

Perancangan Kontrol Fuzzy Adaptif Pada Sistem Kontrol Kecepatan Stasioner Mesin Bensin

Muhammad Fajri Nur Reimansyah, Aris Triwiyatno¹, dan Budi Setiyono²

Abstract—Idle speed control has been a classical problem in automotive control. The problem of idle speed control is to maintain the engine speed at a predetermined value (set-point) in the presence of various external torque such as air conditioner or power steering usage. Good idle speed control not only can reduce fuel consumption and emissions but also improve combustion stability. This study was conducted by simulating gasoline engine performance with various changes in external torque parameter using computational software. Control of idle speed with various changes in external torque was done using fuzzy control with adaptive mechanism on its parameters. System testing was done by providing an external torque changes using various step signals and random signal. The test results show that controlling system with adaptive fuzzy is able to keep idle speed at a predetermined value. Testing the system with adaptive fuzzy control produces smaller IAE value (59.19) than the fuzzy control without adaptation process (62.41).

Intisari— Kontrol kecepatan stasioner sudah sejak lama menjadi permasalahan yang banyak dibahas dalam kontrol otomotif. Pada kontrol kecepatan stasioner, permasalahan utama yang dibahas adalah menjaga kecepatan mesin agar tetap pada set-point dihadapkan dengan gangguan torsi eksternal yang dapat terjadi karena penggunaan AC (air conditioner), penyalan unit elektronik, atau torsi yang dihasilkan oleh penggunaan power steering. Pengendalian kecepatan stasioner yang baik tidak hanya dapat mengurangi pemakaian bahan bakar dan emisi tetapi juga dapat meningkatkan kestabilan proses pembakaran. Penelitian dilakukan dengan mensimulasikan kinerja mesin bensin terhadap perubahan throttle dan torsi eksternal dengan perangkat lunak komputasi. Pengendalian kecepatan stasioner terhadap perubahan torsi eksternal dilakukan menggunakan kontrol fuzzy dengan parameter yang bersifat adaptif. Pengujian sistem dilakukan dengan memberikan perubahan torsi eksternal menggunakan sinyal anak tangga yang bervariasi dan sinyal random. Hasil pengujian menunjukkan pengendalian menggunakan kontrol fuzzy adaptif mampu menjaga kecepatan stasioner tetap pada referensi sebesar 954,9 rpm. Pengujian sistem dengan kontrol fuzzy adaptif menghasilkan nilai IAE yang lebih kecil (59,19) daripada sistem dengan kontrol fuzzy saja (62,41).

Kata kunci: Mesin bensin, kecepatan stasioner, fuzzy adaptif

I. PENDAHULUAN

Kontrol kecepatan stasioner sudah sejak lama menjadi permasalahan yang dibahas dalam kontrol otomotif. Pada mulanya kontrol kecepatan stasioner digunakan untuk mesin uap^[1]. Namun, sekarang kontrol kecepatan stasioner sudah banyak digunakan pada kendaraan-kendaraan di jalan. Pada kontrol kecepatan stasioner, permasalahan utama yang dibahas adalah menjaga kecepatan mesin agar tetap pada set-

point dihadapkan dengan gangguan torsi eksternal dapat terjadi karena penggunaan AC (air conditioner), penyalan unit elektronik, atau torsi yang dihasilkan oleh penggunaan power steering^[1]. Pengendalian kecepatan stasioner yang baik tidak hanya dapat mengurangi pemakaian bahan bakar dan emisi tetapi juga dapat meningkatkan kestabilan proses pembakaran^[2]. Mengatur kecepatan stasioner dapat dilakukan dengan mengatur waktu pengapian, injeksi bahan bakar, dan bukaan throttle sekunder. Penelitian ini menggunakan throttle sekunder sebagai variabel untuk mempertahankan kecepatan stasioner agar tetap dalam batas yang seharusnya.

Banyak penelitian yang telah dilakukan dalam pengaturan kecepatan stasioner dengan menggunakan berbagai macam metode kontrol. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mempertahankan kecepatan stasioner dari gangguan berupa torsi eksternal. Yildiz dkk^[1] melakukan pengendalian kecepatan stasioner menggunakan APC (Adaptive Posicast Controller). Feng-Chi Hsieh dkk^[2] menggunakan metode kontrol adaptif STR (Self Tuning Regulator) dengan rumus PID untuk mengatur kecepatan stasioner pada mesin bensin 1200 cc. P. Yildiray, Luigi Glielmo dkk^[3] menggunakan metode kontrol optimal untuk mengontrol kecepatan stasioner mesin bensin. M. Luqman Hakim dkk^[4] merancang kontrol PID untuk mengatur waktu injeksi dan waktu pengapian saat kecepatan stasioner pada Spark Ignition Engine. Ali Majeed Mahmood^[5] menggunakan NCD (Nonlinear Control Design) untuk mengatur parameter kontrol PID yang digunakan untuk mengatur kecepatan stasioner Spark Ignition Engine. Rudolf Kruse dkk^[6] menggunakan kontrol fuzzy mamdani untuk mengatur kecepatan stasioner mesin. Beberapa metode kontrol tersebut memiliki kelemahan tidak mampu mengontrol sistem dengan tanggapan yang nonlinier terhadap gangguan, maka dari itu diperlukan kontrol dengan kinerja yang baik untuk sistem yang nonlinier.

Logika fuzzy Takagi-Sugeno (TS) memiliki kinerja yang baik untuk mengontrol sistem nonlinier^[7] maka metode logika fuzzy TS dipilih dalam proses pengendalian penelitian karena model dari sistem engine bersifat nonlinier. Kinerja logika fuzzy dapat ditingkatkan dengan mengadaptasikan parameter-parameternya terhadap perubahan yang terjadi pada sistem maka untuk meningkatkan kinerja sistem kontrol dalam penelitian ini menggunakan logika fuzzy TS yang bersifat adaptif.

Penelitian ini dilakukan dengan mensimulasikan pengendalian kecepatan stasioner pada model mesin bensin menggunakan metode kontrol fuzzy yang bersifat adaptif.

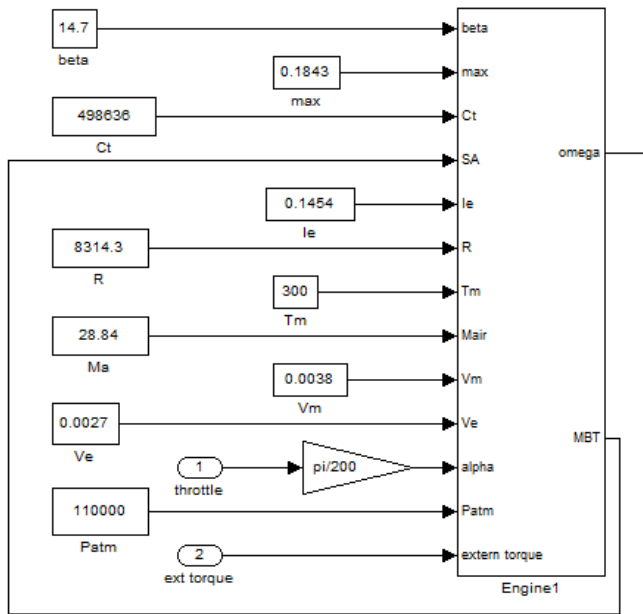
II. METODE

A. Model mesin bensin

Model mesin bensin menggunakan model mesin bensin empat langkah yang dilakukan oleh Polonskii^[8]. Model

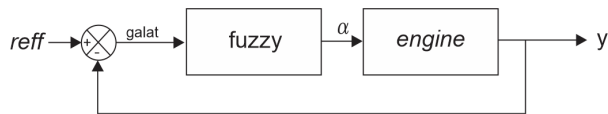
^{1 2, 3} Dosen Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Jl. Prof. Sudarto Tembalang 50275 Semarang (telp: (024) 7460057); e-mail: fajri.muhammad@gmail.com)

mesin bensin memiliki satu keluaran berupa kecepatan mesin (rpm) dan satu variabel kontrol yaitu bukaan *throttle*. Blok model mesin bensin ditunjukkan pada Gbr. 1.



Gbr. 1 Model mesin bensin

Pengendalian kecepatan stasioner dilakukan dengan merancang umpan balik sistem seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 2.



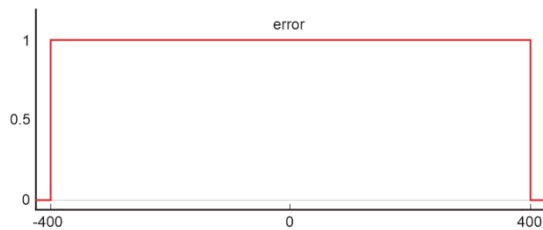
Gbr. 2 Umpan balik sistem

Kecepatan stasioner sesuai dengan model mesin yang dilakukan oleh Polonskii sebesar 954,9 rpm digunakan sebagai referensi.

B. Mekanisme kontrol

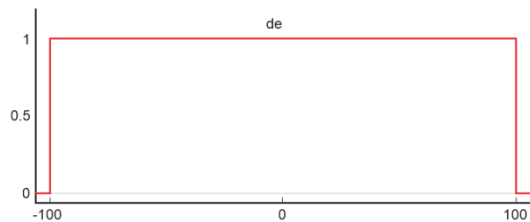
1) *Kontrol Fuzzy*: Kontrol fuzzy menggunakan fuzzy tipe sugeno karena memiliki kelebihan dalam mengendalikan sistem yang nonlinier. Masukan fuzzy dirancang berupa galat, perubahan galat, dan torsi eksternal. Masukan galat (error) ditunjukkan oleh Persamaan 2.1 dan Gbr. 3. Masukan perubahan galat ditunjukkan oleh Persamaan 2.2 dan Gbr. 4.

$$error = \begin{cases} 1, & \text{if } -400 \leq x \leq 400 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.1)$$



Gbr. 3 Fungsi keanggotaan masukan galat (error)

$$de = \begin{cases} 1, & \text{if } -100 \leq x \leq 100 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.2)$$

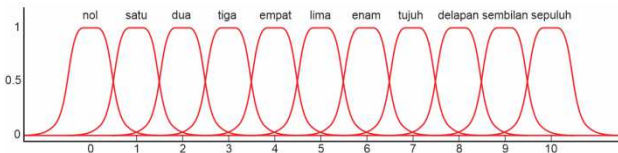


Gbr. 4 Fungsi keanggotaan masukan perubahan galat

Masukan torsi eksternal menggunakan fungsi keanggotaan bentuk lonceng sebanyak sebelas buah. Nilai parameter penyusun fungsi keanggotaan bentuk lonceng ditunjukkan pada Tabel I dengan hasil yang ditunjukkan pada Gbr. 5.

TABEL I
NILAI PARAMETER PENYUSUN FUNGSI KEANGGOTAAN MASUKAN TORSI BENTUK LONCENG.

Fungsi Keanggotaan	Parameter		
	a	b	c
Nol	0.5	2.5	0
Satu	0.5	2.5	1
Dua	0.5	2.5	2
Tiga	0.5	2.5	3
Empat	0.5	2.5	4
Lima	0.5	2.5	5
Enam	0.5	2.5	6
Tujuh	0.5	2.5	7
Delapan	0.5	2.5	8
Sembilan	0.5	2.5	9
Sepuluh	0.5	2.5	10



Gbr. 5 Fungsi keanggotaan masukan torsi.

Keluaran fuzzy sugeno berupa sebelas persamaan dengan parameter yang ditala dengan metode *trial and error*. Hasil penalaan parameter menghasilkan Persamaan 2.3 hingga 2.13.

$$f_1 = 0x_1 + 0,001x_2 + 0x_3 \quad (2.3)$$

$$f_2 = 0,01x_1 + 0,001x_2 + 0x_3 + 0,2591 \quad (2.4)$$

$$f_3 = 0,01x_1 + 0,0014x_2 + 0x_3 + 0,5137 \quad (2.5)$$

$$f_4 = 0,01x_1 + 0,002x_2 + 0x_3 + 0,76 \quad (2.6)$$

$$f_5 = 0,011x_1 + 0,001x_2 + 0x_3 + 1,007 \quad (2.7)$$

$$f_6 = 0,011x_1 + 0,001x_2 + 0x_3 + 1,245 \quad (2.8)$$

$$f_7 = 0,011x_1 + 0,001x_2 + 0x_3 + 1,48 \quad (2.9)$$

$$f_8 = 0,011x_1 + 0,001x_2 + 0x_3 + 1,72 \quad (2.10)$$

$$f_9 = 0,011x_1 + 0,001x_2 + 0x_3 + 1,95 \quad (2.11)$$

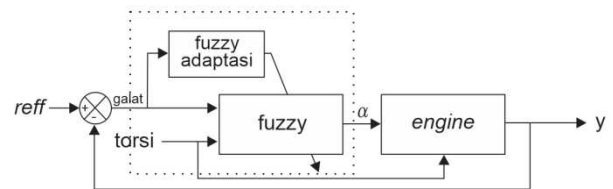
$$f_{10} = 0,011x_1 + 0,001x_2 + 0x_3 + 2,181 \quad (2.12)$$

$$f_{11} = 0,011x_1 + 0,001x_2 + 0x_3 + 2,4 \quad (2.13)$$

Basis aturan pada penelitian ini berjumlah sebelas yang memasangkan masing-masing himpunan keanggotaan masukan torsi dengan masing-masing himpunan keanggotaan keluaran. Basis aturan yang digunakan:

- aturan I : jika *error* = 1 dan *de* = 1 dan torsi = nol maka *throttle* = nol
- aturan II : jika *error* = 1 dan *de* = 1 dan torsi = satu maka *throttle* = satu
- aturan III : jika *error* = 1 dan *de* = 1 dan torsi = dua maka *throttle* = dua
- aturan IV : jika *error* = 1 dan *de* = 1 dan torsi = tiga maka *throttle* = tiga
- aturan V : jika *error* = 1 dan *de* = 1 dan torsi = empat maka *throttle* = empat
- aturan VI : jika *error* = 1 dan *de* = 1 dan torsi = lima maka *throttle* = lima
- aturan VII : jika *error* = 1 dan *de* = 1 dan torsi = enam maka *throttle* = enam
- aturan VIII : jika *error* = 1 dan *de* = 1 dan torsi = tujuh maka *throttle* = tujuh
- aturan IX : jika *error* = 1 dan *de* = 1 dan torsi = delapan maka *throttle* = delapan
- aturan X : jika *error* = 1 dan *de* = 1 dan torsi = sembilan maka *throttle* = sembilan
- aturan XI : jika *error* = 1 dan *de* = 1 dan torsi = sepuluh maka *throttle* = sepuluh

2) *Mekanisme adaptasi*: Kinerja kontrol fuzzy ditingkatkan dengan melakukan adaptasi pada parameternya. Adaptasi dilakukan dengan menggeser pusat masing-masing fungsi keanggotaan masukan fuzzy berdasarkan besarnya galat dan selisih galat keluaran sistem terhadap referensi. Pergeseran dilakukan menggunakan logika fuzzy tipe sugeno. Sistem dengan mekanisme adaptasi (fuzzy adaptasi) ditunjukkan pada Gbr. 6.

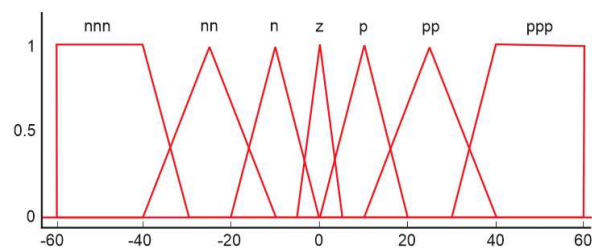


Gbr. 6 Fuzzy adaptasi pada sistem

Fuzzy adaptasi memiliki masukan berupa galat (*error*) dan selisih galat (*derror*) serta keluaran berupa konstanta. Keluaran fuzzy adaptasi berupa nilai dengan besaran yang sudah ditentukan guna melakukan pergeseran fungsi keanggotaan masukan pada fuzzy utama. Fungsi keanggotaan masukan *error* beserta parameter pembentuknya ditunjukkan pada Tabel II dan Gbr. 8. Fungsi keanggotaan *derror* ditunjukkan pada Tabel III dan Gbr. 7.

TABEL II
FUNGSI KEANGGOTAAN ERROR

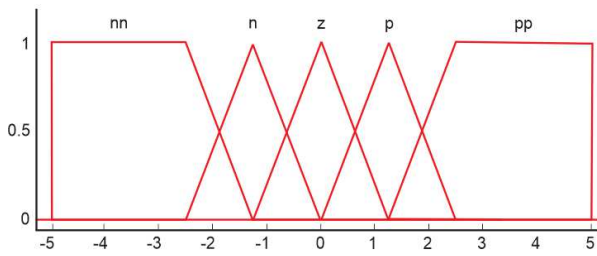
Range Fuzzy	Parameter				Kategori
	a	b	c	d	
-60 s.d. -30	-60	-60	-40	-30	nnn
-40 s.d. -10	-40	-25	-10	-	nn
-20 s.d. 0	-20	-10	0	-	n
-5 s.d. 5	-5	0	5	-	z
0 s.d. 20	0	10	20	-	p
10 s.d. 40	10	25	40	-	pp
30 s.d. 60	30	40	60	60	ppp



Gbr. 7 Fungsi keanggotaan masukan error

TABEL III
FUNGSI KEANGGOTAAN ERROR

Range Fuzzy	Parameter				Kat
	a	b	c	d	
-5 s.d. -1,25	-5	-5	-2,5	-1,25	nn
-2,5 s.d. 0	-2,5	-1,25	0	-	n
-1,25 s.d. 1,25	-1,25	0	1,25	-	z
0 s.d. 2,5	0	1,25	2,5	-	p
1,25 s.d. 5	1,25	2,5	5	5	pp



Gbr. 8 Fungsi keanggotaan masukan *derror*

Fungsi keanggotaan keluaran fuzzy adaptasi berupa konstanta sebagai berikut:

- keluaran nnn = - 4
- keluaran nn = - 1,5
- keluaran n = - 0,25
- keluaran z = 0
- keluaran p = 0,25
- keluaran pp = 1,5
- keluaran ppp = 4

Basis aturan pada fuzzy adaptasi tampak pada Tabel IV.

TABEL IV
BASIS ATURAN PERGESERAN PARAMETER FUZZY KONTROL

		selisih galat (<i>derror</i>)				
		nn	n	z	p	pp
galat	nnn	nnn	nnn	nnn	nnn	nnn
	nn	nnn	nnn	nn	nnn	nnn
	n	nn	nn	n	nn	nn
	z	n	z	z	z	p
	p	pp	pp	p	pp	pp
	pp	ppp	ppp	pp	ppp	ppp
	ppp	ppp	ppp	ppp	ppp	ppp

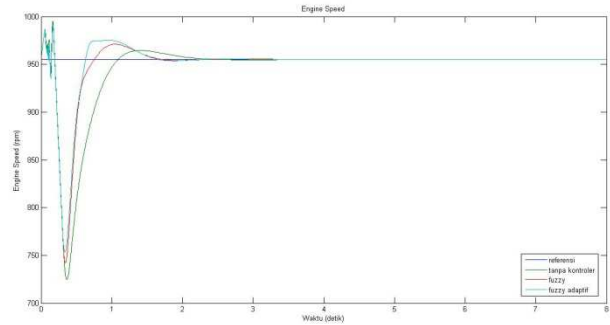
Nilai keluaran fuzzy adaptasi digunakan untuk melakukan penggeseran parameter fungsi keanggotaan masukan torsi pada fuzzy utama. Pergeseran dalam penelitian ini adalah penggeseran pusat (parameter C) masing-masing keanggotaan masukan torsi.

III. HASIL DAN ANALISA

Pengujian dilakukan dengan mengubah sinyal masukan torsi eksternal yang menggambarkan kondisi torsi eksternal yang tidak stabil. Nilai perubahan torsi eksternal adalah dari 0 (tanpa penambahan torsi) hingga 10 (mendapat penambahan torsi). Pada grafik tersaji garis biru tua sebagai referensi *idle speed* sebesar 954,9 rpm, garis hijau adalah respons sistem tanpa dikontrol, garis merah adalah respons sistem setelah dikontrol menggunakan kontrol fuzzy, dan garis biru muda adalah respons sistem setelah dikontrol menggunakan kontrol fuzzy adaptif.

A. Respons Sistem Tanpa Penambahan Torsi Eksternal.

Pengujian respons sistem tanpa penambahan torsi eksternal memiliki nilai torsi eksternal sebesar 0 (nol). Respons sistem yang dihasilkan tampak pada Gbr. 9.

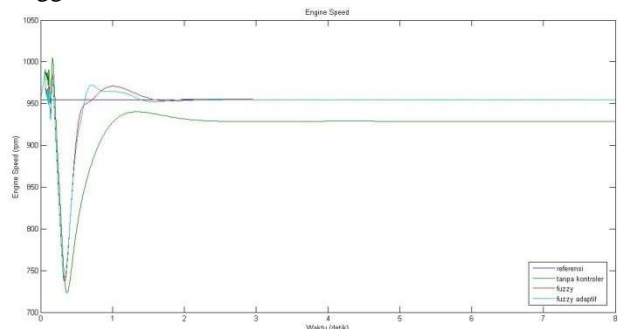


Gbr. 9 Respons sistem tanpa penambahan torsi (torsi eksternal= 0)

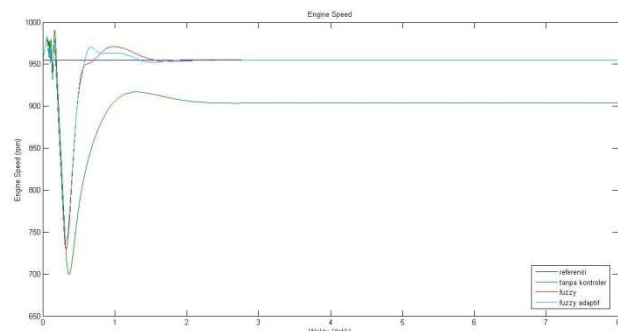
Sistem dengan masukan torsi eksternal sebesar 0 (nol) memberikan respons yang tampak pada Gbr. 9. Respons sistem menggunakan kontrol fuzzy memiliki galat terakhir sebesar -0,4562 dan nilai *integrated absolut error* (IAE) sebesar 60,78. Respons sistem menggunakan kontrol fuzzy adaptif memiliki galat sebesar -0,4335, dan nilai IAE sebesar 61,90.

B. Respons Sistem Terhadap Variasi Masukan Torsi Eksternal.

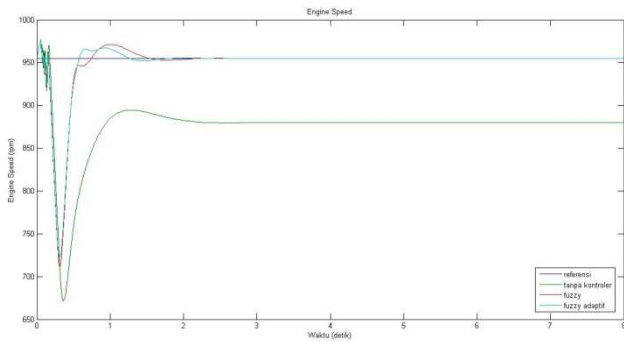
Pengujian respons sistem dengan masukan torsi eksternal berupa sinyal tangga dilakukan dengan sepuluh variasi sinyal tangga. Di bawah ini adalah hasil respons sistem dengan variasi masukan tangga dengan nilai torsi eksternal 1 hingga 10.



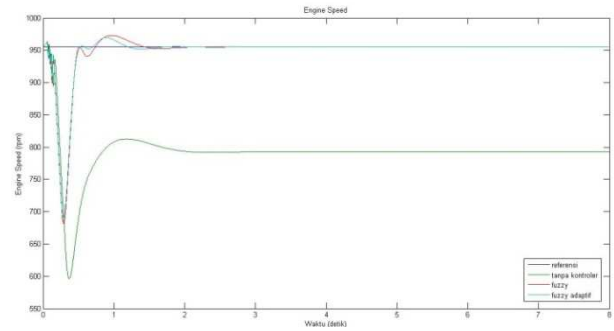
Gbr. 10 Respons sistem terhadap masukan sinyal tangga dengan nilai akhir 1 (satu)



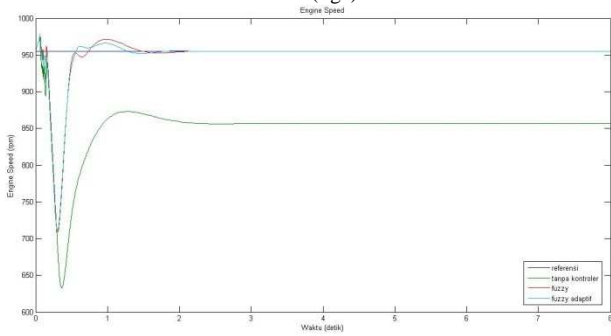
Gbr. 11 Respons sistem terhadap masukan sinyal tangga dengan nilai akhir 2 (dua)



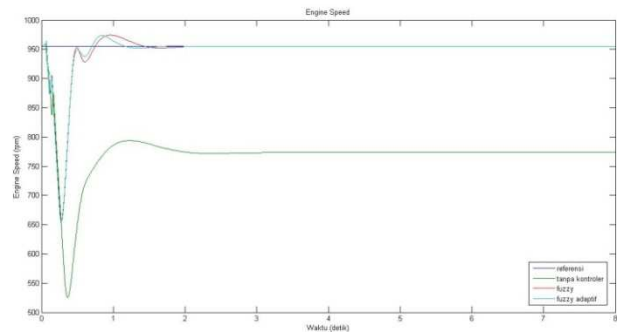
Gbr. 12 Respons sistem terhadap masukan sinyal tangga dengan nilai akhir 3 (tiga)



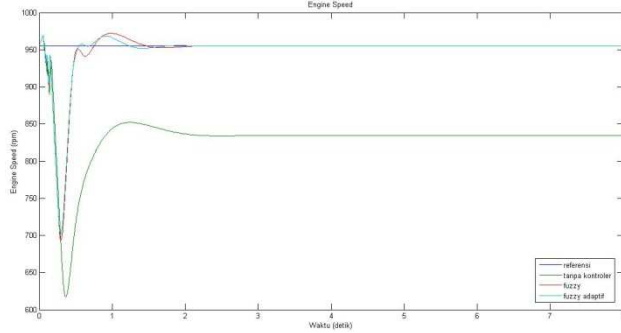
Gbr. 16 Respons sistem terhadap masukan sinyal tangga dengan nilai akhir 7 (tujuh)



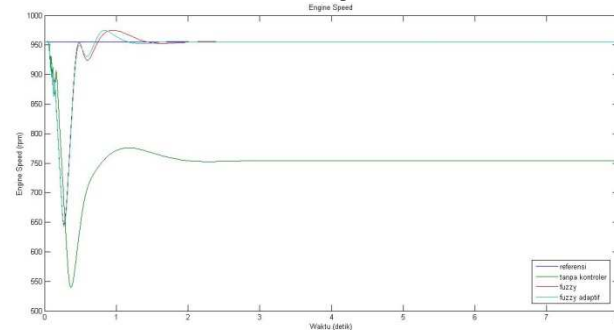
Gbr. 13 Respons sistem terhadap masukan sinyal tangga dengan nilai akhir 4 (empat)



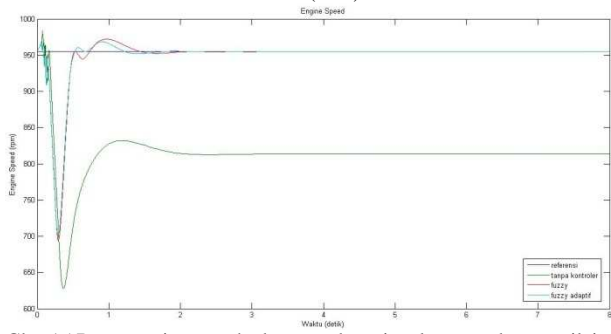
Gbr. 17 Respons sistem terhadap masukan sinyal tangga dengan nilai akhir 8 (delapan)



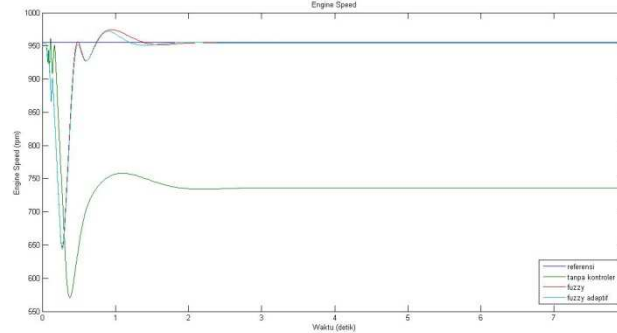
Gbr. 14 Respons sistem terhadap masukan sinyal tangga dengan nilai akhir 5 (lima)



Gbr. 18 Respons sistem terhadap masukan sinyal tangga dengan nilai akhir 9 (sembilan)



Gbr. 15 Respons sistem terhadap masukan sinyal tangga dengan nilai akhir 6 (enam)



Gbr. 19 Respons sistem terhadap masukan sinyal tangga dengan nilai akhir 10 (sepuluh)

Perbandingan nilai galat dan IAE antara sistem dengan kontrol fuzzy dan fuzzy adaptif tampak pada Tabel V.

TABEL V
PERBANDINGAN NILAI GALAT DAN IAE

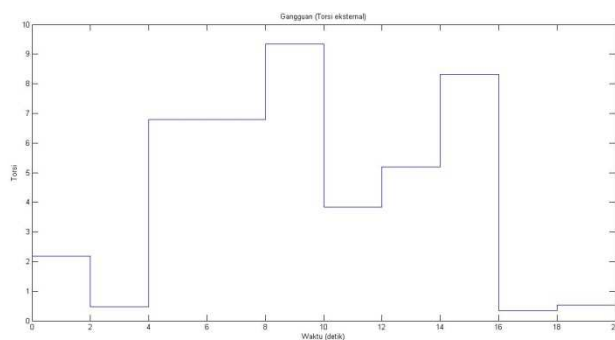
Torsi	Galat		IAE	
	K. fuzzy	K. fuzzy adaptif	K. fuzzy	K. fuzzy adaptif
1	-0,06606	-0,06052	54,81	54,9
2	-0,08698	-0,07978	55,23	51,76
3	0,05108	0,04693	58,58	54,7
4	-0,02483	-0,02294	56,24	54,33
5	0,1204	0,1114	61,39	55,55
6	0,2304	0,2129	59,48	54,95
7	-0,02406	-0,02231	61,73	55,95
8	0,0022209	0,002052	70,02	66,86
9	-0,1167	-0,1086	73,45	70,68
10	0,4256	0,4105	73,24	72,25

Berdasarkan Tabel V tampak bahwa besar nilai galat dan IAE respons sistem dengan kontrol fuzzy adaptif lebih kecil daripada kontrol fuzzy saja. Nilai galat pada sistem dengan pengontrol fuzzy adaptif lebih kecil daripada kontrol fuzzy saja dikarenakan pada setiap perubahan galat – antara referensi dengan kecepatan keluaran – dilakukan pergeseran titik pusat masing-masing fungsi keanggotaan masukan torsi sesuai besarnya perubahan galat.

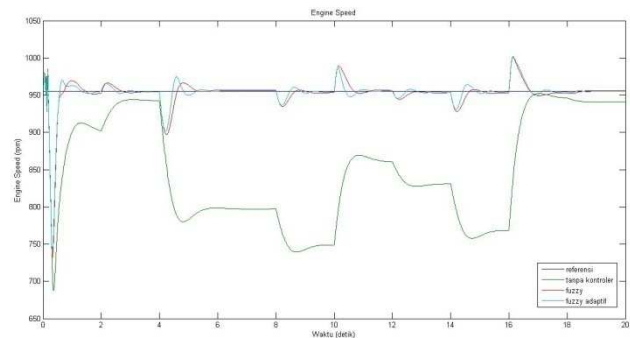
Pergeseran fungsi keanggotaan masukan torsi ini menyebabkan pengontrol fuzzy utama mengolah nilai masukan galat sedemikian rupa sehingga nilai derajat fungsi keanggotaan hasil pengolahan menjadi lebih tinggi dari seharusnya untuk sistem dengan galat positif atau lebih rendah dari seharusnya untuk sistem dengan galat negatif. Hasil dari proses adaptasi ini meningkatkan *rise time* sistem setiap terjadi perubahan galat.

C. Respons Sistem Terhadap Gangguan Random

Pengujian respons sistem menggunakan sinyal random dilakukan dengan membangkitkan sinyal random. Sinyal random memiliki nilai minimum 0 (nol) dan maksimum 10 (sepuluh) dengan jeda antara perubahan nilai selama 2 detik. Sinyal random tampak pada Gbr. 20. Respons sistem yang dihasilkan tampak pada Gbr. 21.



Gbr. 20 Sinyal masukan torsi



Gbr. 21 Respons sistem terhadap gangguan random

Respons sistem dengan kontrol fuzzy memiliki nilai IAE sebesar 155,3 sedangkan fuzzy adaptif memiliki nilai IAE sebesar 133,9. Hasil respons sistem tersebut menunjukkan bahwa sistem dengan kontrol fuzzy adaptif memiliki galat yang lebih kecil dari sistem dengan kontrol fuzzy saja.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis sistem dapat disimpulkan beberapa hal:

1. Respons sistem pengaturan kecepatan stasioner pada mesin bensin yang mendapat gangguan perubahan torsi eksternal berupa sinyal tangga mampu mengikuti referensi sebesar 954,9 rpm dengan nilai e_{ss} rata-rata sistem menggunakan kontrol fuzzy sebesar 0,051 dan e_{ss} setelah diperbaiki menggunakan kontrol fuzzy adaptif menjadi 0,048.
2. Respons sistem pengaturan kecepatan stasioner pada mesin bensin yang mendapat gangguan perubahan torsi eksternal berupa sinyal random dengan rentang nilai 1-10 menggunakan metode kontrol fuzzy ataupun fuzzy adaptif mampu mengikuti referensi dan mempertahankan kecepatan stasioner pada kecepatan referensi sebesar 954,9.
3. Kinerja fuzzy yang ditingkatkan dengan mengadaptasikan parameternya (fuzzy adaptif) dapat memperbaiki sistem yang semula mempunyai galat (*steady state error*) sebesar 0,051 menjadi 0,048 dan *Integrated Absolut Error* (IAE) rata-rata dari 62,41 menjadi 59,19. Hal ini menunjukkan proses adaptasi sudah mampu mengubah kinerja fuzzy sebagai pengontrol sistem menjadi lebih baik.

REFERENSI

- [1] Yildiz, Y., dan Annaswamy, A. M., *Spark Ignition Engine Idle Speed Control : An Adaptive Control Approach*, 2009.
- [2] Hsieh, F., Chen, B., dan Wu, Y., *Adaptive Idle Speed Control For Spark-Ignition Engines*, 2007.
- [3] Glielmo, L., Santini, S., dan Federico, N., *Optimal Idle Speed Control with Induction-to-Power Finite Delay for SI Engines*, pp. 200–209, 1999.
- [4] Hakim, M. L., Santoso, A., dan Susila, J., *Perancangan dan Implementasi Kontroler PID untuk Pengaturan Waktu Injeksi dan Waktu Pengapian Saat Kecepatan Stasioner pada Spark Ignition Engine*, 2011.

- [5] Mahmood, A. M., *Design of ON-Line Tuned Idle Speed Controller for an Automotive Engine By Using NCD*, vol. 12, no. 2, pp. 1–8, 2012.
- [6] Kruse, R., Gebhardt, J., dan Klawonn, F., *A Fuzzy Controller For Idle Speed Regulation*, University of Braunschweig, 1994.
- [7] Tanaka, K. , dan Wang, H. O., *Design And Analysis Fuzzy Control Systems Design And Analysis*, John Wiley & Sons INC. 2001.