

# SIMULASI DAN ANALISIS RESPON FUZZY LOGIC CONTROLLER PADA SISTEM SUSPENSI

Sunarno<sup>1</sup>, Rohmad<sup>2</sup>

(1),(2) Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia

E-mail: narnofisika91@gmail.com

## Abstrak

Respon keluaran sistem suspensi mekanik pada loop terbuka kadang menghasilkan osilasi yang berlebihan. Keadaan itu akan menghasilkan ketidakstabilan sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu perlu dirancang suatu sistem kendali yang memungkinkan tercapainya desain kriteria yang telah direncanakan. Sistem kendali yang relatif baik dalam menghasilkan respon keluaran adalah sistem kendali berbasis logika *Fuzzy*. Kendali *Fuzzy* ini dibuat menggunakan simulink Matlab dengan FIS (*Fuzzy Inference System*) sebagai intinya. FIS ini dibangun menggunakan *Fuzzy Logic Toolbox* Matlab. Hasil pengujian pada FLC dengan tiga variasi aturan *fuzzy* yaitu 7 aturan, 25 aturan, dan 49 aturan menunjukkan performansi sistem yang berbeda. Unjuk kerja yang paling optimal dan sesuai dengan desain kriterianya adalah pada jumlah aturan *Fuzzy* yang terbanyak yaitu 49 aturan. Adapun karakteristik respon keluarannya yaitu *settling time* = 1.05 sekon, *overshoot* = 2.78%, *peak time* = 0.51, *rise time* = 0.4 sekon serta *No steady State Error*.

**Kata Kunci:** Logika *fuzzy*, *Simulink matlab*, Suspensi

## PENDAHULUAN

Sistem kontrol otomatis telah banyak digunakan diberbagai bidang kehidupan. Mulai dari produk industri sampai rumah tangga. Berkembangnya teknologi instrumentasi dan komputasi, berdampak pada perkembangan teknologi kendali (*control*) mulai dari sistem kendali konvensional (PID) sampai sistem kendali yang modern (*optimal, robust, fuzzy*).

Sistem *Fuzzy Logic Controller (FLC)* merupakan sebuah teknik baru dalam dunia kontrol. Secara umum, sistem kendali *fuzzy* berbasis pada aturan *Fuzzy (rule based Fuzzy)*. 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 mekanik (suspensi mobil) dalam lingkaran (loop) terbuka akan menghasilkan osilasi

yang berlebihan. Osilasi ini menyebabkan sistem menjadi tidak stabil. Jika osilasi ini 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 performansi 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 performansi 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.

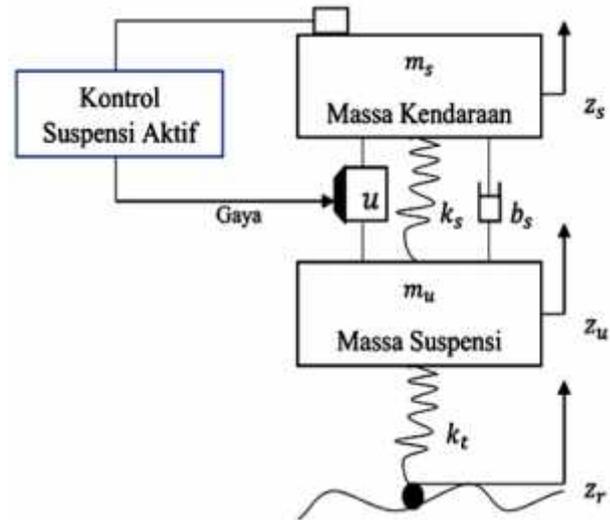
Optimalisasi karakteristik performansi sistem merupakan suatu langkah yang tepat dalam mengatasi masalah gaya kontrol yang berlebih. Kendali ini penting agar sistem berjalan sesuai kriteria desain ideal instrumen dan dalam menghemat biaya yang harus dikeluarkan untuk perawatan serta perbaikan sistem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

Simulasi *sistem kendali Fuzzy* pada suspensi aktif dibuat 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 rodadan ban
- $(b_s)$  = Konstantaredaman 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  $m_s$ ,

$$\sum F = m a$$

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

$$\dot{Z}_s' = \frac{-k_2(Z_s - Z_u) - b_s(Z_s - Z_u) + u}{m_s}$$

1

Untuk  $m_u$ ,

$$\sum F = m a$$

$$k_t(Z_u - Z_r) + b_s(Z_s - Z_u) + k_2(Z_s - Z_u) - u = m_u \ddot{Z}_u$$

$$\ddot{Z}_u = \frac{-k_t(Z_u - Z_r) + b_s(Z_s - Z_u) + k_2(Z_s - Z_u) - u}{m_u}$$

2

dengan

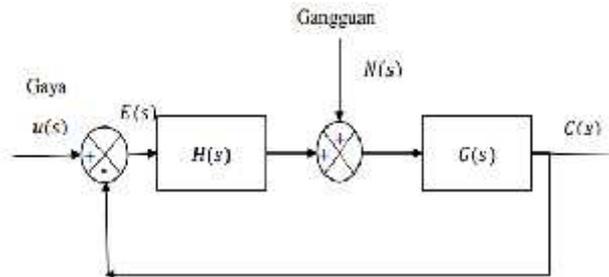
$Z_s - Z_u$  = Defleksi suspensi

$\dot{Z}_s$  = Kecepatan badan kendaraan

$\ddot{Z}_s$  = Percepatan badan kendaraan

$Z_u - Z_r$  = Defleksi roda

$\dot{Z}_u$  = Kecepatan roda



**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  $C(s)$ .

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 inferensi (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 perubahan himpunan fuzzy ke sinyal yang bersifat bukan fuzzy. Ada dua metode yang paling banyak digunakan dalam sistem *fuzzy* dan proses kendali, yaitu:

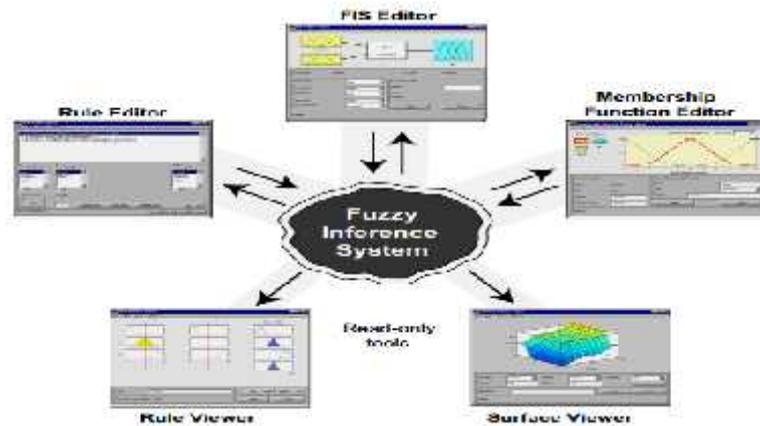
1) Metode pusat bidang (*Center of Area Method*, COA atau Centroid (Matlab)), COA merupakan metode defuzzifikasi dengan memperhitungkan pusat titik berat dari seluruh kemungkinan distribusi aksi kendali.

2) Metode maksimum rata-rata (*Mean of Maximum Method*, MOM), MOM adalah metode defuzzifikasi 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.

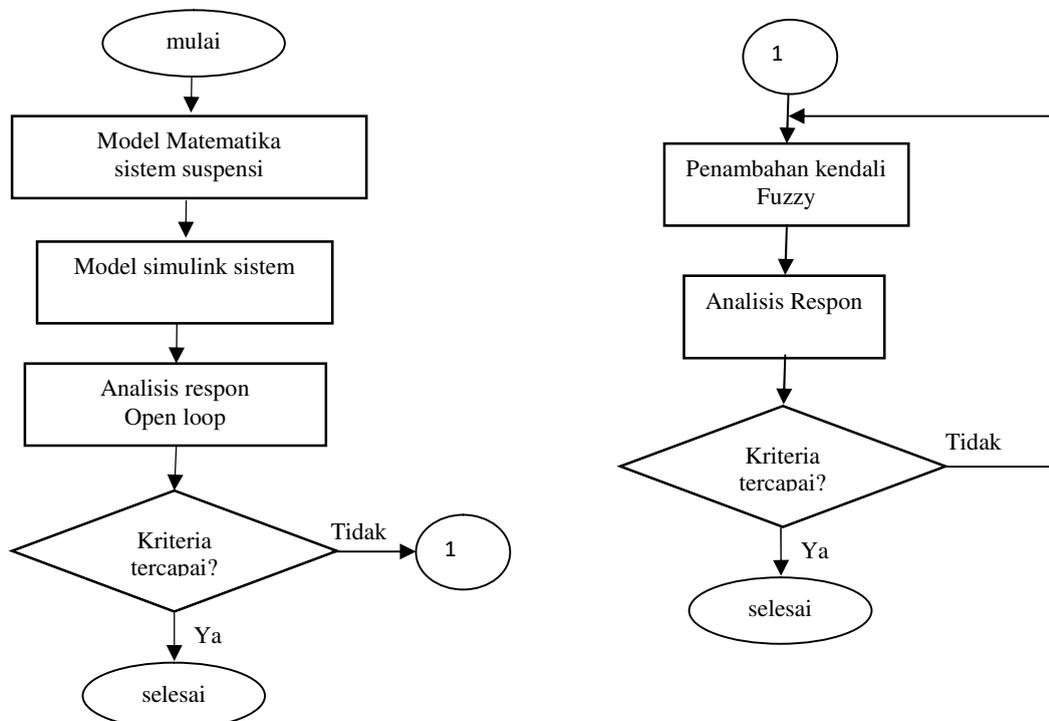
Sistem kendali fuzzy dalam Matlab dibangun menggunakan FIS (*Fuzzy Inference System*). FIS berisi tentang FIS editor, membership function, rule Editor, dengan hasil kendali ditampilkan dalam surface viewer dan rule viewer. Sistem FIS dapat ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3 FIS (Mathwork, 2014)

### METODE PENELITIAN

Diagram alir penelitian ditunjukkan pada gambar 4, yaitu:



Gambar 4 Diagram Alir Penelitian

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

- Tahap persiapan yang terdiri dari pembuatan model matematika sistem hingga penentuan peformansi sistem untuk keadaan loop terbuka.
- 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

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, 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.

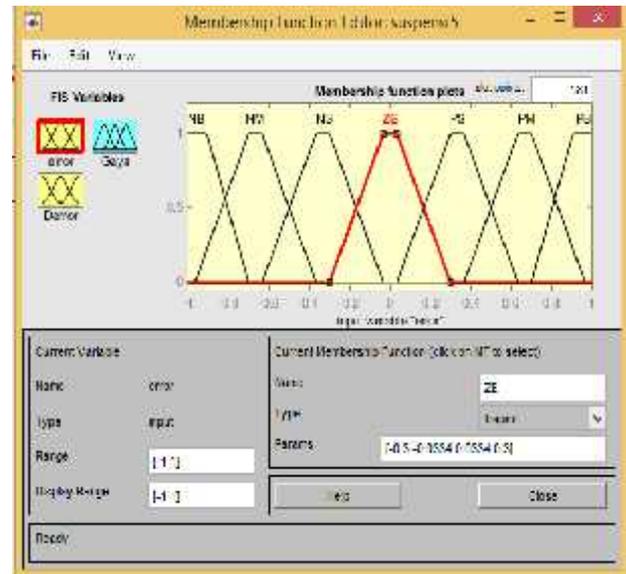
**Tabel 1** Variabel *Fuzzy* Sistem ¼ Suspensi aktif

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

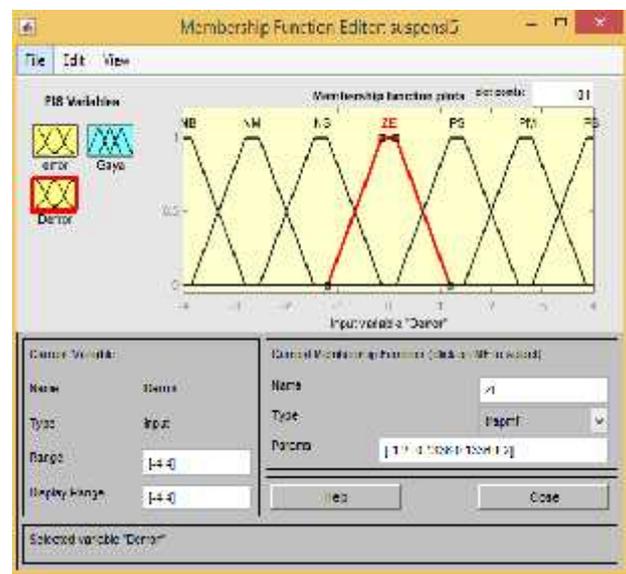
Metode defuzifikasi yang digunakan adalah metode *COA* (metode pusat bidang). Penentuan jumlah maksimal aturan *fuzzy* berdasarkan pada jumlah himpunan *fuzzy* untuk masing-masing input. Input himpunan *fuzzy* dari kedua variabel *fuzzy* yang digunakan yaitu ada 7 buah, sehingga aturan *fuzzy* maksimal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

Penentuan himpunan *fuzzy* serta fungsi keanggotaan *fuzzy* bersifat bebas. Pengujian yang dilakukan menggunakan kurva trapezoidal

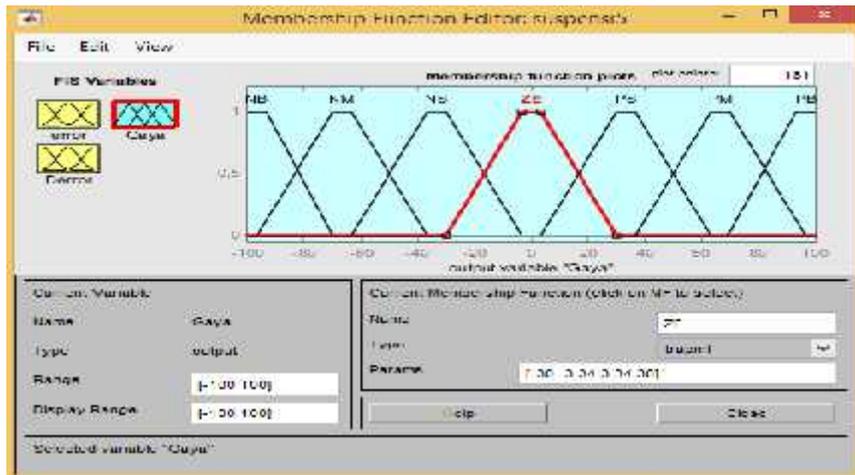
dengan input *Error* yaitu [-1 1] dan input *dError* yaitu [-4 4]. Penentuan range kendali *fuzzy* berpengaruh terhadap hasil peformansi sistem. Himpunan *fuzzy* input *Error* ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan himpunan *fuzzy* input *dError* dan output gaya secara berurutan ditunjukkan pada Gambar 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 ¼ 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 Vertikal Kendaraan $de(Z_s - Z_u)$	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

c. Tahap ketiga, melakukan analisis hasil performansi sistem ¼ suspensi aktif menggunakan kendali PID dan FLC. Hasil analisis kendali PID ditampilkan dalam data penguatan terhadap performansi 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 performansi sistem kontrol yang diberikan.

d. Tahap keempat, membandingkan hasil performansi sistem dari kedua metode kendali yang diamati dari keluaran

performansi sistem yang dihasilkan sehingga dapat memberikan informasi mengenai kendali yang baik dan memenuhi desain

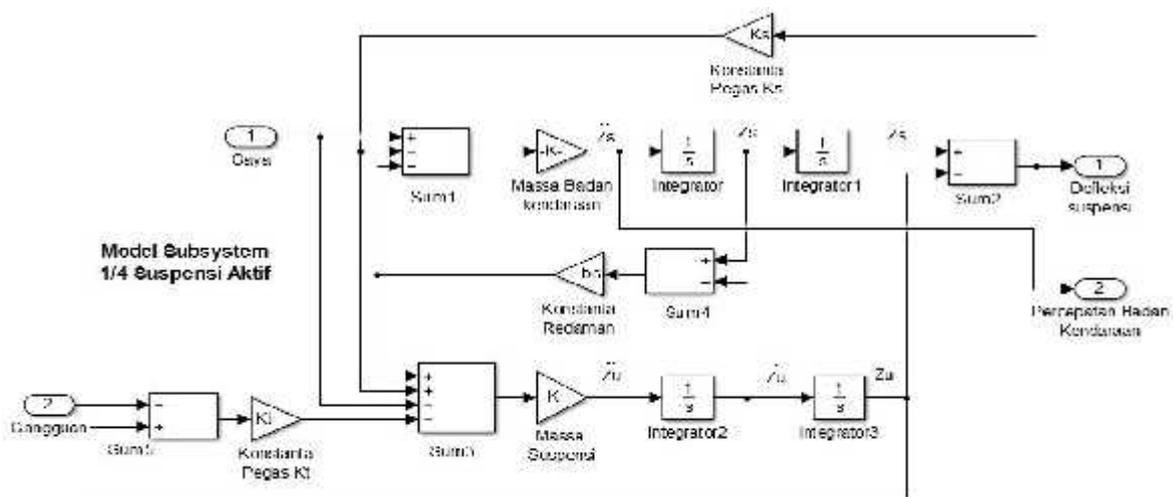
kriteria dengan berbagai macam kelebihan dan kekurangan dalam proses kendalinya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

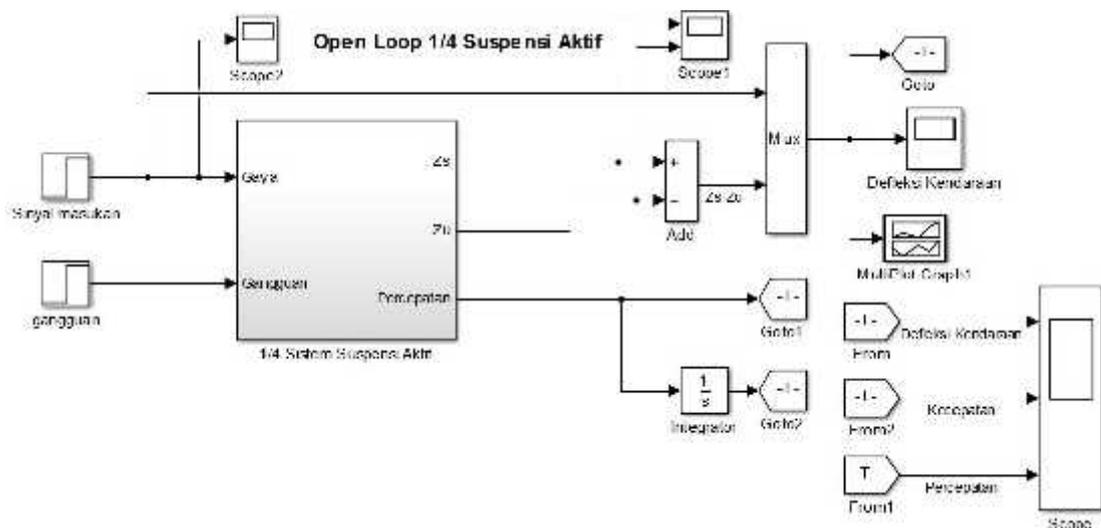
Sistem suspensi aktif mobil dibangun berdasarkan model matematika yang telah didapatkan dan diimplementasikan dalam Simulink Matlab. Sistem yang telah dibangun tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 8, Gambar 9, Gambar 10, Gambar 11. Berdasarkan kajian pustaka dari beberapa jurnal, antara lain : Ibrahim (2012), Ashraf (2014) dan Shehameta

(2015) diperoleh beberapa nilai parameter model yang diperlukan untuk simulasi, antara lain:

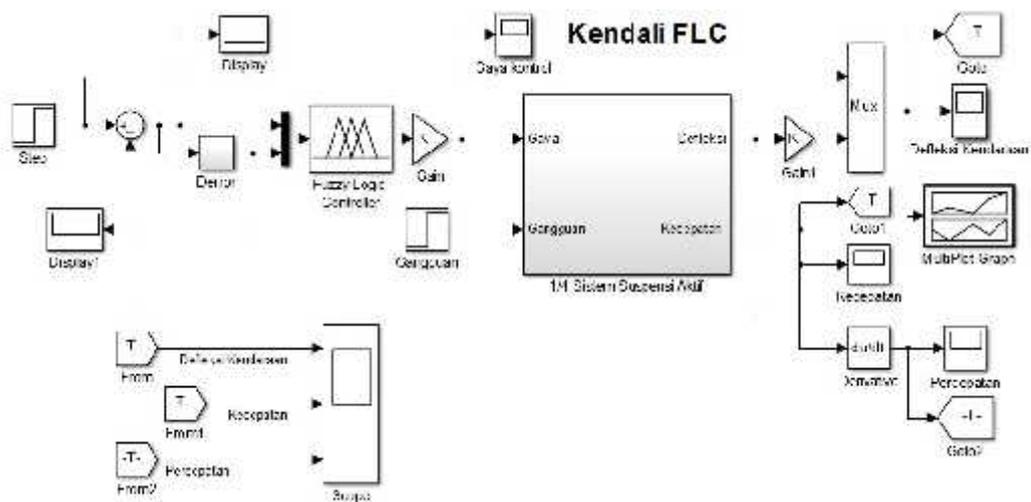
- Massa badan kendaraan = 290 Kg
- Massa suspensi = 59 Kg
- Konstanta pegas dari suspensi = 16812 N/m
- Konstanta pegas dari roda = 190000 N/m
- Koefisien redaman = 2000 Ns/m



Gambar 8 Sistem Dari Model Persamaan 1/4 Suspensi aktif



Gambar 9 Sistem 1/4 Suspensi Aktif Loop Terbuka

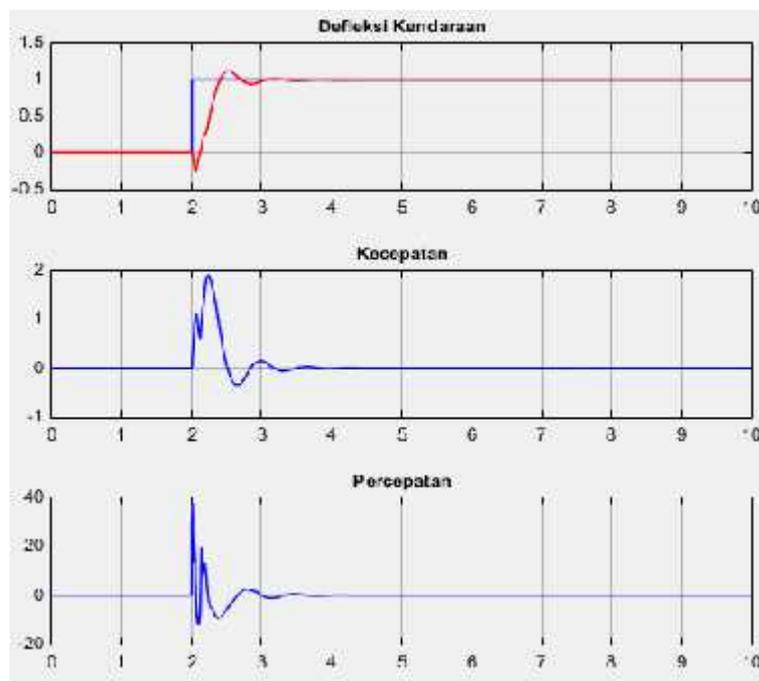


**Gambar 10** Sistem ¼ Suspensi Aktif Dengan Kendali FLC

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 sekond, *Settling time* = 3 sekond, *SSE (steady state error)* = 0 %.

Simulasi sistem kendali Fuzzy dari suspensi aktif dapat diperlihatkan dalam Gambar 11.

Pengujian dilakukan dengan memberikan masukan fungsi Undak satuan (*Step Function Unit*). Tiga besaran yang ditampilkan dalam grafik Gambar 11 adalah Defleksi, kecepatan dan percepatan osilasi sistem suspensi mekanik.



**Gambar 11** Hasil Pengujian Sistem Kendali FLC

Peformansi sistem yang dihasilkan dari simulasi sistem kendali Fuzzy dapat ditunjukkan

pada Tabel 4. Karakteristik performansi sistem yang dilihat dari hasil simulasi tersebut adalah

lewatan maksimum (*Maximum Overshoot*), waktu naik (*rise time*), waktu puncak (*peak time*) waktu tunak (*settling time*), dan kesalahan keadaan tunak (*steady state error*).

**Tabel 4** Peformansi Sistem Kendali fuzzy

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

Pembuatan model matematika sistem ¼ suspensi aktif dengan Simulink matlab telah berhasil dilakukan seperti yang terlihat pada Gambar 8. Model simulink ini kemudian dibuat dalam sub sistemnya untuk mengefisienkan pembuatan model keseluruhan

Simulasi yang dilakukan dalam selang waktu 10 sekon dikarenakan dalam penetapan waktu tersebut, respon keluaran sistem dapat terdata dengan baik. Respon keluaran sistem *loop* terbuka menunjukkan ketidak sesuaian dengan desain kriteria yang telah ditetapkan sebelumnya, baik untuk *overshoot*, *settling time*, *rise time*, dan SSE (*Steady State Error*) yang dihasilkan sangat jauh dari desain yang ditetapkan. Karena sistem belum sesuai, diperlukan sistem kendali untuk memperbaiki kinerja sistem suspensinya.

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 ¼ 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.

## PENUTUP

Analisis model ¼ suspensi aktif dengan kendali PID dan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) telah berhasil dilakukan. Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil pengujian simulasi, yaitu:

- Peformansi sistem ¼ 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.
- Penguatan kendali PID dilakukan dengan metode PID *tuning* secara berulang kali hingga mendapatkan peformansi yang optimal (sesuai dengan desain kriteria). Pemberian penguatan sebesar  $K_p =$

9558.3589,  $K_1=57244.9325$ ,  $K_d = 22.9008$  menghasilkan peformansi 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 aturanfuzzy. 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.
- 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.
- 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.
- Ozgun, 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. Deregularization 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.
- 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.