

DESAIN KONTROL AIR FUEL RATIO (AFR) PADA MODEL SPARK IGNITION ENGINE DENGAN METODE HYBRID FUZZY PI

Al Vandy Reactor Muhammad^{*)}, Aris Triwiyatno, and Budi Setiyono

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

^{*)}Email: vandyzard@gmail.com

Abstrak

Air Fuel Ratio (AFR) atau rasio pembakaran udara dengan bahan bakar pada sebuah kendaraan seperti mobil merupakan salah satu variabel penting yang menentukan kesempurnaan pembakaran internal mesin. Sebuah kendaraan seperti mobil atau spark ignition engine memiliki banyak variabel kompleks dan berkaitan satu sama lain. Pengontrolan air fuel ratio pada spark ignition engine diharapkan menghasilkan rasio udara dengan bensin yang diinginkan. Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis mendesain kontrol air fuel ratio pada spark ignition engine menggunakan metode kontrol Hybrid Fuzzy PI. Penulis juga menuliskan model matematika dari spark ignition engine. Keluaran dari metode kontrol ini akan digunakan untuk mengontrol jumlah bensin yang akan masuk ke ruang pembakaran agar air fuel ratio berada pada nilai yang diinginkan yaitu 14,67 untuk mesin berbahan bakar bensin.

Kata kunci : air fuel ratio, hybrid fuzzy PI, integral area error, spark ignition engine, stoichiometric

Abstract

Air Fuel Ratio of combustion in a vehicle such as a car is one of the important variables that determine the perfection of the internal combustion engine. A vehicle such as a car or a spark ignition engine have many complex variables and related to one another. Controlling of air fuel ratio in spark ignition engine was expected to producing air to gasoline ratio that desired. In this research, the author has designed the air fuel ratio control in spark ignition engines using Hybrid Fuzzy PI control method. The author also has wrote a mathematical model of a spark ignition engine. Output of this control method will be used to control the amount of fuel that will going into the combustion chamber so that air fuel ratio is at the desired value is 14.67 for gasoline.

Keywords : air fuel ratio, hybrid fuzzy PI, integral area error, spark ignition engine, stoichiometric

1. Pendahuluan

Air Fuel Ratio (AFR) atau rasio pembakaran udara dengan bahan bakar pada sebuah kendaraan seperti mobil merupakan salah satu variabel penting yang menentukan kesempurnaan pembakaran internal mesin. Besarnya nilai pembakaran sempurna atau *stoichiometric combustion* yaitu 14,67, analoginya 1 kilogram bensin atau *gasoline* akan habis terbakar jika dicampur dengan 14,67 kilogram udara dalam prosesnya^[9]. Sebuah kendaraan seperti mobil atau *spark ignition engine* memiliki banyak variabel kompleks dan berkaitan satu sama lain seperti kecepatan mesin, torsi mesin, waktu pengapian, waktu injeksi bahan bakar, pengisian udara, *air fuel ratio* dan sebagainya^[1].

Menurut teori siklus *Otto four-stroke spark ignition*, waktu tunda dari emisi pembuangan dinamis atau berubah-ubah dan tergantung pada kecepatan mesin. Pengontrolan AFR sudah banyak menggunakan strategi

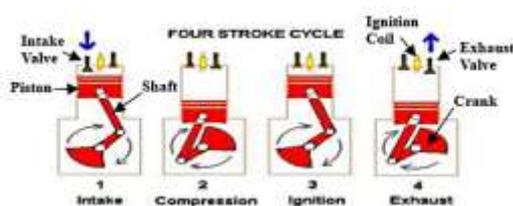
kontroler umpan maju, kontroler PI, PD dan PID umpan balik. Selain itu juga terdapat pengontrolan AFR menggunakan parameter estimasi *Dynamic Sliding Mode Control* (DSMC) dengan strategi jaringan adaptif *Radial Basis Function* (RBF)^[10]. Namun, algoritma neural network terlalu rumit untuk pengaplikasiannya.

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis mendesain kontrol *air fuel ratio* pada *spark ignition engine* menggunakan metode kontrol *Hybrid Fuzzy PI* dengan desain rule *Fuzzy Mamdani*^[2]. Penulis juga menuliskan model matematika dari *spark ignition engine*. Keluaran dari metode kontrol ini akan digunakan untuk mengontrol jumlah bensin yang akan masuk ke ruang pembakaran atau *combustion chamber* agar *air fuel ratio* berada pada nilai yang diinginkan yaitu 14,67 untuk bahan bakar bensin. Perancangan model *spark ignition engine* dan sistem kontrol *air fuel ratio* dengan *Hybrid Fuzzy PI* dilakukan di komputer melalui program MATLAB.

2. Metode

2.1 Pemodelan Spark Ignition Engine

Spark Ignition Engine (Mesin Pengapian Busi) merupakan salah satu jenis mesin bakar yang membutuhkan pemacu berupa percikan bunga api untuk meledakkan campuran udara dan bahan bakar dalam ruang bakarnya. Energi yang dihasilkan oleh reaksi pembakaran akan menyebabkan piston terdorong dan memutar poros mesin^[7]. Mesin pengapian busi memiliki 4 siklus berurutan, yaitu siklus hisap (*intake*), siklus kompresi (*compression*), siklus pembakaran (*combustion*) atau siklus usaha (*power*), dan siklus buang (*exhaust*)^[11]. Ilustrasi dari tiap siklus dapat dilihat pada Gambar 1.

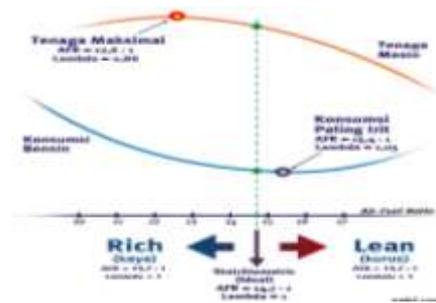


Gambar 1 Siklus kerja mesin 4 langkah^[11]

Perbandingan ideal dari udara dan bahan bakar untuk satu kali proses pembakaran adalah 14,67 : 1 yang disebut dengan *stoichiometric* AFR^[7]. AFR kondisi aktual yang terjadi di ruang pembakaran dibagi dengan *stoichiometric* AFR diperoleh harga AFR relatif yang disebut *lambda* (λ). Secara umum terdapat empat macam nilai *lambda* (λ) yang dihasilkan pada proses pembakaran *Spark Ignition Engine*^[7], yaitu:

1. $\lambda = 1$; massa udara yang dicampurkan pada bahan bakar sesuai dengan teori.
2. $\lambda < 1$; kondisi dimana massa udara yang dicampurkan dengan bahan bakar lebih sedikit dibandingkan kondisi *stoichiometric*, atau yang biasa disebut campuran kaya.
3. $\lambda > 1$; kondisi dimana massa udara yang dicampurkan dengan bahan bakar lebih banyak dibandingkan dengan kondisi *stoichiometric*, atau biasa disebut campuran miskin.
4. $\lambda > 1,5$; campuran bahan bakar dan udara tidak dapat dibakar dengan sempurna, kondisi ini dapat mengakibatkan mesin tersendat-sendat.

Gambar 2 merupakan grafik perbandingan daya dan konsumsi bahan bakar.



Gambar 2 Grafik Perbandingan Daya dan Konsumsi Bahan Bakar^[7]

Spark Ignition Engine yang dimodelkan dalam bentuk persamaan atau disebut juga *Mean Value Engine Model*^[5] (MVEM) memiliki tiga subsistem penting yang menggambarkan dinamika aliran massa udara (*manifold filling dynamics*), dinamika aliran bahan bakar (*fuel flow dynamics*), dan percepatan dari poros engkol (*crank shaft dynamics*). Berikut persamaan *state fuel flow dynamics* pada *spark ignition engine*:

$$\dot{m}_{ff} = \frac{1}{\tau_f} (-\dot{m}_{ff} + X_f \dot{m}_{fi}) \quad (1)$$

$$\dot{m}_{fv} = (1 - X_f) \dot{m}_{fi} \quad (2)$$

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{fv} + \dot{m}_{ff}$$

(3) Parameter-parameter ini beroperasi pada titik kerja dan dengan demikian model tidak linier meskipun bentuk linier^[6]. Parameter model dari aliran bahan bakar dapat dilakukan pendekatan dan dinyatakan dalam *state* bagian model sebagai berikut:

$$\tau_f(p_i, n) = 1,35 \times (-0,672n + 1,68) \times \quad (4)$$

$$(p_i - 0,825)^2 + (-0,06 \times n + 0,15) + 0,56$$

$$X_f(p_i, n) = -0,277 p_i - 0,055n + 0,68 \quad (5)$$

Berikut persamaan *state manifold filling dynamics* untuk massa udara yang masuk ke *intake manifold*:

$$\dot{m}_{ap}(n, p_i) = \frac{V_d}{120RT_i} (e_v \cdot p_i) n \quad (6)$$

Pada persamaan aliran massa udara (*air mass flow*) itu ternyata tidak mudah untuk model efisiensi volumetrik (e_v) secara langsung melainkan dengan kuantitas^[3], berikut persamaannya:

$$e_v \cdot p_i = s_i(n) p_i + y_i(n) \quad (7)$$

Berikut persamaan *state* massa udara yang melewati *throttle valve*:

$$\dot{m}_{at}(u, p_i) = m_{at} \frac{p_a}{\sqrt{T_a}} \beta_1(u) \beta_2(p_r) + m_{at0} \quad (8)$$

$$\beta_1(u) = 1 - \cos(u) - \frac{u^2}{2!} \quad (9)$$

$$p_r = \frac{p_i}{p_a} \quad (10)$$

$$\beta_2(p_r) = \begin{cases} \sqrt{1 - \left(\frac{p_r - p_c}{1 - p_c}\right)^2}, & \text{if } p_r \geq p_c \\ 1 & \text{if } p_r < p_c \end{cases} \quad (11)$$

Sedangkan persamaan *state* tekanan intake manifold dalam keadaan adiabatik sebagai berikut:

$$\dot{p}_i = \frac{\kappa R}{V_i} (-\dot{m}_{ap} T_i + \dot{m}_{at} T_a + \dot{m}_{EGR} T_{EGR}) \quad (12)$$

Suhu intake manifold harus diketahui secara akurat dan *instantaneously* (segera), berikut persamaan *state* suhu intake manifold:

$$\dot{T}_i = \frac{RT_i}{p_i V_i} [-\dot{m}_{ap} (\kappa - 1) T_i + \dot{m}_{at} (\kappa T_a - T_i) + \dot{m}_{EGR} (\kappa T_{EGR} - T_i)] \quad (13)$$

Berikut persamaan *state* crank shaft dynamics pada spark ignition engine:

$$\dot{n} = -\frac{1}{I_n} (P_f(p_i, n) + P_p(p_i, n) + P_b(n)) + \frac{1}{I_n} H_u \eta_i(p_i, n, \lambda) \dot{m}_f(t - \Delta\tau_d) \quad (14)$$

Dimana I adalah skala momen inersia mesin dan beban di mana rata-rata waktu tunda injeksi atau torsi telah diperhitungkan dengan variabel $\Delta\tau_d$.

Berikut persamaannya:

$$I = I_{ac} \left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 \cdot 1000 \quad (15)$$

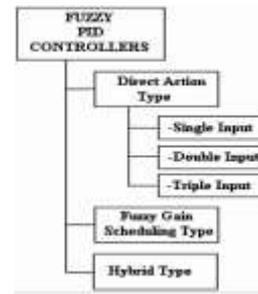
$$\Delta\tau_d = \frac{60}{n} \left(1 + \frac{1}{n_{cyl}}\right) \quad (16)$$

Untuk aliran massa bahan bakar yang masuk ke intake manifold sebagai berikut:

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ap}}{\lambda_{des} L_{th}} \quad (17)$$

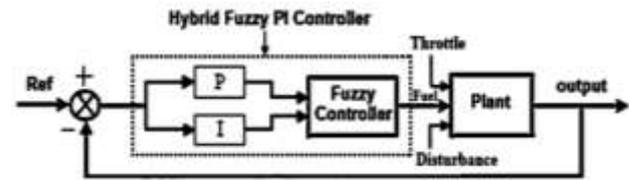
2.2 Metode Kontrol Hybrid Fuzzy PI

Kontrol fuzzy PI pada literatur dapat diklasifikasikan ke dalam 3 kategori besar, yakni tipe *direct action*, tipe *fuzzy gain scheduling*, dan tipe *hybrid fuzzy PI*^[8]. Klasifikasi kontrol fuzzy PI dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Klasifikasi kontrol fuzzy PI^[8]

Kontrol fuzzy PI tipe *hybrid* merupakan gabungan kontrol proporsional integral (PI) dengan kontrol fuzzy. Penentuan *input fuzzy* berasal dari keluaran kontrol PI. Karena menggunakan kontrol PI paralel maka *input fuzzy* berjumlah 2 yaitu kontrol proporsional dan kontrol integral. Gambar 4 merupakan diagram blok kontrol *hybrid fuzzy PI*.



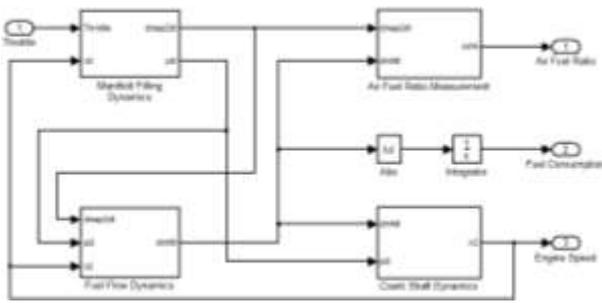
Gambar 4 Diagram blok kontrol hybrid fuzzy PI

2.3 Perancangan Simulasi

Perancangan sistem terdiri dari perancangan *plant spark ignition engine*, sistem kontrol PI, dan sistem kontrol *hybrid fuzzy PI*. Perancangan tersebut menggunakan program bantu untuk simulasi yaitu *Matlab 2012a*. Pada aplikasi program *Matlab* ini digunakan beberapa sub program, yaitu *Matlab Command Window*, *Matlab Editor/Debugger*, *FIS Editor*, dan *Matlab Simulink*.

2.3.1 Perancangan Plant Spark Ignition Engine

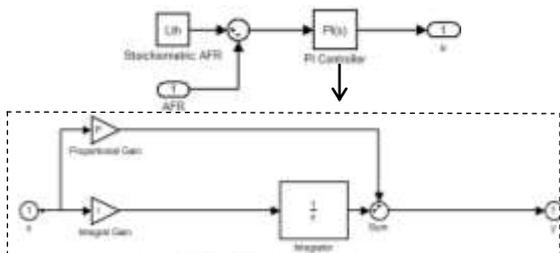
Persamaan (2.1) hingga persamaan (2.16) merupakan persamaan model matematika dari sistem *spark ignition engine*. Pada model tersebut terdapat beberapa parameter yang dibutuhkan untuk dipanggil ke *workspace*. Gambar 5 menunjukkan semua sub sistem dari sistem *spark ignition engine*. Berikut gambar *plant* sistem:



Gambar 5 Sistem spark ignition engine

2.3.2 Perancangan Metode Kontrol PI

Sistem spark ignition engine yang digunakan pada penelitian memiliki respon yang cepat, sehingga dipilih kontrol PI. Blok ini merupakan perwakilan 2 macam kontrol, yakni kontrol proporsional dan kontrol integral yang dijadikan satu dalam satu blok diagram. Kedua kontrol ini diharapkan akan saling bekerja sama untuk menghasilkan sinyal kontrol yang lebih optimal jika dibandingkan saat berdiri sendiri. Pada penelitian ini struktur blok kontrol PI yang digunakan adalah struktur PI ideal paralel yang tidak saling tergantung. Gambar 6 menunjukkan struktur PI ideal yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 6 Sinyal kontrol yang masuk ke fuel flow dynamics

Perancangan kontroler PI untuk sistem menggunakan masukan sinyal step dengan memperhatikan range masukan sistem dan mengamati sinyal keluaran sistem. Proses tuning dilakukan secara trial and error. Mula-mula menentukan kondisi awal kontroler dengan nilai konstanta $P=5 \times 10^{-7}$ dan $I=5 \times 10^{-5}$. Kemudian, menambahkan nilai konstanta P dan I secara bertahap. Penambahan nilai konstanta P dan I dihentikan jika penambahan nilai yang lebih tinggi menyebabkan kontroler hybrid fuzzy PI tidak bekerja. Pemilihan nilai konstanta yang akan digunakan, ditentukan dari nilai IAE (Integral Area Error) yang paling kecil dengan menggunakan rangkaian simulink. Percobaan yang dilakukan untuk tuning kontroler PI secara trial and error dilakukan sebanyak 4 variasi konstanta PI. Berikut tabel perbandingan nilai IAE dari air fuel ratio.

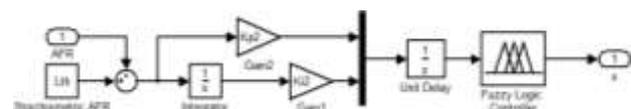
Tabel 1 Perbandingan nilai IAE dari AFR dengan tuning PI

No.	Air Fuel Ratio		
	Kp	Ki	IAE
1	5×10^{-7}	5×10^{-5}	7,054
2	1×10^{-6}	1×10^{-4}	4,965
3	5×10^{-6}	5×10^{-4}	1,581
4	1×10^{-5}	1×10^{-3}	0,8806

Dari Tabel 1 dapat diketahui bahwa nilai konstanta PI yang menghasilkan nilai IAE terkecil adalah $K_p=1 \times 10^{-5}$ dan $K_i=1 \times 10^{-3}$ untuk sistem yang selanjutnya akan menjadi masukan fuzzy pada kontroler hybrid fuzzy PI.

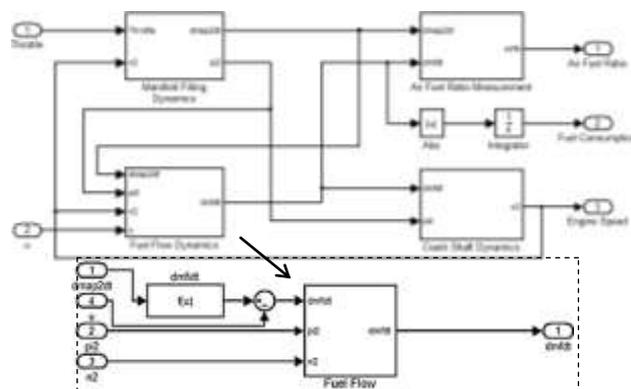
2.3.3 Perancangan Metode Kontrol Hybrid Fuzzy PI

Setelah mendapatkan parameter kontrol proporsional (K_p) dan integral (K_i) selanjutnya akan dijadikan masukan untuk fuzzy logic controller dan menghasilkan satu keluaran berupa control output (u). Gambar 7 menunjukkan bahwa sinyal masukan dari kontrol proporsional dan integral diolah melalui serangkaian proses mulai dari fuzzifikasi sampai defuzzifikasi sehingga menghasilkan aksi kontrol untuk mengendalikan sistem.



Gambar 7 Blok Diagram Kontroler Hybrid Fuzzy PI

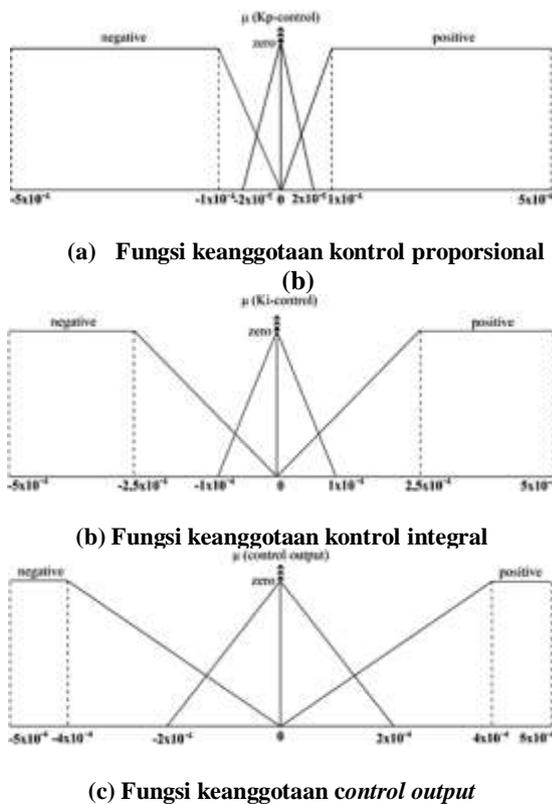
Keluaran dari kontrol hybrid fuzzy PI (u) akan masuk ke dalam subsistem fuel flow dynamics. Sinyal kontrol tersebut akan mengurangi atau menambahi jumlah massa fuel injection / bahan bakar yang disemprotkan dengan tujuan akhir dapat mengimbangi jumlah massa udara sehingga perbandingan keduanya sesuai dengan yang diinginkan yaitu 14,67. Untuk penggambaran sinyal kontrol yang masuk ke subsistem sebagai berikut:



Gambar 8 Sinyal kontrol yang masuk ke fuel flow dynamics

Berdasarkan hasil analisis pada sistem spark ignition engine didapatkan masukan kontrol proporsional, kontrol integral, dan keluaran control output. Analisis dilakukan dengan coba-coba (trial and error) sampai diperoleh

pengendali yang optimal. Gambar 9 memperlihatkan parameter masing-masing fungsi keanggotaan baik berupa *range* dan skala.



Gambar 9 Fungsi keanggotaan kontrol proporsional, kontrol integral, dan control output

Basis kaidah atau aturan dasar (*rule base*) yang dipakai pada penelitian ini adalah aturan yang berjumlah 9 buah yang merupakan kombinasi dari fungsi keanggotaan kontrol proporsional, kontrol integral yang masing-masing berjumlah 3 himpunan. Berikut tabelnya:

Tabel 2 Aturan dasar fuzzy atau fuzzy rule

Kp-control Ki-control	Negative	Zero	Positive
Negative	Negative	Negative	Negative
Zero	Zero	Zero	Zero
Positive	Positive	Positive	Positive

3. Hasil dan Analisa

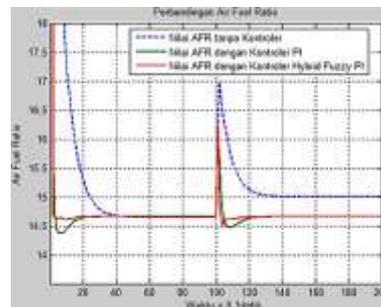
3.1 Pengujian Perbandingan Sistem Tanpa Kontroler, Kontroler PI dan Kontroler Hybrid Fuzzy PI Untuk Gangguan Pada Air Charge

Pada bagian ini dilakukan perbandingan *air fuel ratio*, kecepatan mesin, konsumsi bahan bakar dan *integral area error* dari *air fuel ratio* pada sistem tanpa kontroler, kontroler PI dan kontroler *hybrid fuzzy PI* dengan memberikan gangguan pada *air charge*. Dalam pengujian

ini, masukan dari sistem terdiri dari masukan *step up* dan *step down*.

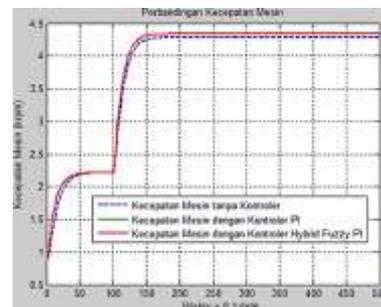
3.1.1 Input Step Up dan Step Down dengan Gangguan Positif dan Negatif pada Air Charge

Masukan pada pengujian ini berupa sinyal *step up* dan *step down*. Nilai awal masukan *step up* adalah 20° dan berubah menjadi 40° pada saat 10 detik. Sedangkan nilai awal masukan *step down* adalah 40° dan berubah menjadi 20° pada saat 10 detik. Untuk nilai awal masukan gangguan positif adalah 0 dan berubah menjadi 0.001 kg serta -0.001 kg untuk gangguan negatif pada saat 10 detik mengikuti perubahan masukan sistem atau *throttle*. Berikut hasil pengujian dengan masukan *step up* dengan gangguan positif pada *air charge* yaitu:



Gambar 10 Grafik perbandingan *air fuel ratio* dengan masukan *step up* dan gangguan positif pada *air charge*

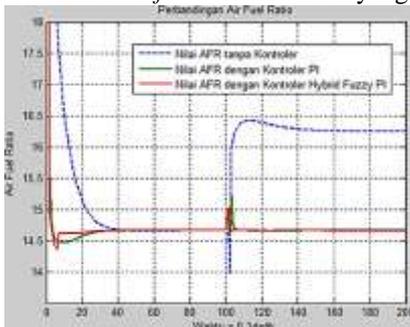
Pada Gambar 10 terlihat respon kontrol *air fuel ratio* sistem tanpa kontroler kurang bagus karena tidak dapat mempertahankan nilai *set point* 14,67 ketika diberi gangguan positif pada *air charge* dan menyebabkan nilai *air fuel ratio* lebih besar dari 14,67 sedangkan respon sistem dengan kontroler PI terlihat bagus dan *hybrid fuzzy PI* terlihat paling bagus karena keduanya dapat mempertahankan nilai *set point* 14,67. Berikut gambar grafik perbandingan kecepatan mesinnya:



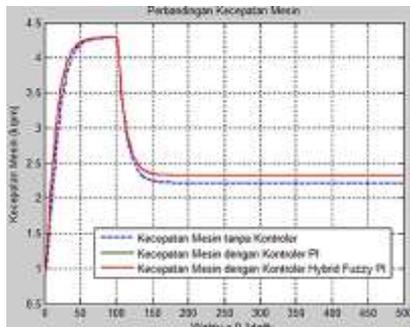
Gambar 11 Grafik perbandingan kecepatan mesin dengan masukan *step up* dan gangguan positif pada *air charge*

Pada Gambar 11 terlihat perbedaan nilai kecepatan mesin antara sistem tanpa kontroler dengan kontroler PI dan

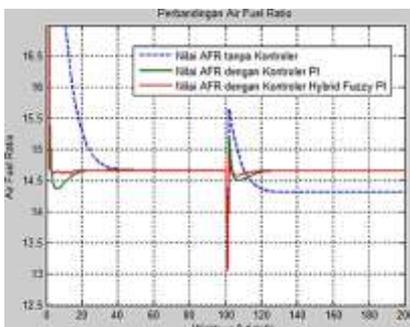
hybrid fuzzy PI namun perbedaan sangat kecil sekali antara sistem dengan kontroler PI dan sistem dengan kontroler hybrid fuzzy PI hingga tidak terlihat pada range keseluruhan akan tetapi secara kesimpulan respon awal kecepatan mesin pada sistem dengan kontroler lebih bagus daripada sistem tanpa kontroler. Pada saat detik ke-10 dan detik seterusnya nilai kecepatan mesin pada sistem tanpa kontroler berada di bawah dari sistem dengan kontroler karena nilai *air fuel ratio* sistem tanpa kontroler berada di atas 14,67 yang berarti nilai nilai massa *fuel* dalam *manifold* lebih kecil daripada sistem dengan kontroler. Nilai kecepatan mesin berbanding lurus dengan jumlah bahan bakar dalam *manifold*. Berikut hasil yang lain:



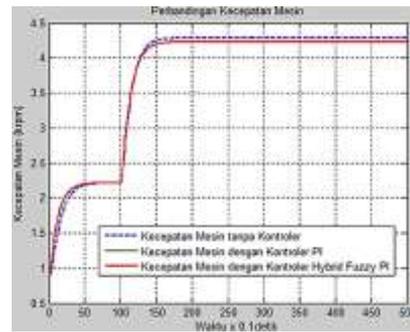
Gambar 12 Grafik perbandingan *air fuel ratio* dengan masukan *step down* dan gangguan positif pada *air charge*



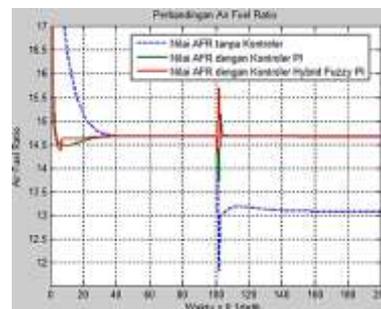
Gambar 13 Grafik perbandingan kecepatan mesin dengan masukan *step down* dan gangguan positif pada *air charge*



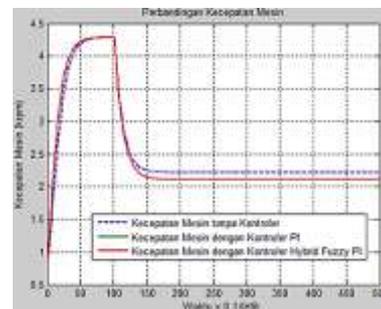
Gambar 14 Grafik perbandingan *air fuel ratio* dengan masukan *step up* dan gangguan negatif pada *air charge*



Gambar 15 Grafik perbandingan kecepatan mesin dengan masukan *step up* dan gangguan negatif pada *air charge*



Gambar 16 Grafik perbandingan *air fuel ratio* dengan masukan *step down* dan gangguan negatif pada *air charge*



Gambar 17 Grafik perbandingan kecepatan mesin dengan masukan *step down* dan gangguan negatif pada *air charge*

Dari hasil keseluruhan grafik perbandingan *air fuel ratio* diatas didapat perbandingan nilai *integral area error* dari *air fuel ratio* berikut tabelnya:

Tabel 3 Perbandingan nilai *integral area error*

Input dan gangguan	Integral Area Error dari AFR		
	Tanpa Kontroler	Kontroler PI	Hybrid Fuzzy PI
Step up dan gangguan positif	22,7	0,9657	0,5399
Step down dan gangguan positif	68,73	0,7934	0,5112
Step up dan	21,15	0,8008	0,5042

gangguan nrgatif			
Step down dan gangguan negatif	68,34	0,8562	0,7585

Integral area error digunakan untuk menganalisis metode kontrol mana yang memiliki pengontrolan yang lebih baik. Semakin kecil nilai integral area error menunjukkan output sistem semakin baik. Dari Tabel 3 terlihat sistem dengan kontroler Hybrid Fuzzy PI yang memiliki pengontrolan air fuel ratio terbaik. Untuk perbandingan nilai konsumsi bahan bakar berikut tabelnya:

Tabel 4 Perbandingan nilai konsumsi bahan bakar

Input dan gangguan	Konsumsi Bahan Bakar(kg/50detik)		
	Tanpa Kontroler	Kontroler PI	Hybrid Fuzzy PI
Step up dan gangguan positif	0,1203	0,1247	0,1247
Step down dan gangguan positif	0,05041	0,0541	0,05409
Step up dan gangguan nrgatif	0,1203	0,117	0,1169
Step down dan gangguan negatif	0,05041	0,04865	0,04863

Dari Tabel 4, konsumsi bahan bakar bersifat relatif sesuai dengan gangguan. Pada gangguan positif sistem dengan kontroler lebih boros daripada sistem tanpa kontroler karena dengan penambahan gangguan positif pada air charge membuat massa bahan bakar dalam manifold pada sistem yang dikontrol berusaha mengimbangi jumlah massa udara dalam manifold agar mencapai nilai stoichiometric air fuel ratio yaitu 14,67 sedangkan pada sistem tanpa kontroler jumlah massa udara bertambah tidak membuat jumlah massa bahan bakar ikut bertambah karena tidak adanya kontroler yang berusaha menjaga nilai air fuel ratio tetap pada 14,67. Begitu juga sebaliknya dengan gangguan negatif pada air charge.

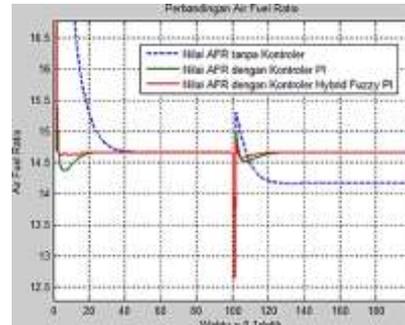
3.2 Pengujian Perbandingan Sistem Tanpa Kontroler, Kontroler PI dan Kontroler Hybrid Fuzzy PI Untuk Gangguan Pada Fuel Injector

Pada bagian ini dilakukan perbandingan air fuel ratio, kecepatan mesin, konsumsi bahan bakar dan integral area error dari air fuel ratio pada sistem tanpa kontroler, kontroler PI dan kontroler hybrid fuzzy PI dengan memberikan gangguan pada fuel injector. Dalam pengujian ini, masukan dari sistem terdiri dari masukan step up dan step down.

3.2.1 Input Step Up dan Step Down dengan Gangguan Positif dan Negatif pada Fuel Injector

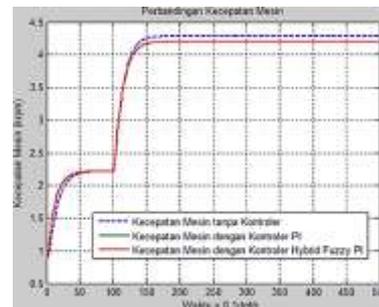
Masukan pada pengujian ini berupa sinyal step up dan step down. Nilai awal masukan step up adalah 20° dan berubah menjadi 40° pada saat 10 detik. Sedangkan nilai awal masukan step down adalah 40° dan berubah menjadi 20°

pada saat 10 detik. Untuk nilai awal masukan gangguan positif adalah 0 dan berubah menjadi 0.0001 kg serta - 0.0001 kg untuk gangguan negatif pada saat 10 detik mengikuti perubahan masukan sistem atau throttle. Berikut hasil pengujian dengan masukan step up dengan gangguan positif pada fuel injector yaitu:



Gambar 18 Grafik perbandingan air fuel ratio dengan masukan step up dan gangguan positif pada fuel injector

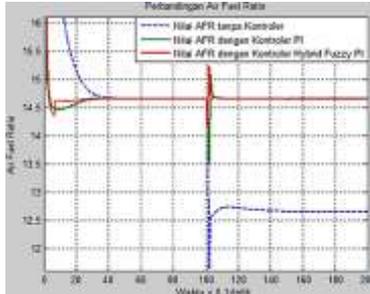
Pada Gambar 18 terlihat respon air fuel ratio sistem tanpa kontroler kurang bagus karena tidak dapat mempertahankan nilai set point 14,67 ketika diberi gangguan positif pada fuel injector dan menyebabkan nilai air fuel ratio lebih kecil dari 14,67 sedangkan respon sistem dengan kontroler PI terlihat bagus dan hybrid fuzzy PI terlihat paling bagus karena keduanya dapat mempertahankan nilai set point 14,67. Berikut gambar grafik perbandingan kecepatan mesinnya:



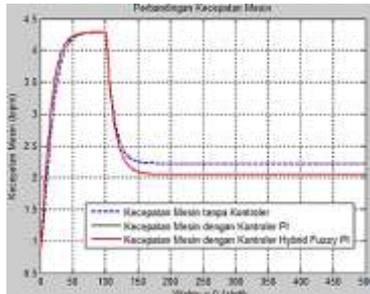
Gambar 19 Grafik perbandingan kecepatan mesin dengan masukan step up dan gangguan positif pada fuel injector

Pada Gambar 19 terlihat perbedaan nilai kecepatan mesin antara sistem tanpa kontroler dengan kontroler PI dan hybrid fuzzy PI namun perbedaan sangat kecil sekali antara sistem dengan kontroler PI dan sistem dengan kontroler hybrid fuzzy PI hingga tidak terlihat pada range keseluruhan akan tetapi secara kesimpulan respon awal kecepatan mesin pada sistem dengan kontroler lebih bagus daripada sistem tanpa kontroler. Pada saat detik ke-10 dan detik seterusnya nilai kecepatan mesin pada sistem tanpa kontroler berada di atas dari sistem dengan kontroler karena nilai air fuel ratio sistem tanpa kontroler

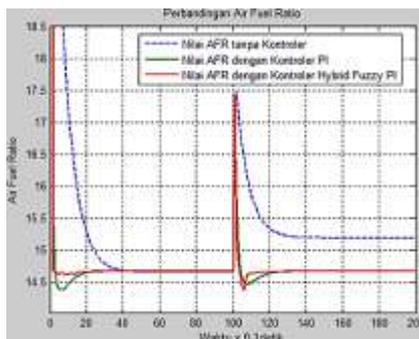
berada di bawah 14,67 yang berarti nilai nilai massa *fuel* dalam *manifold* lebih besar daripada sistem dengan kontroler. Nilai kecepatan mesin berbanding lurus dengan jumlah bahan bakar dalam *manifold*. Berikut hasil yang lain:



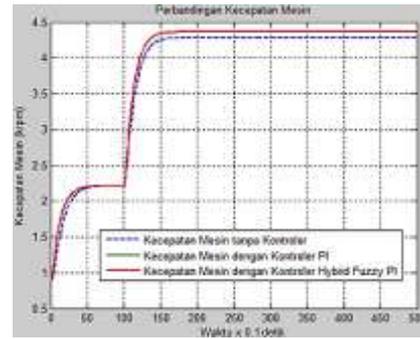
Gambar 20 Grafik perbandingan *air fuel ratio* dengan masukan *step down* dan gangguan positif pada *fuel injector*



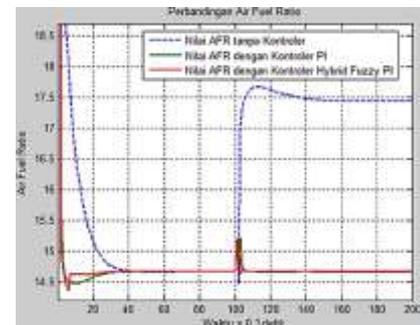
Gambar 21 Grafik perbandingan kecepatan mesin dengan masukan *step down* dan gangguan positif pada *fuel injector*



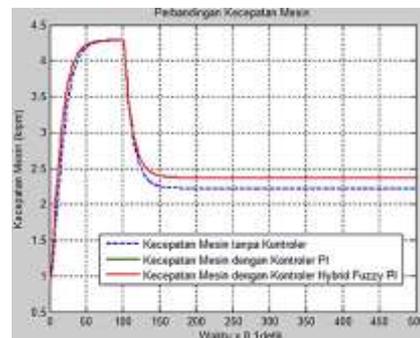
Gambar 22 Grafik perbandingan *air fuel ratio* dengan masukan *step up* dan gangguan negatif pada *fuel injector*



Gambar 23 Grafik perbandingan kecepatan mesin dengan masukan *step up* dan gangguan negatif pada *fuel injector*



Gambar 24 Grafik perbandingan *air fuel ratio* dengan masukan *step down* dan gangguan negatif pada *fuel injector*



Gambar 25 Grafik perbandingan kecepatan mesin dengan masukan *step down* dan gangguan negatif pada *fuel injector*

Dari hasil keseluruhan grafik perbandingan *air fuel ratio* diatas didapat perbandingan nilai *integral area error* dari *air fuel ratio* dan perbandingan nilai konsumsi bahan bakar. Berikut tabel perbandingan *integral area error*:

Tabel 5 Perbandingan nilai *integral area error*

Input dan gangguan	Integral Area Error dari AFR		
	Tanpa Kontroler	Kontroler PI	Hybrid Fuzzy PI
Step up dan gangguan positif	26,64	0,7639	0,4869

Step down dan gangguan positif	85,24	0,8623	0,7997
Step up dan gangguan nrgatif	30,12	1,012	0,6161
Step down dan gangguan negatif	115,9	0,7958	0,6885

Integral area error digunakan untuk menganalisis metode kontrol mana yang memiliki pengontrolan yang lebih baik. Semakin kecil nilai *integral area error* menunjukkan *output* sistem semakin baik. Dari Tabel 5 terlihat sistem dengan kontroler *Hybrid Fuzzy PI* yang memiliki pengontrolan *air fuel ratio* terbaik. Untuk perbandingan nilai konsumsi bahan bakar berikut tabelnya:

Tabel 6 Perbandingan nilai konsumsi bahan bakar

Input dan gangguan	Konsumsi Bahan Bakar(kg/50detik)		
	Tanpa Kontroler	Kontroler PI	Hybrid Fuzzy PI
Step up dan gangguan positif	0,1203	0,1151	0,1151
Step down dan gangguan positif	0,05041	0,04736	0,04735
Step up dan gangguan nrgatif	0,1203	0,1265	0,1265
Step down dan gangguan negatif	0,05041	0,05537	0,05536

Dari Tabel 6 terlihat konsumsi bahan bakar bersifat relatif sesuai dengan gangguan. Pada gangguan positif sistem dengan kontroler lebih irit daripada sistem tanpa kontroler karena dengan penambahan gangguan positif pada *fuel injector* membuat massa bahan bakar dalam *manifold* pada sistem yang dikontrol berusaha mengimbangi jumlah massa udara dalam *manifold* agar mencapai nilai *stoichiometric air fuel ratio* yaitu 14,67 sedangkan pada sistem tanpa kontroler jumlah massa bahan bakar bertambah dan tidak bisa mengurangi jumlahnya karena tidak adanya kontroler yang berusaha menjaga nilai *air fuel ratio* tetap pada 14,67. Begitu juga sebaliknya dengan gangguan negatif pada *fuel injector*.

4. Kesimpulan

Nilai kecepatan mesin sistem dengan menggunakan kontroler memiliki respon awal yang lebih baik daripada sistem tanpa kontroler serta konsumsi bahan bakar bersifat relatif tergantung gangguan. Metode kontrol *hybrid fuzzy PI* memiliki respon *air fuel ratio* terbaik karena memiliki nilai *integral area error* terkecil. Untuk penelitian lebih lanjut, diharapkan menggunakan kontrol *robust fuzzy* karena sistem *spark ignition engine* bersifat non linier serta memperhitungkan *exhaust gas recirculation* (EGR) atau gas buangan yang disirkulasi. Selain itu diharapkan menambahkan perhitungan torsi dari mesin untuk kriteria performa yang lebih baik.

Referensi

- [1]. Ali Ghaffari, A. Hosein Shamekhi, Akbar Saki, dan Ehsan Kamrani, *Adaptive Fuzzy Control for Air-Fuel Ratio of Automobile Spark Ignition Engine*, World Academy of Science, Engineering and Technology 24, 2008.
- [2]. Basil Hamed, Ahmad El Khateb, *Hybrid Fuzzy Fed PID Control of Nonlinear System*, Electrical Engineering Department, Islamic University of Gaza, 2010.
- [3]. Elbert Hendricks, Chevalier A., Jensen M., Sorenson S., Asik J., dan Trumpy D., *Modelling of the Intake Manifold Filling Dynamics*, Technical Paper No. 960037, 1996.
- [4]. Elbert Hendricks, Donn Engler, Marco Fam, *A Generic Mean Value Engine Model for Spark Ignition Engines*, Institute of Automatic Control System, Denmark Technical University, 2000.
- [5]. Elbert Hendricks, Sorenson S., *Mean Value Modelling for Spark Ignition Engines*, Technical Paper No. 900616, Transactions of the SAE, 1990.
- [6]. Elbert Hendricks, Vesterholm T., Kaidantzis P., Rasmussen P., dan Jensen M., *Nonlinear Transient Fuel Film Compensation*, Technical Paper No. 930767, 1993.
- [7]. Hendre Angga P, Rusdhianto Effendi A. K, *Penerapan PID Predictive Air-Ratio Controller Pada Mesin Mobil Mitsubishi Tipe 4G63 Untuk Meminimumkan Emisi Gas Buang*, Teknik Elektro, ITS, 2012.
- [8]. Isin E., Ibrahim E., Engin Y., dan Mujde G., *An Intelligent Hybrid Fuzzy PID Controller*, Control Engineering Department, Istanbul, 2006.
- [9]. Suhendi, *Perancangan Engine Control Unit Berbasis Knowledge Based Untuk Pengaturan Sistem Injeksi Dan Sistem Pengapian Motor Bakar*, Teknik Elektro, ITS,
- [10]. S.W. Wang, D.L. Yu, *Adaptive RBF network for parameter estimation and stable air-fuel ratio control*, Control Systems Research Group, School of Engineering, Liverpool John Moores University, 2008.
- [11]. ---, Prinsip Kerja Motor Bensin,