan, dan percepatan vertikal kendaraan. Faktor kenyamanan dianalisis berdasarkan respon percepatan badan kendaraan. Hasil simulasi yang dilakukan dengan kendali PID menunjukkan bahwa sistem yang dirancang bangun dapat ditingkatkan faktor kenyamanannya.

Getaran awal yang terjadi pada respon percepatan badan kendaraan disebabkan karena adanya usaha kontrol yang dilakukan pada defleksi kendaraan untuk meminimalkan nilai *overshoot*. Parameter *peak time* dan *overshoot* pada defleksi vertikal kendaraan secara berurutan yaitu 1.02 sekon dan 2.09 %, sehingga telah sesuai desain yang ditetapkan sebelumnya. Faktor keamanan secara vertikal pada mobil dapat ditingkatkan, yang dapat dianalisis dari respon defleksi kendaraan yang dihasilkan.

Simulasi pengujian pada FLC dilakukan dengan 49 aturan *fuzzy* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Range variabel *fuzzy* gaya yang dikenakan pada sistem yaitu [-100 100] dengan besarnya penguatan (*gain*) sebesar 100 kali, yang ditunjukkan pada Gambar 11. Peformansi sistem yang dihasilkan pada kendali FLC dalam waktu 1.05 sekon telah mengalami kestabilan. Nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot* dan *peak time* pada kendali *fuzzy* yang sesuai Tabel 4 menunjukkan bahwa sistem yang dirancang bangun telah sesuai dengan desain kriteria yang ditetapkan. Faktor keamanan secara vertikal dan faktor kenyamanan juga dapat ditingkatkan dengan baik. Respon percepatan vertikal badan kendaraan pada kendali *fuzzy* mengalami getaran diawal. Getaran yang terjadi disebabkan karena adanya usaha kendali dalam memperbaiki parameter respon *settling time* pada kendali PID, sehingga defleksi kendaraan yang dihasilkan lebih cepat stabil dengan nilai *peak time* yang lebih kecil. Perbandingan peformansi sistem dari hasil simulasi pengujian sistem $\frac{1}{4}$ suspensi mobil dengan kendali PID dan FLC ditunjukkan pada tabel 4. Parameter *settling time* dan *peak time* pada kendali *fuzzy* lebih baik daripada peformansi pada kendali PID. Secara umum, peformansi sistem kendali PID dan kendali *fuzzy* telah memenuhi desain kriteria yang ditetapkan sebelumnya. Sistem yang dirancang bangun dengan kendali *fuzzy* relatif lebih mudah dilakukan dengan hasil peformansi sistem yang memenuhi desain kriteria, sehingga metode FLC lebih baik daripada metode kendali PID.

SIMPULAN

Analisis model $\frac{1}{4}$ suspensi aktif dengan kendali PID dan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) telah berhasil dilakukan. Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil pengujian simulasi, yaitu:

- a. Peformansi sistem $\frac{1}{4}$ suspensi aktif mobil pada kondisi *loop* terbuka, respon keluaran defleksi kendaraan yang dihasilkan belum sesuai dengan masukan yang diberikan. Peformansi *overshoot*, *settling time*, *rise time*, dan SSE (*Steady State Error*) yang dihasilkan pada keadaan *loop* terbuka sangat

- jauh dari desain yang ditetapkan. Karena sistem belum sesuai, diperlukan sistem kendali untuk memperbaiki kinerja sistem suspensinya.
- b. Penguatan kendali PID dilakukan dengan metode PID *tuning* secara berulang kali hingga mendapatkan performansi yang optimal (sesuai dengan desain kriteria). Pemberian penguatan sebesar $K_p = 9558.3589$, $K_i = 57244.9325$, $K_d = 22.9008$ menghasilkan performansi sistem yang optimal yaitu *settling time* = 1.7 sekon, dengan *overshoot* = 2.09%, *peak time* = 1.02, *rise time* = 0.304 sekon. Pengujian dengan metode FLC dilakukan dengan 49 aturan *fuzzy*. Hasil peformansi sistem kendali FLC dengan 49 aturan *fuzzy* yaitu *settling time* = 1.05 sekon, *overshoot* = 2.78%, *peak time* = 0.51, *rise time* = 0.4 sekon.
 - c. Secara umum, Metode FLC lebih mudah dilakukan dengan hasil peformansi sistem yang lebih baik daripada kendali PID. Parameter *settling time* dan *peak time* pada pengujian FLC lebih baik daripada pengujian dengan kendali PID. Hasil peformansi sistem dengan pengujian FLC paling sesuai dengan desain kriteria yang ditetapkan. Faktor keamanan secara vertikal dan kenyamanan pada mobil dapat ditingkatkan dengan metode kendali PID dan FLC.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggoro, A. 2013. Aplikasi Fuzzy Logic Control Pada Sistem Suspensi Semi-Aktif Model Kendaraan Seperempat. *Skripsi*. Semarang: UNDIP.
- Ashraf, E. 2014. Desain a semi-Active Suspension System for a Quarter Vehicle Model using Fuzzy Logic Control (FLC). *International Research Journal of Scientific Findings*, Vol. 1 (2):030-036, May.
- Emir, L. S. 2005. Fuzzy Logic Control Of Vehicle Suspensions With Dry Friction Nonlinearity. *Journal of adhana*, Vol. 30, Part 5: 649–659. India.
- Ebrahimi, N., & Gharaveisi, A. 2012. Optimal Fuzzy Supervisor Controller for an Active Suspension System. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*: 36-39, Vol. 2, September.
- Hany, F. 2013. *Desain PID Controller dengan Software Matlab*. Surabaya: Universitas Kristen Petra.
- Oni, B., Sumardi & Aris, T. 2013. Desain Auto Tuning PID Menggunakan Logika Fuzzy Pada Sistem Suspensi Aktif Tipe Paralel Nonlinear Model Kendaraan Seperempat. *Jurnal Teknik Elektro*, 15(3): 114-120. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Ozgur, D., & Ilknur, K. 2012. Modeling and Control of a Nonlinear Half-Vehicle Suspension System: a Hybrid Fuzzy Logic Approach. *Springer Science+Business Media B.V*, 67: 2139–2151.
- Pfeiffer, F. 2007. Deregrularization of a Smooth System-Example Hydraulics. *Nonlinear Dyn*. 47: 219–233.
- Sakman, L. E., Guclu, R., & Yagiz, N. 2005. Fuzzy logic control of vehicle suspensions with dry friction non-linearity. *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 30(5): 649–659.
- Shehata, A., Metered, H., & Walid A.H. 2015. Vibration Control of Active Vehicle Suspension System Using Fuzzy Logic Controller. *Springer International Publishing Switzerland*. Proceedings of VETOMAC X. UK: University of Manchester.
- Soleymania, M., & Montazeri, M. 2012. Adaptive Fuzzy Controller For Vehicle Active Suspension System Based On Traffic Conditions. *Journal of Scientia Iranica B*, 19(3): 443–453.
- Sumardi, Wahyudi, & Imam, S. 2000. Perancangan Sistem Kontrol Suspensi Semi-Aktif Menggunakan "Fuzzy Logic Control" Pada Model Kendaraan Seperempat. *Laporan Penelitian Proyek Pengkajian Ilmu Pengetahuan Terapan*. Semarang: UNDIP.
- Susatio, Biyanto, & Totok R. 2006. Perancangan Sistem Suspensi Aktif Pada Kendaraan Roda Empat Menggunakan Pengendali Jenis Robust Proporsional, Integral, Derivatif. *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 8(2). Surabaya: ITS.
- Tesna, D. 2012. Perancangan Sistem Suspensi Aktif Nonlinier Tipe Paralel dengan Kendali HYbrid Fuzzy PID Pada Model Kendaraan Seperempat. *Skripsi*. Semarang: UNDIP.
- The MathWorks, Inc. 2014. Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide © COPYRIGHT.
- Wang, L & Tom, K. 2005. VHDL-AMS Based Genetic Optimization of a Fuzzy Logic Controller for Automotive Active Suspension Systems. UK: University of Southampton.

- Wibowo. 2011. Perancangan Karakteristik Sistem Suspensi Semi Aktif Untuk Meningkatkan Kenyamanan Kendaraan. *Jurnal Mekanika*, Vol. 10 No. 1. Surakarta: UNS.
- Yerri, S., & Totok, R. B. 2006. Perancangan Sistem Suspensi Aktif pada Kendaraan Roda Empat Menggunakan Pengendali Jenis Robust Proporsional, Integral dan Derivatif. *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 8, No. 2: 44 – 48. Surabaya: ITS.