

PERANCANGAN SISTEM KONTROL *HYBRID FUZZY PI* UNTUK PENGATURAN *IGNITION TIMING* PADA MODEL *SPARK IGNITION ENGINE*

Sonya Fitri Situmorang^{*)}, Aris Triwiyatno, and Budi Setiyono

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail:sonyasitumorang303@gmail.com

Abstrak

Kontrol waktu pengapian sudah sejak lama menjadi permasalahan yang banyak dibahas dalam kontrol otomotif. Waktu pengapian pada *spark ignition engine* merupakan pengaturan sudut antara posisi piston dengan *crankshaft* dimana pengapian dilakukan di ruang bakar sebelum akhir langkah kompresi. Penentuan pengapian yang terlalu cepat dan terlalu lambat dapat menyebabkan getaran berlebih dan kerusakan pada mesin. Waktu pengapian yang tepat pada *spark ignition engine* dibutuhkan untuk menghasilkan kecepatan mesin maksimum, efisiensi, dan keawetan mesin. Pada tugas akhir ini, dilakukan penelitian mengenai kontrol waktu pengapian pada *spark ignition engine*. Metode kontrol yang digunakan adalah sistem kontrol *hybrid fuzzy PI*. Tujuan dari kontroler *hybrid fuzzy PI* ini adalah untuk menggabungkan performa terbaik dari kontrol *fuzzy* dan kontrol *PI* untuk merancang kontroler yang akan menghasilkan respon yang lebih baik jika dibandingkan dengan menggunakan kontroler *fuzzy* atau *PI* saja. Pengujian sistem dilakukan dengan memberikan perubahan *load torque* menggunakan sinyal anak tangga dan sinyal random. Hasil pengujian akan dilakukan dengan membandingkan nilai *integral area error* (IAE) dari hasil respon sistem menggunakan kontroler *fuzzy* dan *hybrid fuzzy PI*.

Kata kunci : waktu pengapian, *hybrid fuzzy PI*, kecepatan mesin, *spark ignition engine*

Abstract

Ignition timing control has been a classical problem in automotive control. Ignition timing in spark ignition engine is the process of setting angle relative to piston position and crankshaft that a spark will occur in the combustion chamber near the end of the compression stroke. Spark occurring too soon or too late are often responsible for excessive vibrations and even engine damage. Optimal timing of an spark ignition engine is needed to maximize *engine speed*, efficiency, and engine life. This final project was conducted research on intelligent control ignition timing on spark ignition engines. Control method used is *hybrid fuzzy PI* control system. The objective of the hybrid controller is to utilize the best attributes of *fuzzy* logic and *PI* controllers to provide a controller which will produce better response than either the *fuzzy* or the *PI* controllers. System testing was done by providing an load torque using step signal and random signal. The results show that controlling system with *hybrid fuzzy PI* is able to keep *engine speed* at a near predetermined value. The value of *integral area error* (IAE) from system respon using *hybrid fuzzy PI* will be compared to *fuzzy*.

Keyword : Ignition timing, *hybrid fuzzy PI* control, engine speed, *spark ignition engine*

1. Pendahuluan

Motor Otto atau motor bensin merupakan salah satu jenis motor pembakaran dalam (*internal combustion engine*) yang menggunakan bantuan bunga api yang berasal dari busi untuk menyalakan atau membakar campuran bahan bakar dan udara atau dapat disebut juga dengan sistem *spark ignition engine* [1].

Untuk mendapatkan tenaga yang maksimal maka pembakaran campuran bahan bakar-udara harus dimulai diakhir langkah kompresi dan sebelum piston mencapai titik mati atas (*top death centre*). Jika pencetus bunga api terlalu cepat (*soon*) maka akhir pembakaran akan terjadi sebelum langkah kompresi selesai sehingga tekanan yang dihasilkan akan melawan arah gerakan piston yang berakibat penurunan tenaga yang dihasilkan

atau *direct losses*. Dan sebaliknya jika pencetusan terlalu lambat (*late*) maka piston sudah melakukan langkah ekspansi sebelum terbentuk tekanan yang maksimal. Oleh karena itu, diperlukan sebuah metode pengaturan waktu pengapian (*ignition timing*) untuk menentukan waktu pengapian yang tepat [2].

Waktu pengapian dinyatakan dengan sudut (*spark advance*) yang merupakan perbandingan posisi piston saat terjadi loncatan bunga api pada busi dengan titik mati atas piston (*top death centre*). Pengaturan waktu pengapian dapat dilakukan dengan mengatur derajat *spark advance* sehingga dapat diperoleh kecepatan mesin (*engine speed*) sesuai yang diinginkan.

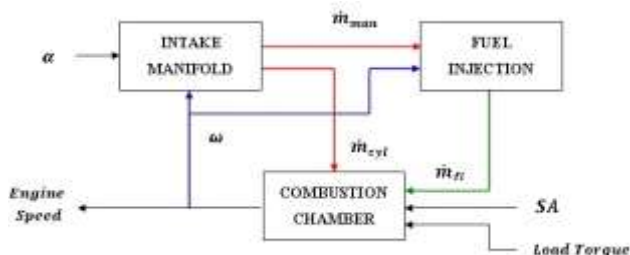
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang sistem kontrol dengan metode kontrol *hybrid fuzzy PI* untuk mengatur waktu pengapian (*ignition timing*) yang tepat pada model *spark ignition engine* sehingga dapat menghasilkan kecepatan mesin (*engine speed*) sesuai dengan referensi.

Metode kontrol *hybrid* ini merupakan mekanisme penggabungan dari kontroler PI dan kontroler *fuzzy*. Mekanisme penggabungan ini akan menentukan seberapa dominan kendali satu terhadap kendali lainnya sehingga dapat diperoleh sinyal kontrol yang lebih baik dibandingkan dengan hanya menggunakan kontroler PI atau kontroler *fuzzy*. Penelitian ini dilakukan dengan mensimulasikan pengendalian *ignition timing* pada model *spark ignition engine* menggunakan metode kontrol *hybrid fuzzy PI*.

2 Metode

2.1 Model Spark Ignition Engine

Pemodelan *spark ignition engine* yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada model yang dibuat oleh Moskwa [4]. Model *spark ignition engine* memiliki 3 masukan yaitu *throttle*, *spark advance*, dan *load torque*. Sedangkan keluaran *engine* berupa kecepatan mesin (*engine speed*). Gambar 1. merupakan struktur pemodelan *spark ignition engine*.



Gambar 1. Struktur pemodelan *spark ignition engine*

Persamaan-persamaan yang digunakan pada pemodelan *spark ignition engine* adalah sebagai berikut:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{man} - \dot{m}_{cyl} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{man} = MAX.TC.PRI \quad (2)$$

$$TC = \begin{cases} 1 - \cos(1.14459\alpha - 0.0185) & \text{for } \alpha \leq 79.64 \\ 1 & \text{for } \alpha > 79.64 \end{cases} \quad (3)$$

$$PRI = 1 - \exp\left(9\left(\frac{P_m}{P_{atm}} - 1\right)\right) \quad (4)$$

$$m_a = \frac{Ma.P_m.V_m}{R.T_m} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{cyl} = \frac{V_e}{4.\pi.V_m} . \eta_{vol} . m_a . N \quad (6)$$

$$\eta_{vol} = (24.5N - 31000)m_a^2 + (-0.167N + 222)m_a + (0.00081N + 0.352) \quad (7)$$

$$\dot{m}_{fc} = \tau_f . \dot{m}_{ff} + \dot{m}_{fi} \quad (8)$$

$$\tau_f = 0.050 + \frac{1.5\pi}{N} . \frac{\dot{m}_{fc} . \beta_{AF,desired}}{MAX} \quad (9)$$

$$I_e \dot{\omega}_e = T_i - T_f - T_{Load} \quad (10)$$

$$T_i = C_T . \frac{\dot{m}_{cyl}(t - \Delta t_{it})}{\omega_e(t - \Delta t_{it})} . AFI(t - \Delta t_{it}) . SI(t - \Delta t_{st}) \quad (11)$$

$$AFI = \cos(7.3834.(A/F - 13.5)) \quad (12)$$

$$A/F = \frac{\dot{m}_{cyl}}{\dot{m}_{fi}} \quad (13)$$

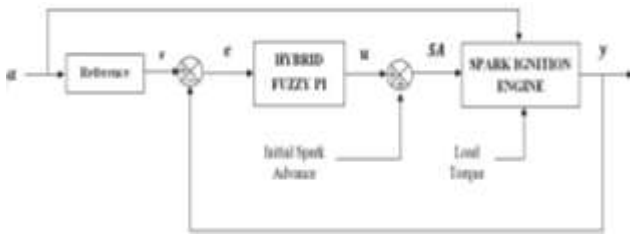
$$SI = (1 - (3.8 e^{-4}(SA - MTB))^2) \quad (14)$$

Tabel 1. Parameter-parameter model sistem *spark ignition engine*

Parameter	Keterangan
\dot{m}_a	Aliran massa udara di <i>intake manifold</i>
\dot{m}_{man}	Aliran massa udara yang masuk ke <i>intake manifold</i>
\dot{m}_{cyl}	Aliran massa udara yang meninggalkan <i>intake manifold</i> dan masuk ke ruang bakar (<i>combustion chamber</i>)
MAX	Aliran udara maksimal yang masuk ke <i>intake manifold</i>
TC	Karakteristik <i>intake manifold</i>
PRI	Rasio pengaruh tekanan ternormalisasi
α	Sudut <i>throttle</i>
P_m	Tekanan <i>intake manifold</i>
P_{atm}	Tekanan udara luar
Ma	Massa molar
V_m	Volum <i>intake manifold</i>
R	Konstanta gas
T_m	Temperatur
ω	Kecepatan sudut <i>engine</i>
η_{vol}	Efektifitas volum
\dot{m}_{fc}	Aliran bahan bakar normal
τ_f	Waktu efektif pemberian bahan bakar
\dot{m}_{fi}	Aliran bahan bakar yang masuk ke <i>combustion chamber</i>
$\beta_{AF,desired}$	Perbandingan udara dan bahan bakar yang seharusnya
T_f	Torsi gesekan dari <i>engine</i>
T_{Load}	Torsi yang berasal dari luar <i>engine</i>
AFI	Perbandingan udara dan bahan bakar ternormalisasi
SI	Pengaruh pengapian ternormalisasi
SA	Sudut pengapian (<i>spark advance</i>)
MTB	Sudut pengapian untuk menghasilkan torsi terbaik

2.2 Mekanisme kontrol

Perancangan sistem pengendalian secara garis besar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram blok kontrol waktu pengapian pada spark ignition engine dengan hybrid fuzzy PI

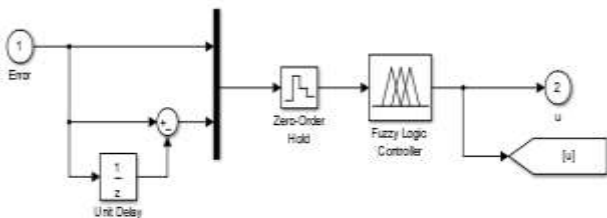
Keterangan:

- α = Throttle
- r = nilai referensi engine speed
- e = eror engine speed
- u = koreksi spark advance
- SA = Spark advance
- y = keluaran engine speed

Parameter masukan engine yang dikontrol adalah spark advance (SA).

2.2.1 Kontrol Fuzzy

Kontrol fuzzy menggunakan fuzzy tipe sugeno karena memiliki kelebihan dalam mengendalikan sistem yang nonlinier. Sistem kontrol fuzzy pada penelitian ini memiliki dua masukan, yaitu Error dan dError serta keluaran berupa u-fuzzy.

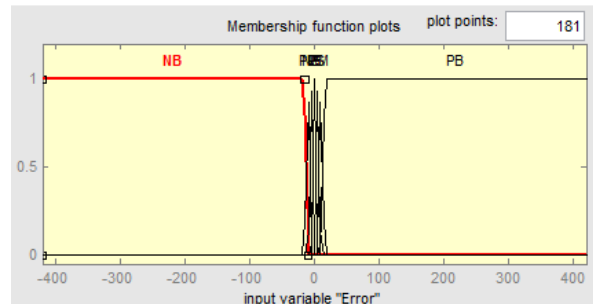


Gambar 3. Blok sistem kontrol fuzzy

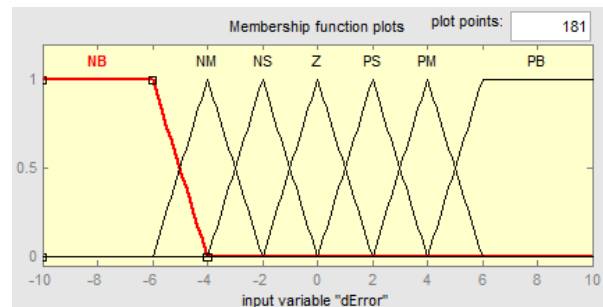
Error diperoleh dari selisih antara nilai referensi terhadap nilai keluaran sistem. Sedangkan dError pada sistem diperoleh dari selisih antara nilai Error sekarang dengan nilai Error sebelumnya. Nilai Error sebelumnya diperoleh dengan menambahkan blok unit delay pada Error. Masukan Error dan dError masing-masing memiliki tujuh membership function (fungsi keanggotaan) yaitu Negative Big (NB), Negative Medium (NM), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS), Positive Medium (PM), dan Positive Big (PB).

Nilai range untuk fungsi keanggotaan Error dan dError diperoleh dengan cara analisis perubahan Error dan dError yang dihasilkan terhadap perubahan masukan throttle dan load torque. Masukan sistem kontrol berupa Error dan dError. Untuk analisis Error diperoleh nilai minimum sebesar -134.4 dan nilai maksimum sebesar

409.2, sehingga nilai range Error yang digunakan adalah -420 sampai 420. Realisasi analisis fungsi keanggotaan dan range masukan Error dapat dilihat pada Gambar 4. Untuk analisis dError diperoleh nilai minimum sebesar -47.41 dan nilai maksimum sebesar 377, sehingga nilai range yang digunakan adalah -10 sampai 10. Realisasi analisis fungsi keanggotaan dan range masukan dError ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Fungsi keanggotaan masukan Error



Gambar 5. Fungsi keanggotaan masukan dError

Akan tetapi keluaran u-fuzzy bukan berupa himpunan seperti masukan melainkan berupa konstanta atau nilai dengan besaran yang sudah ditentukan. Pada penelitian ini keluaran fuzzy yang digunakan adalah sebagai berikut

- Keluaran NB = -2,25
- Keluaran NM = -1,5
- Keluaran NS = -0,75
- Keluaran Z = 0
- Keluaran PS = 0,75
- Keluaran PM = 1,5
- Keluaran PB = 2,25

Aturan fuzzy yang digunakan pada penelitian ini disusun berdasarkan kombinasi Error, dError, dan u-fuzzy. Jumlah aturan (rule base) yang digunakan pada perancangan sistem kontrol fuzzy sebanyak 49 rule.

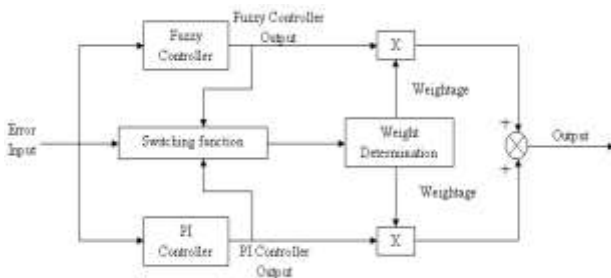
Tabel 2. Basis aturan (rule base) parameter kontrol fuzzy

Fungsi Keanggotaan	dError						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
	NM	NB	NB	NM	NM	NM	NB
	NS	NM	NM	NS	NS	NS	NM
	Z	NS	NS	Z	Z	Z	PS
	PS	PM	PM	PS	PS	PS	PM
	PM	PB	PB	PM	PM	PM	PB
	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

Setiap aturan yang dirancang akan mengolah masukan fuzzy yaitu Error dan dError, sehingga didapatkan keluaran u-fuzzy yang sesuai.

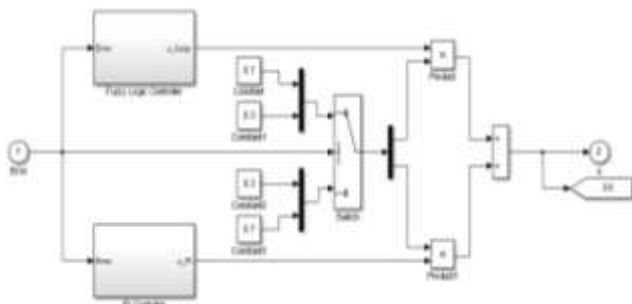
2.2.2 Kontrol Hybrid fuzzy PI

Sistem kontrol hybrid fuzzy PI merupakan mekanisme penggabungan sistem kontrol PI dan sistem kontrol fuzzy dimana tujuan penggabungan ini adalah untuk menentukan seberapa dominan sistem kontrol satu terhadap sistem kontrol lainnya. Tujuan dari sistem kontrol hybrid fuzzy PI itu sendiri yaitu untuk memperbaiki sinyal keluaran dari sistem kontrol fuzzy dengan penambahan sistem kontrol PI sehingga hasil yang diperoleh lebih optimal jika dibandingkan dengan sistem yang hanya dikontrol fuzzy atau dikontrol PI saja.



Gambar 6. Blok diagram sistem kontrol hybrid fuzzy PI

Pada sistem kontrol hybrid fuzzy PI terdapat mekanisme pemilihan (switching) dan penggabungan (blending), dimana mekanisme inilah yang akan untuk menentukan seberapa dominan suatu kontrol terhadap kontrol lainnya. Jika diimplementasikan kedalam bentuk simulink akan tampak pada Gambar 7.



Gambar 7. Blok sistem kontrol hybrid fuzzy PI pada model engine

Dari Gambar 3.17 dapat dilihat bahwa keluaran dari kontrol fuzzy dan kontrol PI akan dikalikan dengan fungsi $f(e)$ yang merupakan faktor pembobotan dari mekanisme penggabungan. Oleh karena itu keluaran dari sistem kontrol hybrid fuzzy PI menjadi,

$$U_{hybrid} = f(e).U_{fuzzy} + (1 - f(e)).U_{PI} \quad (15)$$

$$U_{hybrid} = (1 - f(e)).U_{fuzzy} + f(e).U_{PI} \quad (16)$$

Ketika Error besar maka Persamaan 15. merupakan persamaan keluaran yang digunakan dimana kontrol fuzzy lebih dominan dibandingkan dengan kontrol PI. Sedangkan ketika Error hampir mendekati nilai set point maka persamaan keluaran adalah Persamaan 16. dimana kontrol PI lebih dominan dibandingkan kontrol fuzzy.

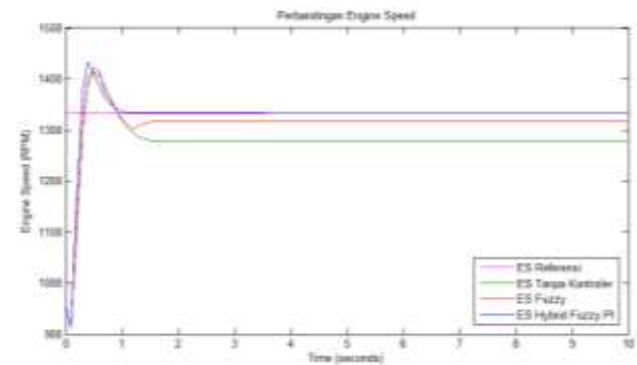
Pada penelitian ini penentuan nilai $f(e)$ dilakukan dengan trial and error hingga diperoleh nilai pembobotan yang tepat sehingga hasil lebih optimal. Setelah dilakukan beberapa kali tuning diperoleh nilai $f(e) = 0.7$ untuk Persamaan 15. dan $f(e) = 0.3$ untuk Persamaan 16.

3. Hasil dan Analisa

Pada sistem spark ignition engine yang dirancang oleh penulis menggunakan inialisasi nilai Spark advance 10 derajat, inialisasi throttle awal sebesar 18,327 derajat konversi dari 0,32 radian yang menghasilkan nilai referensi kecepatan mesin sebesar 1332 rpm. Pengujian sistem dilakukan dengan memberikan variasi masukan throttle berupa sudut 18,327 derajat, sinyal step up, dan sinyal step down sedangkan gangguan berupa gangguan step dan gangguan random pada load torque. Pengujian dilakukan pada sistem tanpa kontroler, sistem dengan kontrol fuzzy, dan sistem dengan kontrol hybrid fuzzy PI.

3.1 Pengujian Tanpa Gangguan

3.1.1 Masukan Throttle 18,327

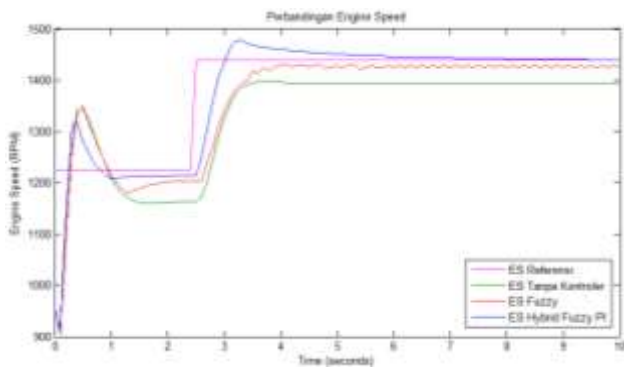


Gambar 8. Respon Sistem tanpa gangguan throttle 18,327

Pada unjuk kerja sistem tanpa kontroler, dengan waktu pengapian (ignition timing) pada posisi spark advance 10

derajat diperoleh nilai IAE sebesar 583,6. Sistem kontrol *fuzzy* memperbaiki posisi *spark advance* dimajukan sebesar 2,11 derajat menjadi 12,11 derajat, dihasilkan nilai *integral area error* (IAE) sebesar 244,1. Sistem kontrol *hybrid fuzzy* PI memperbaiki posisi *spark advance* dimajukan sebesar 2,91 derajat menjadi 12,91 derajat, dihasilkan nilai IAE sebesar 115,3. Berdasarkan hasil analisis dari ketiga sistem tersebut dapat diketahui bahwa sistem dengan kontrol *hybrid fuzzy* PI memiliki nilai IAE yang lebih kecil.

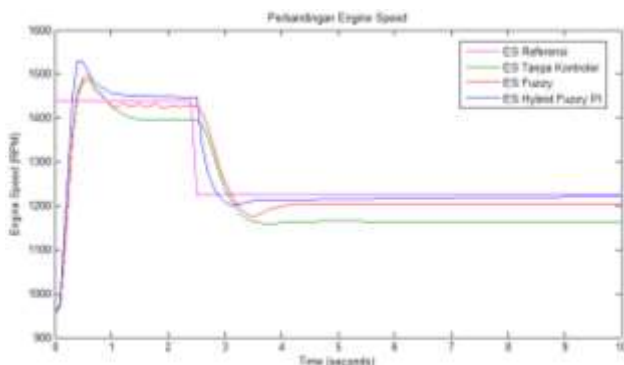
3.1.2 Masukan Throttle Sinyal Step Up



Gambar 9. Respon Sistem tanpa gangguan masukan throttle sinyal step up

Pada unjuk kerja sistem tanpa kontroler, dengan waktu pengapian (*ignition timing*) pada posisi *spark advance* 10 derajat diperoleh nilai IAE sebesar 615,5. Sistem kontrol *fuzzy* memperbaiki posisi *spark advance* dimajukan sebesar 1,84 derajat menjadi 11,84 derajat, dihasilkan nilai *integral area error* (IAE) sebesar 341. Sistem kontrol *hybrid fuzzy* PI memperbaiki posisi *spark advance* dimajukan sebesar 2,34 derajat menjadi 12,34 derajat, dihasilkan nilai IAE sebesar 219,7. Berdasarkan hasil analisis dari ketiga sistem tersebut dapat diketahui bahwa sistem dengan kontrol *hybrid fuzzy* PI memiliki nilai IAE yang lebih kecil.

3.1.3 Masukan Throttle Sinyal Step Down

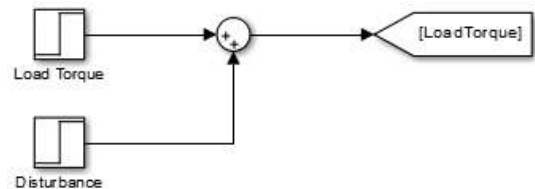


Gambar 10. Respon Sistem tanpa gangguan masukan throttle sinyal step down

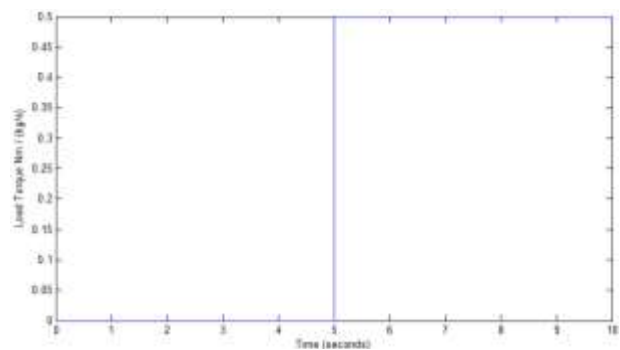
Pada unjuk kerja sistem tanpa kontroler, dengan waktu pengapian (*ignition timing*) pada posisi *spark advance* 10 derajat diperoleh nilai IAE sebesar 651,7. Sistem kontrol *fuzzy* memperbaiki posisi *spark advance* dimajukan sebesar 2,25 derajat menjadi 12,25 derajat, dihasilkan nilai *integral area error* (IAE) sebesar 368,6. Sistem kontrol *hybrid fuzzy* PI memperbaiki posisi *spark advance* dimajukan sebesar 3,36 derajat menjadi 13,36 derajat, dihasilkan nilai IAE sebesar 234,6. Berdasarkan hasil analisis dari ketiga sistem tersebut dapat diketahui bahwa sistem dengan kontrol *hybrid fuzzy* PI memiliki nilai IAE yang lebih kecil.

3.2 Pengujian Gangguan Step pada Load Torque

Sistem diberi tambahan gangguan *step* pada *load torque* yang menunjukkan sistem dalam kondisi tidak stabil seperti gambar 4.10.

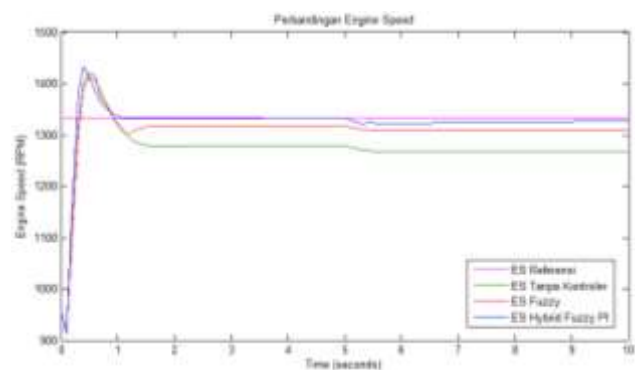


(a)



(b)

Gambar 11. Blok diagram (a) penambahan gangguan step dan (b) sinyal masukan load torque dengan gangguan step



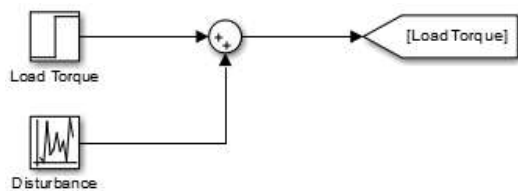
Gambar 12. Respon Sistem dengan masukan throttle 18,327 derajat dengan gangguan step pada load torque

Pada unjuk kerja sistem tanpa kontroler, dengan waktu pengapian (*ignition timing*) pada posisi *spark advance* 10 derajat diperoleh nilai IAE sebesar 638. Sistem kontrol *fuzzy* memperbaiki posisi *spark advance* dimajukan sebesar 2,25 derajat menjadi 12,25 derajat, dihasilkan nilai *integral area error* (IAE) sebesar 288,8. Sistem kontrol *hybrid fuzzy* PI memperbaiki posisi *spark advance* dimajukan sebesar 3,35 derajat menjadi 13,35 derajat, dihasilkan nilai IAE sebesar 149,8. Berdasarkan hasil analisis dari ketiga sistem tersebut dapat diketahui bahwa sistem dengan kontrol *hybrid fuzzy* PI memiliki nilai IAE yang lebih kecil.

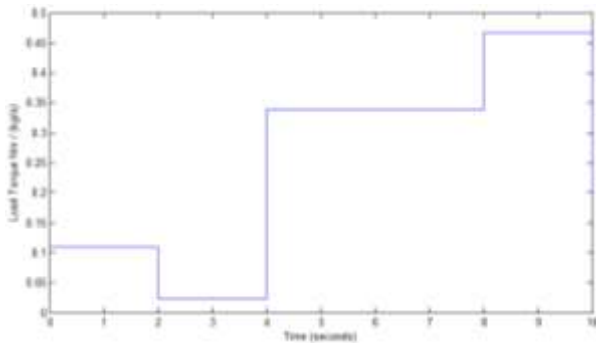
Pada unjuk kerja sistem tanpa kontroler, dengan waktu pengapian (*ignition timing*) pada posisi *spark advance* 10 derajat diperoleh nilai IAE sebesar 637. Sistem kontrol *fuzzy* memperbaiki posisi *spark advance* dimajukan sebesar 2,25 derajat menjadi 12,25 derajat, dihasilkan nilai *integral area error* (IAE) sebesar 283,7. Sistem kontrol *hybrid fuzzy* PI memperbaiki posisi *spark advance* dimajukan sebesar 3,34 derajat menjadi 13,34 derajat, dihasilkan nilai IAE sebesar 147. Berdasarkan hasil analisis dari ketiga sistem tersebut dapat diketahui bahwa sistem dengan kontrol *hybrid fuzzy* PI memiliki nilai IAE yang lebih kecil.

3.3 Pengujian Gangguan *Random* pada *Load Torque*

Sistem diberi tambahan gangguan *random* pada *load torque* yang menunjukkan sistem dalam kondisi tidak stabil seperti gambar 4.17.

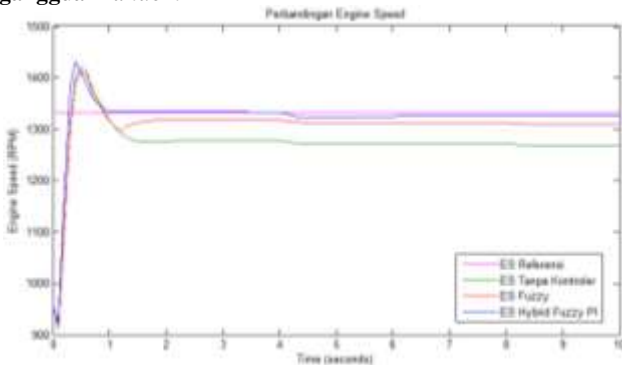


(a)



(b)

Gambar 15. Blok diagram (a) penambahan gangguan *random* dan (b) sinyal masukan *load torque* dengan gangguan *random*



Gambar 16. Respon Sistem dengan *throttle* 18,327 derajat dengan gangguan *random* pada *load torque*

Tabel 4.3 Perbandingan *spark advance* dan *integral area error* keseluruhan

Gangguan pada load torque	Masukan Throttle	Integral Area Error (IAE)		
		Tanpa kontroler	Fuzzy	Hybrid fuzzy PI
Tanpa Gangguan	18,327	583,6	244,1	115,3
Step up	18,327	615,5	341	219,7
Step down	18,327	651,7	368,6	234,6
Gangguan Step	18,327	638	288,8	149,8
Gangguan Random	18,327	637	283,7	147
Rata-rata		625,16	305,2	173,28

Respon sistem dengan perubahan *spark advance* berpengaruh terhadap nilai *integral area error* (IAE). Dari analisis pengujian sistem dengan kontrol *fuzzy* memiliki rata-rata nilai IAE sebesar 305,2 sedangkan sistem dengan kontrol *hybrid fuzzy* PI memiliki rata-rata nilai IAE sebesar 173,28. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol *hybrid fuzzy* PI lebih baik dibandingkan dengan sistem kontrol *fuzzy*. Hal ini membuktikan bahwa sistem kontrol *hybrid fuzzy* PI mampu menghasilkan respon sistem yang lebih optimal.

4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa penggunaan kontroler *hybrid fuzzy* PI yang didesain pada penelitian ini mampu beroperasi dengan baik untuk titik operasi yang luas dengan karakter tiap titik operasi yang cukup berbeda. Penggunaan kontroler *hybrid fuzzy* PI mampu memperbaiki performa mesin karena nilai *engine speed* hampir mendekati nilai referensi *engine speed*. Sedangkan kontrol *fuzzy* juga sudah mampu memperbaiki performa mesin, akan tetapi nilai *engine speed* keluaran masih jauh dari nilai referensi *engine speed*. Kontroler *hybrid fuzzy* PI lebih bagus dari kontroler *fuzzy* dikarenakan kontroler hybrid merupakan penggabungan performa terbaik dari kontrol *fuzzy* dan PI untuk merancang kontroler yang mampu menghasilkan sinyal kontrol yang lebih optimal jika dibandingkan dengan sistem dengan menggunakan kontroler *fuzzy* atau PI saja. Pengontrolan *ignition timing* akan lebih efektif apabila disertakan juga dengan pengontrolan *Air to Fuel Ratio* (AFR), kecepatan putar mesin atau EGR (*Exhaust Gas Recirculation*).

Referensi

- [1] F. M. Siregar, "Performansi Mesin Non Stationer (Mobile) Berteknologi VVT-i dan Non VVT-i," Universitas Sumatera Utara, 2009.
- [2] H. Y. Nanlohy, "Perbandingan Variasi Derajat Pengapian Terhadap Efisiensi Termal dan Konsumsi Bahan Bakar Otto Engine BE50," vol. 3, 2012.
- [3] R. B. Spencer, "Adaptive Control of The Ignition Timing of Spark Ignition Engine Utilising The Combustion Flame Light Emissions," University of Canterbury, 1985.
- [4] J. J. Moskwa, "Automotive Engine Modeling for Real Time Control," Massachusetts Institute of Technology, 1988.
- [5] M. M. Polonskii, "Complex Systems Simulation Using MATLAB/SIMULINK," 2000. [Online]. Tersedia: http://www.tij.org/issues/4_1/4_1r.html. [Diakses: 28-Aug-2014].
- [6] M. F. N. Reimansyah, "Perancangan Kontrol *Fuzzy* Adaptif pada Sistem Kontrol Kecepatan Stationer Mesin Bensin," Universitas Diponegoro, 2014.
- [7] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. United States of America: McGraw-Hill, 1988.
- [8] W. W. Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of The Internal Combustion Engine*, 2nd Ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [9] S. Macmud, U. Surono, dan L. Sitorus, "Pengaruh Variasi Unjuk Derajat Pengapian Terhadap Kerja Mesin," vol. 3, 2013.
- [10] Suratno, "Pengaruh Perbedaan Tipe Fungsi Keanggotaan pada Pengendalian Logika *Fuzzy* Terhadap Tanggapan Waktu Sistem Orde Dua Secara Umum," Universitas Diponegoro, 2011.
- [11] J. Jang, C. Sun, dan E. Mizutany, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*. United States of America: Prentice Hall, 1997.
- [12] M. Asror, "Kontrol PI," 2011. [Online]. Tersedia: <http://blogeviri.blogspot.com/2010/11/kontrol-pi.html>. [Diakses: 05-Oct-2014].
- [13] N. Kuyvenhoven, "PID Tuning Methods An Automatic PID Tuning Study with MathCad," Calvin College, 2002.
- [14] I. Erenoglu, I. Eksin, E. Yesil, dan M. Guzkaya, "An Intelligent *Hybrid fuzzy* PI Controller," 2006.
- [15] T. Vignesh, V. Thangarasu, K. Prasanth, dan R. Selvan, "*Hybrid fuzzy*-PI Controller and Novel Switching Functions Using Speed Control Technology of Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor," vol. 1, 2015.
- [16] D. Panicker dan R. Mol, "Hybrid PI_ *Fuzzy* Controller for Brushless DC Motor Speed Control," vol. 8, no. 6, 2013.
- [17] M. Zerikat dan S. Chekroun, "Design and Implementation of a *Hybrid fuzzy* Controller for a High-Performance Induction Motor," vol. 1, 2007.
- [18] D. T. Santosa, "Perancangan Sistem Suspensi Aktif Nonlinear Tipe Paralel Dengan Kendali *Hybrid fuzzy* PID pada Model Seperempat," Universitas Diponegoro, 2012.
- [19] S. Paramasivam dan R. Arumugam, "Real Time Hybrid Controller Implementation for Switched Reluctance Motor Drive," 2004.
- [20] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 4th Ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.