

# DESAIN SISTEM KONTROL RASIO PERBANDINGAN UDARA DAN BAHAN BAKAR (AFR) PADA MESIN 4 LANGKAH DENGAN METODE PENALAN PID BERBASIS LOGIKA FUZZY

Muhammad Danang Nuralamsyah<sup>\*)</sup>, Aris Triwiyatno, and Budi Setiyono

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

<sup>\*)</sup>E-mail: danang.elektro@gmail.com

## Abstrak

Untuk menjaga supaya pemakaian bahan bakar pada mesin spark ignition tipe 4 langkah pada kondisi optimal, dapat diatasi dengan cara mengatur jumlah injeksi bahan bakar terhadap setiap perubahan unjuk kerja sistem. Dengan adanya pengaturan terhadap injeksi bahan bakar akan meningkatkan efektifitas pembakaran yang secara tidak langsung juga mengurangi kadar emisi pada gas buang. Pada Tugas Akhir ini, akan dilakukan penelitian tentang sistem cerdas injeksi bahan bakar untuk mengoptimalkan Air to Fuel Ratio (AFR) pada mesin 4 langkah. Metode kendali yang digunakan adalah kendali Adaptif PID dengan penalaan yang berbasis logika fuzzy pada tiap parameternya. Hasil perancangan Adaptif PID dibandingkan dengan sistem tanpa kontroler dan PID kontroler konvensional. Berdasarkan simulasi menggunakan Matlab, menunjukkan bahwa respon sistem mesin 4 langkah dengan kontroler Adaptif PID berbasis logika fuzzy yang dirancang memiliki faktor ketahanan yang paling baik, rise time yang paling cepat, overshoot yang kecil dan integral area error (IAE) paling rendah dibanding dengan metode uji yang lain.

*Kata kunci : spark ignition, air to fuel ratio, adaptif PID*

## Abstract

To keep the fuel consumption in optimal conditions, it can be solved in regulating the quantity of fuel injected to any changes in system performance. With the arrangement of the fuel injection, this condition will increase the effectiveness of combustion, which indirectly also reduce exhaust gas emissions. In this final project, the research is conducted on intelligent systems to optimize the fuel injection of Air to Fuel Ratio (AFR) in Spark Ignition engines. The control method is PID control with fuzzy logic tuning based for each parameter. The Adaptive PID design results is compared with the system without controller and the conventional of PID controller. Based on the simulation using Matlab, it shows that the response of Spark Ignition engine with Adaptive PID controller has a most excellent resistance factor, the fastest rise time, small overshoot and the integral area error lower than other test methods.

*Keyword : spark ignition, air to fuel ratio, adaptive PID*

## 1. Pendahuluan

Mesin-mesin otomotif saat ini dituntut untuk menghasilkan performa yang tinggi dengan konsumsi bahan bakar yang rendah serta menghasilkan nilai emisi yang rendah. Untuk menghasilkan mesin dengan kadar emisi yang rendah dengan performa yang baik dapat diperoleh dengan cara mengatur waktu injeksi bahan bakar<sup>[2]</sup>.

Jika waktu injeksi yang diberikan terlalu lama maka dapat menyebabkan peningkatan emisi gas buang dan penggunaan bahan bakar pada mesin menjadi boros. Jika waktu injeksi yang diberikan terlalu pendek maka injeksi

bahan bakar yang diberikan terlalu sedikit sehingga dapat membakar *valve* pada ruang pembakaran. Jika waktu pengapian yang diberikan tidak tepat maka dapat terjadi detonasi. Oleh karena itu, agar diperoleh lama waktu injeksi dan waktu pengapian yang tepat maka digunakan metode-metode yang dapat memberikan aksi kontrol berupa pulsa lama waktu injeksi dan waktu pengapian yang sesuai dengan kebutuhan sistem pembakaran<sup>[3]</sup>.

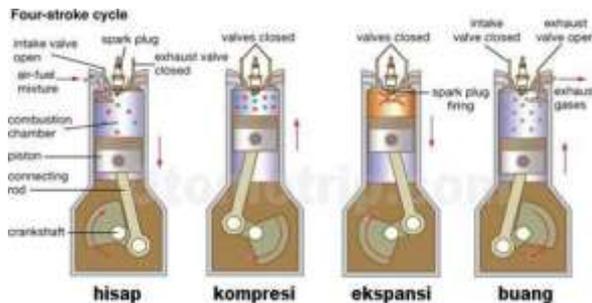
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang suatu pemodelan dari sistem pengontrolan *Air to Fuel Ratio* (AFR) pada mesin Spark Ignition dengan menggunakan metode kontrol *PID gain scheduling* menggunakan logika fuzzy (*PID Fuzzy gain scheduling*) yang diharapkan bisa mengurangi emisi gas buang pembakaran dengan cara

memperhatikan nilai kestabilan dari AFR model sistem pada angka stokiometri. Yang selanjutnya akan dilakukan analisis terhadap model mesin *Spark Ignition* yang telah dirancang berdasarkan unjuk kerja yang dihasilkan.

## 2 Metode

### 2.1 Mesin Spark Ignition

*Spark Ignition Engine* (Mesin Pengapian Busi) merupakan salah satu jenis mesin bakar yang membutuhkan pemicu 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<sup>[7]</sup>. Mesin pengapian busi memiliki 4 siklus berurutan, yaitu siklus hisap (*intake*), siklus kompresi (*compression*), siklus pembakaran (*combustion*) atau siklus kerja (*power*), dan siklus buang (*exhaust*)<sup>[11]</sup>. Ilustrasi dari tiap siklus dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Siklus kerja mesin 4 langkah<sup>[12]</sup>

Model *Spark Ignition Engine* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan model *Spark Ignition Engine* yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya<sup>[4]</sup>. Telah dipaparkan bahwa sistem *Spark Ignition Engine* mempunyai 3 subsistem penyusun penting yang menggambarkan perilaku aliran massa bahan bakar (*air pressure and temperature manifold*), aliran bahan bakar (*intake manifold/ fuel flow dynamics*), dan percepatan dari poros engkol (*crankshaft*).

#### ▪ Fuel Flow Dynamics

Dengan menggunakan karakteristik massa aliran bahan bakar pada mesin yang telah dilakukan oleh Elbert Hendricks<sup>[4]</sup> pada penelitiannya di Technical University of Denmark, didapatkan persamaan sebagai berikut.

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

$$m_f(s) = ((1 - X_f) m_{fi}(s) + \frac{1}{\tau_f} (-m_{ff}(s) + X_f m_{fi}(s))) \times \frac{1}{s} \quad (2)$$

#### ▪ Manifold Filling Dynamics

Didalam subsistem *manifold filling dynamics* terdapat dua subsistem penyusun, yaitu *air pressure manifold* dan *air temperature manifold*.

$$\dot{p}_i = \frac{R T_i}{V_i} (-\dot{m}_{at} + \dot{m}_{ap} + \dot{m}_{EGR}) \quad (3)$$

$$p_i(s) = \frac{R T_i}{V_i} \left( \frac{-\dot{m}_{at}(s) + \dot{m}_{ap}(s) + \dot{m}_{EGR}(s)}{s} \right) \times \frac{1}{s} \quad (4)$$

Sedangkan untuk persamaan *air temperature manifold* terdapat pada persamaan (6). Persamaan state ini menggambarkan perkembangan waktu variabel dengan menggunakan konservasi tinggi.

$$\dot{T}_i = \frac{R T_i}{p_i V_i} \left( \frac{\dot{m}_{ap}(k-1)T_i + \dot{m}_{at}(k.T_a - T_i) + \dot{m}_{EGR}(k.T_{EGR} - T_i)}{s} \right) \quad (5)$$

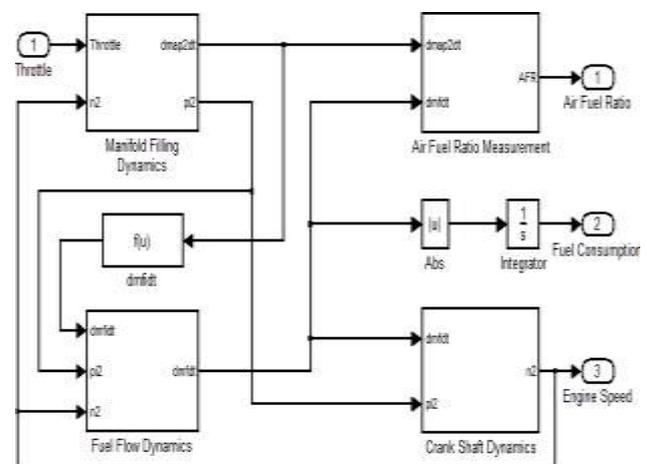
#### ▪ Crank Shaft Speed

Subsistem terakhir adalah dinamika dari poros engkol (*crank shaft*). Didalam subsistem kecepatan *crank shaft* daya dari gesekan, pompaan, beban, momen inersia dan delay dari torsi *crank shaft* adalah salah satu faktor yang mempengaruhi kecepatan mesin. Persamaan (9) adalah persamaan untuk kecepatan mesin.

$$n(s) = \frac{1}{I_n} \left( (P_f(p_i, n) + P_p(p_i, n) + P_b(n))(s) + \left( \frac{1}{I_n} H_u \eta_i(p_i, n, \lambda) \dot{m}_f(t - \Delta\tau_d) \right) \times \frac{1}{s} \right) \quad (9)$$

### 2.1 Pemodelan Plant Spark Ignition Engine

Persamaan (1) hingga persamaan (9) merupakan persamaan model matematika dari sistem *spark ignition engine*. Pada model tersebut terdapat beberapa parameter yang dibutuhkan untuk dipanggil ke *workspace*. Berikut gambar plant sistem *spark ignition*:



Gambar 2 Sistem *spark ignition engine*.

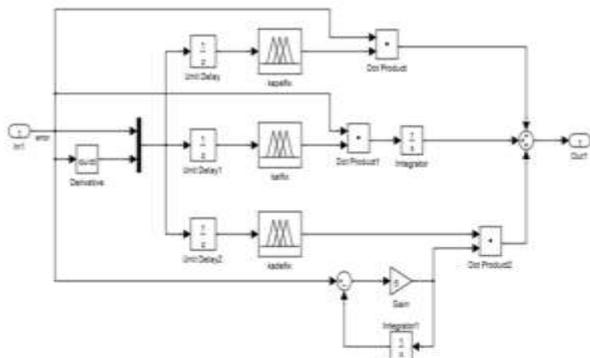
Sedangkan parameter model sistem tersebut ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter fisik model<sup>[4]</sup>

Parameter	Nilai	Satuan
$T_{EGR}$	293	Kelvin
$T_a$	293	Kelvin
$p_a$	1,013	bar
$H_u$	$4,3 \times 10^4$	-
$R$	$287 \times 10^{-5}$	Kg/detik
$L_{th}$	14,67	Air/fuel ratio
$Lam$	1	-
$I_{ac}$	0,48	Kg m2
$d_{megrdt}$	0	kg/detik
$V_d$	1,275	liter
$k$	1,4	-
$p_{i2ini}$	0,23926	bar
$T_{i2ini}$	293	kelvin
$n_{2ini}$	0,9	krpm
$p_{i2}$	0,24	bar
$T_{i2}$	293	kelvin
$V_i$	$1,692 \times 10^{-5}$	J/kg °F

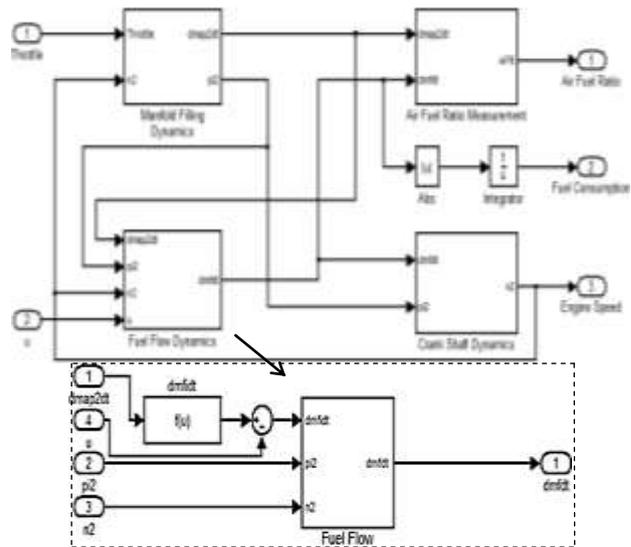
## 2.2 Perancangan Kontrol Adaptif PID Berbasis LogikaFuzzy

Pada tugas akhir ini logika fuzzy digunakan untuk mengubah parameter pengendali PID yaitu nilai  $K_p$  (*proportional gain*),  $K_i$  (*integral gain*), dan  $K_d$  (*derivative gain*). Terdapat dua masukan pada sistem logika fuzzy nya, yaitu nilai *error* dan *delta error*. Blok diagram sistem pengendalian Adaptif PID berbasis logika fuzzy ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Simulink kontroler Adaptif PID

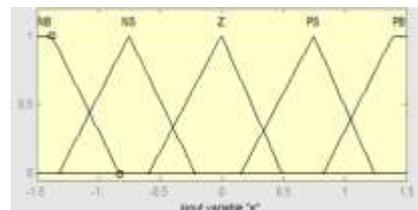
Keluaran dari kendali Adaptif PID (u) akan masuk ke dalam subsistem *fuel flow dynamics*. Sinyal kendali tersebut akan mengurangi atau menambahi jumlah massa *fuel injection* / bahan bakar yang disemprotkan dengan tujuan akhir dapat mengimbangi jumlah massa udara sehingga perbandingan keduanya sesuai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



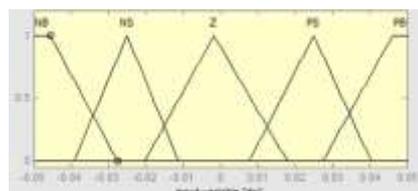
Gambar 4. Sinyal kendali Adaptif PID (u)

Langkah-langkah yang dilakukan dalam perancangan kontroler dengan PID *gain scheduling* dengan logika fuzzy menggunakan simulink adalah sebagai berikut :

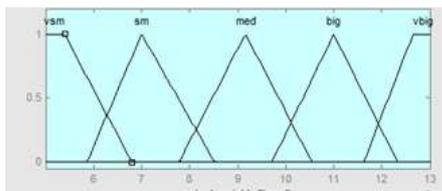
1. Menentukan parameter tuning PID terbaik berdasarkan simulasi pada Simulink
2. Menetapkan data masukan dan keluaran Terdapat 2 masukan, yaitu *error* dan *delta error air to fuel ratio*. Sedangkan untuk keluaran sistem fuzzy ada tiga, yaitu nilai *crisp* dari logika fuzzy yang dimisalkan dengan “*kape*”, “*kai*”, dan “*kade*”.
3. Fuzzifikasi Fungsi keanggotaan yang digunakan pada perancangan ini adalah segitiga sebanyak masing-masing 3 buah dan 2 trapesium sebagai penutup batas range parameter untuk *Error*, *dError* dan *Control Action* (“*Kape*”, “*Kai*”, dan “*Kade*”).



(a)



(b)



(c)

Gambar 5. Fungsi keanggotaan (a) Error, (b) dError, (c) Control Action

4. Membuat aturan fuzzy yang akan digunakan dalam operasi fuzzy  
 Aturan dasar (rule base) yang dipakai pada tugas akhir ini adalah aturan yang berjumlah 25 buah yang merupakan kombinasi dari fungsi keanggotaan Error, dError dan Control Action.

Tabel 2. Tabel aturan dasar

dE	E	NB	NS	Z	PS	PB
NB		vbig	vbig	big	med	med
NS		big	big	sm	med	med
Z		big	big	vsm	sm	sm
PS		med	med	vsm	sm	big
PB		sm	sm	sm	big	vbig

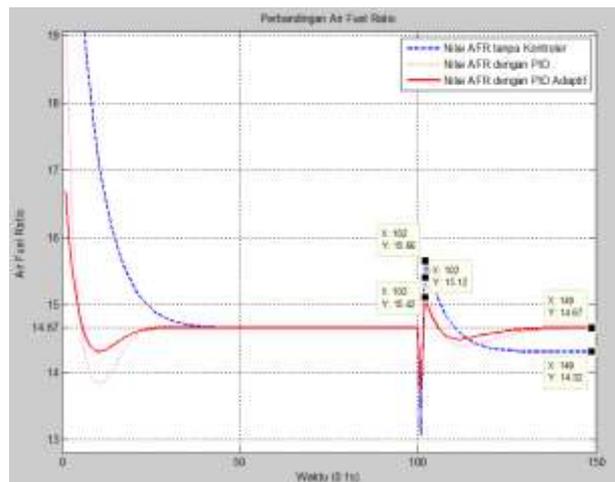
5. Metode pengambilan keputusan (inferensi atau rule evaluation)  
 Pada Tugas Akhir ini, metode pengambilan keputusan yang digunakan adalah metode MAX-MIN (metode Mamdani).
6. Defuzzifikasi.  
 Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah metode centroid. Metode centroid dikenal sebagai metode COA (center of area) atau metode Center of Gravity. Pada metode ini nilai crisp keluarannya diperoleh berdasarkan titik berat dari kurva hasil proses pengambilan keputusan.

### 3. Hasil dan Analisis

#### 3.1 Pengujian Perbandingan Sistem dengan Gangguan Negatif (Berkurangnya Pasokan Udara) pada Air Charge

Dengan memberikan masukan berupa sinyal step up dangangguan negatif (pengurangan suplay udara) pada air charge nya, maka dilakukan beberapa analisa, yaitu:

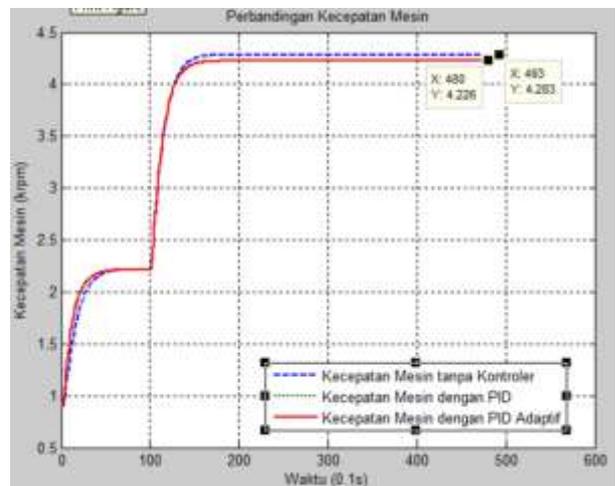
- 1) Perbandingan AFR



Gambar 6. Grafik perbandingan kecepatan mesin sistem dengan gangguan negatif pada air charge

Gambar 6 merupakan perbandingan Air to Fuel Ratio dari ketiga model sistem dengan gangguan pada air charge. Pada sistem tanpa kontroler overshoot dari sistem mencapai 0.99 dari (mencapai angka 15.66), pada sistem dengan kontroler PID AFR hanya mencapai angka 15,42, dan pada sistem dengan menggunakan metode PID fuzzygain scheduling AFR hanya mencapai angka 15,12.

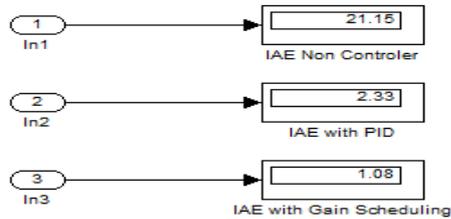
- 2) Perbandingan kecepatan mesin.



Gambar 7. Grafik perbandingan kecepatan mesin sistem dengan gangguan negatif pada air charge

Dari hasil simulasi, sistem dengan kontroler memiliki kecepatan yang lebih baik sebelum mencapai detik ke 10, karena sistem dengan kontroler memiliki rise time yang lebih cepat untuk mencapai set point. Tetapi setelah melewati detik ke 10, sistem tanpa kontroler memiliki kecepatan mesin yang lebih rendah dibanding dengan sistem dengan kontroler, yaitu sebesar 4226 rpm. Hal ini dikarenakan nilai AFR pada sistem tanpa kontroler tidak dapat kembali ke nilai set point nya, pada sistem ini AFR tertahan pada titik 14,32.

3) Perbandingan *integral area error*



Gambar 8. Perbandingan *integral area error* dengan gangguan negatif pada *air charge*

Terlihat bahwa *integral area error* yang paling besar dimiliki oleh sistem tanpa kontroler, yaitu sebesar 21,15. Pada sistem dengan kontroler PID konvensional, besarnya *integral area error* hanya mencapai angka 2,33. Sedangkan pada sistem dengan kontroler PID Adaptifnya mencapai angka 1,08. Hal ini membuktikan sistem dengan kontroler PID sudah cukup baik namun sistem dengan kontroler PID Adaptif memiliki hasil yang lebih baik.

4) Perbandingan konsumsi bahan bakar, torsi, dan daya mesin

Tabel 3. Perbandingan analisis konsumsi bensin, torsi, dan daya mesin pada ketiga model sistem dengan gangguan negatif pada *air charge*

No.	Analisis	Tanpa kontroler	Kontroler PID	Kontroler Adaptif PID
1.	Konsumsi bensin (Kg/50 s)	0,1203	0,1171	0,1169
2.	Torsi (Nm)	137,2	138,4	138,4
3.	Daya (HP)	82,52	82,12	82,12

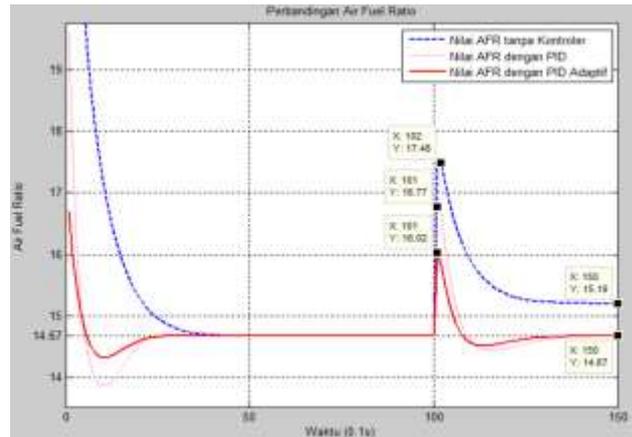
Pada model sistem tanpa kontroler akan mengkonsumsi bensin lebih banyak dibanding sistem dengan kontroler. Karena dengan terjadinya pengurangan pasokan udara pada *air charge* membuat massa bahan bakar yang diinjeksikan pada sistem yang dikontrol berusaha mengimbangi jumlah massa udara agar mencapai nilai *stoichiometric air fuel ratio* yaitu 14,67. Sedangkan pada sistem tanpa kontroler jumlah massa udara berkurang tidak membuat jumlah massa bahan bakar ikut berkurang karena tidak adanya kontroler yang berusaha menjaga nilai *air fuel ratio* tetap pada 14,67.

Sedangkan untuk analisa hasil dari torsi mesin, sistem pembakaran non injeksi memiliki nilai torsi yang lebih kecil dibandingkan dengan sistem dengan kontroler. Tetapi ditinjau dari segi daya mesin, sistem tanpa kontroler (sistem pembakaran konvensional) memiliki daya yang lebih tinggi dibanding dengan sistem *fuel injection*. Hal ini dikarenakan semakin kecil perbandingan konsentrasi udara dengan bahan bakar maka daya yang dihasilkan mesin akan semakin besar.

3.2 Pengujian Perbandingan Sistem dengan Gangguan Negatif (Berkurangnya Pasokan Bahan Bakar) pada *Fuel Injector*

Dengan memberikan masukan berupa sinyal *step up* dangangguan negatif (pengurangan pasokan bahan bakar) pada *fuel injector* nya, maka dilakukan beberapa analisa, yaitu:

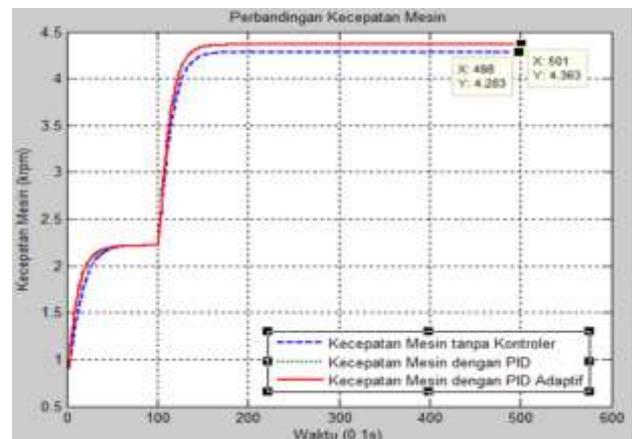
1) Perbandingan AFR



Gambar 9. Grafik perbandingan kecepatan mesin sistem dengan gangguan negatif pada *fuel injector*

Gambar 9 merupakan perbandingan *Air to Fuel Ratio* dari ketiga model sistem dengan gangguan pada sistem *fuel injector*. Pada sistem tanpa kontroler *overshoot* dari sistem mencapai 2,81 dari (mencapai angka 17,48), sedangkan pada sistem dengan kontroler PID AFR hanya mencapai angka 16,77, dan pada sistem dengan menggunakan metode Adaptif PID AFR hanya mencapai angka 16,02.

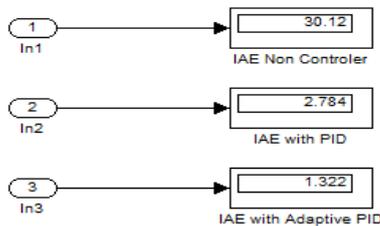
2) Perbandingan kecepatan mesin.



Gambar 10. Grafik perbandingan kecepatan mesin sistem dengan gangguan negatif pada *fuel injector*

Dari hasil simulasi, sistem dengan kontroler memiliki kecepatan yang lebih baik, karena sistem dengan kontroler memiliki *rise time* yang lebih cepat untuk mencapai *set point*. Dan begitu pun setelah melewati detik ke 10 (setelah mengalami gangguan pada *fuel injector*), sistem dengan kontroler memiliki kecepatan mesin yang lebih besar yaitu mencapai 4363 rpm sedangkan sistem tanpa kontroler hanya mencapai 4283 rpm, hal ini dikarenakan nilai AFR pada sistem tanpa kontroler tidak dapat kembali ke nilai *set point* nya, pada sistem ini AFR tertahan pada angka 15,19.

3) Perbandingan integral area error



Gambar 11. Perbandingan *integral area error* dengan gangguan negatif pada *fuel injector*

Terlihat bahwa *integral area error* yang paling besar dimiliki oleh sistem tanpa kontroler, yaitu sebesar 30,12. Pada sistem dengan kontroler PID yang detuning secara *tial error*, besarnya *integral area error* hanya mencapai angka 2,784. Sedangkan pada sistem dengan kontroler PID Adaptif hanya mencapai angka 1,322. Hal ini membuktikan sistem dengan kontroler PID sudah cukup baik namun sistem dengan kontroler PID Adaptif memiliki hasil yang lebih baik.

4) Perbandingan konsumsi bahan bakar, torsi, dan daya mesin

Tabel 3. Perbandingan analisis konsumsi bensin, torsi, dan daya mesin pada ketiga model sistem dengan gangguan negatif pada *fuel injector*

No.	Analisis	Tanpa kontroler	Kontroler PID	Kontroler Adaptif PID
1.	Konsumsi bensin (Kg/50 s)	0,1203	0,126426	0,126439
2.	Torsi (Nm)	133,5	131,3	131,3
3.	Daya (HP)	80,27	80,43	80,43

Pada model sistem tanpa kontroler akan mengkonsumsi bensin lebih sedikit bensin dibanding sistem dengan kontroler. Karena dengan terjadinya pengurangan pasokan bahan bakar membuat massa udara dalam *manifold* pada sistem yang dikontrol berusaha mengimbangi jumlah massa bahan bakar agar mencapai nilai *stoichiometric air fuel ratio* yaitu 14,67. Sedangkan pada sistem tanpa kontroler jumlah massa bahan bakar berkurang tidak membuat jumlah massa udara ikut berkurang karena tidak

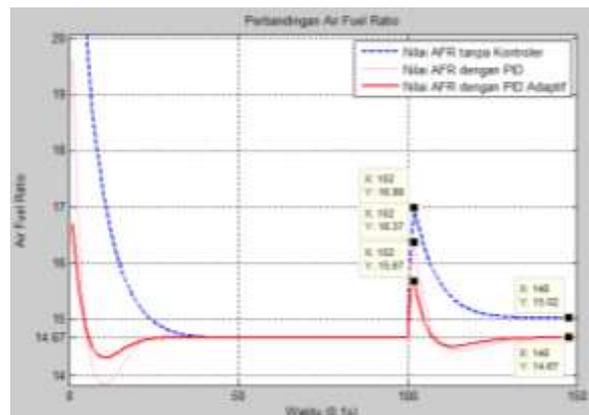
adanya kontroler yang berusaha menjaga nilai *air fuel ratio* tetap pada 14,67.

Sedangkan untuk analisa hasil dari torsi mesin, sistem pembakaran non injeksi memiliki nilai torsi yang paling besar dibandingkan dengan sistem dengan kontroler. Tetapi ditinjau dari segi daya mesin, sistem tanpa kontroler (sistem pembakaran konvensional) memiliki daya yang lebih rendah dibanding dengan sistem *fuel injection*. Hal ini dikarenakan semakin besar perbandingan konsentrasi udara dengan bahan bakar maka daya yang dihasilkan mesin akan menurun.

3.3 Pengujian Perbandingan Sistem dengan Gangguan Positif (Bertambahnya Pasokan Udara) pada *Air Charge*

Dengan memberikan masukan berupa sinyal *step up* dangangguan positif (bertambahnya pasokan udara) pada *air charge* nya, maka dilakukan beberapa analisa, yaitu:

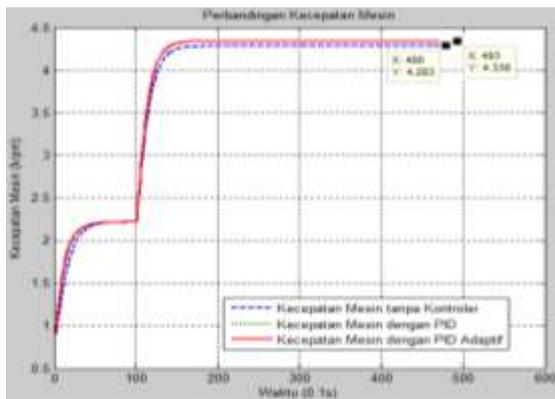
1) Perbandingan AFR



Gambar 12. Grafik perbandingan kecepatan mesin sistem dengan gangguan positif pada *air charge*

Gambar 12 merupakan perbandingan *Air to Fuel Ratio* dari ketiga model sistem dengan gangguan pada sistem *air charge*. Pada sistem tanpa kontroler *overshoot* dari sistem mencapai 2,32 dari (mencapai angka 16,99), sedangkan pada sistem dengan kontroler PID AFR hanya mencapai angka 16,37, dan pada sistem dengan menggunakan metode Adaptif PID AFR hanya mencapai angka 15,67. Serta dapat dilihat, pada sistem tanpa kontroler pasca diberi gangguan pada *air charge* kestabilan sistem tidak dapat mencapai *set point* lagi, dari grafik terlihat *set point* AFR sistem tanpa kontroler hanya mencapai angka 15,02.

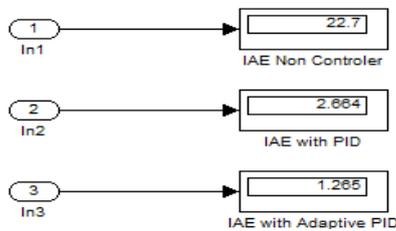
2) Perbandingan kecepatan mesin.



Gambar 13. Grafik perbandingan kecepatan mesin sistem dengan gangguan positif pada *air charge*

Dari hasil simulasi, sistem dengan kontroler memiliki kecepatan yang lebih baik, karena sistem dengan kontroler memiliki *rise time* yang lebih cepat untuk mencapai *set point*. Dan begitu pun setelah melewati detik ke 10 (setelah mengalami gangguan pada *air charge*), sistem dengan kontroler memiliki kecepatan mesin yang lebih besar yaitu mencapai 4338 rpm sedangkan sistem tanpa kontroler hanya mencapai 4283 rpm, hal ini dikarenakan nilai AFR pada sistem tanpa kontroler tidak dapat kembali ke nilai *set point* nya, pada sistem ini AFR tertahan pada angka 15,02.

3) Perbandingan integral area error



Gambar 14. Perbandingan *integral area error* dengan gangguan positif pada *air charge*

Terlihat bahwa integral area error yang paling besar dimiliki oleh sistem tanpa kontroler, yaitu sebesar 22,7. Pada sistem dengan kontroler PID yang detuning secara tial error, besarnya *integral area error* hanya mencapai angka 2,664. Sedangkan pada sistem dengan kontroler PID Adaptif hanya mencapai angka 1,265. Hal ini membuktikan sistem dengan kontroler PID sudah cukup baik namun sistem dengan kontroler PID Adaptif memiliki hasil yang lebih baik.

4) Perbandingan konsumsi bahan bakar, torsi, dan daya mesin

Tabel 4. Perbandingan analisis konsumsi bensin, torsi, dan daya mesin pada ketiga model sistem dengan gangguan positif pada *air charge*

No.	Analisis	Tanpa kontroler	Kontroler PID	Kontroler Adaptif PID
1.	Konsumsi bensin (Kg/50 s)	0,1203	0,124669	0,124667
2.	Torsi (Nm)	133,5	131,3	131,3
3.	Daya (HP)	80,27	80,43	80,43

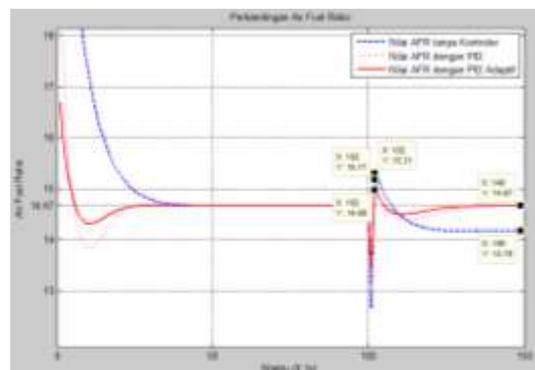
Pada model sistem tanpa kontroler akan mengkonsumsi bensin lebih sedikit bensin dibanding sistem dengan kontroler. Karena terjadinya penambahan pasokan udara pada *air charge* membuat massa injeksi bahan bakar pada sistem yang dikontrol berusaha mengimbangi jumlah massa udara agar mencapai nilai stoichiometric *air fuel ratio* yaitu 14,67. Sedangkan pada sistem tanpa kontroler jumlah massa bensin berkurang tidak membuat jumlah massa udara ikut berkurang karena tidak adanya kontroler yang berusaha menjaga nilai *air fuel ratio* tetap pada 14,67.

Sedangkan untuk analisa hasil dari torsi mesin, sistem pembakaran non injeksi memiliki nilai torsi yang paling besar dibandingkan dengan sistem dengan kontroler. Tetapi ditinjau dari segi daya mesin, sistem tanpa kontroler (sistem pembakaran konvensional) memiliki daya yang lebih rendah dibanding dengan sistem fuel injection. Hal ini dikarenakan semakin besar perbandingan konsentrasi udara dengan bahan bakar maka daya yang dihasilkan mesin akan menurun.

3.4 Pengujian Perbandingan Sistem dengan Gangguan Positif (Bertambahnya Pasokan Bahan Bakar) pada *Fuel injector*

Dengan memberikan masukan berupa sinyal *step up* dangangguan positif (bertambahnyapasokan bahan bakar) pada *fuel injector* nya, maka dilakukan beberapa analisa, yaitu:

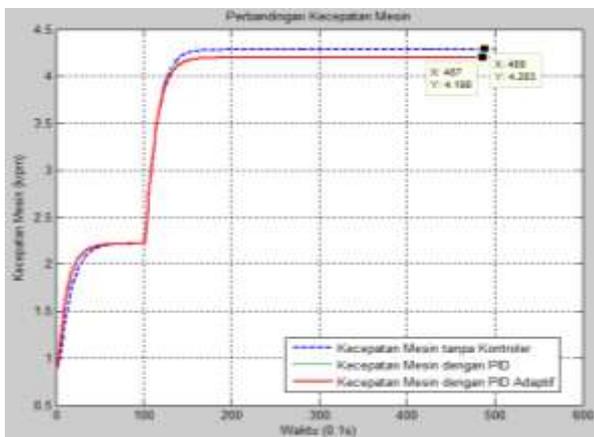
1) Perbandingan AFR



Gambar 15. Grafik perbandingan kecepatan mesin sistem dengan gangguan positif pada *air charge*

Gambar 15 merupakan perbandingan *Air to Fuel Ratio* dari ketiga model sistem dengan gangguan pada sistem *fuel injector*. Pada sistem tanpa kontroler *overshoot* dari sistem mencapai 0,64 dari (mencapai angka 15,31), sedangkan pada sistem dengan kontroler PID AFR hanya mencapai angka 15,17, dan pada sistem dengan menggunakan metode Adaptif PID AFR hanya mencapai angka 14,98. Serta dapat dilihat, pada sistem tanpa kontroler pasca diberi gangguan pada *air charge* kestabilan sistem tidak dapat mencapai *set point* lagi, dari grafik terlihat *set point* AFR sistem tanpa kontroler hanya mencapai angka 14,18.

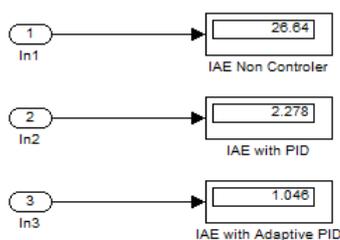
2) Perbandingan kecepatan mesin.



Gambar 16. Grafik perbandingan kecepatan mesin sistem dengan gangguan positif pada *fuel injector*

Dari Dari hasil simulasi, sistem dengan kontroler memiliki kecepatan yang lebih baik sebelum mencapai detik ke 10, karena sistem dengan kontroler memiliki *rise time* yang lebih cepat untuk mencapai *set point*. Sedangkan setelah melewati detik ke 10, sistem tanpa kontroler memiliki kecepatan mesin yang lebih rendah dibanding dengan sistem dengan kontroler, yaitu sebesar 4198 rpm. Hal ini dikarenakan nilai AFR pada sistem tanpa kontroler tidak dapat kembali ke nilai *set point* nya, pada sistem ini AFR tertahan pada titik 14,18.

3) Perbandingan *integral area error*



Gambar 17. Perbandingan *integral area error* dengan gangguan positif pada *fuel injector*

Dari hasil simulasi yang dilakukan, terlihat hasil yang sangat signifikan pada ketiga sistem. Terlihat bahwa

*integral area error* yang paling besar dimiliki oleh sistem tanpa kontroler, yaitu sebesar 26,64. Pada sistem dengan kontroler PID konvensional, besarnya *integral area error* hanya mencapai angka 2,278. Sedangkan pada sistem dengan kontroler PID Adaptif hanya mencapai angka 1,046. Hal ini membuktikan sistem dengan kontroler PID sudah cukup baik namun sistem dengan kontroler PID Adaptif memiliki hasil yang lebih baik.

4) Perbandingan konsumsi bahan bakar, torsi, dan daya mesin

Tabel 4. Perbandingan analisis konsumsi bensin, torsi, dan daya mesin pada ketiga model sistem dengan gangguan positif pada *fuel injector*

No.	Analisis	Tanpa kontroler	Kontroler PID	Kontroler Adaptif PID
1.	Konsumsi bensin (Kg/50 s)	0,1203	0,11520	0,11513
2.	Torsi (Nm)	138,2	139,8	139,8
3.	Daya (HP)	83,12	82,43	82,43

Pada model sistem tanpa kontroler akan mengkonsumsi bensin lebih banyak dibanding sistem dengan kontroler. Karena dengan terjadinya penambahan pasokan bahan bakar pada *fuel injector* membuat massa udara dalam *manifold* pada sistem yang dikontrol berusaha mengimbangi jumlah massa bahan bakar agar mencapai nilai *stoichiometric air fuel ratio* yaitu 14,67. Sedangkan pada sistem tanpa kontroler jumlah massa bahan bakar yang bertambah tidak membuat jumlah massa udara ikut bertambah karena tidak adanya kontroler yang berusaha menjaga nilai *air fuel ratio* tetap pada 14,67.

Sedangkan untuk analisa hasil dari torsi mesin, sistem pembakaran non injeksi memiliki nilai torsi yang lebih kecil dibandingkan dengan sistem dengan kontroler. Tetapi ditinjau dari segi daya mesin, sistem tanpa kontroler (sistem pembakaran konvensional) memiliki daya yang lebih tinggi dibanding dengan sistem *fuel injection*. Hal ini dikarenakan semakin kecil perbandingan konsentrasi udara dengan bahan bakar maka daya yang dihasilkan mesin akan semakin besar.

#### 4. Kesimpulan

Hasil respon sistem *spark ignition* yang diberi gangguan positif pada sub sistem *air charge* nya serupa dengan respon mesin saat diberi gangguan negatif pada bagian *fuel injection*nya. Sedangkan, hasil respon sistem *spark ignition* yang diberi gangguan positif pada sub sistem *fuel injection* nya serupa dengan respon mesin saat diberi gangguan negatif pada bagian *air charge*nya. Dapat disimpulkan bahwa semakin kecil nilai perbandingan antara udara dan bahan bakar (*air to fuel ratio*), maka kecepatan putar per menit dari mesin akan semakin cepat. Semakin besar nilai AFR nya maka kecepatan putar per

menit mesin akan semakin lambat. Dari seluruh hasil percobaan dengan gangguan, *integral area error* yang dimiliki oleh sistem dengan kontroler Adaptif PID selalu yang terkecil. Contoh pada sistem dengan gangguan negatif pada *air charge*, pada masukkan step up, sistem tanpa kontroler memiliki nilai 21,15, sedangkan pada PID *trial and error* hanya memiliki nilai 2,33, dan pada sistem dengan kontroler PID *fuzzy gain scheduling* hanya bernilai 1,08. Ini membuktikan bahwa perancangan kontroler yang dilakukan sudah baik. Untuk penelitian lebih lanjut dapat juga dikembangkan untuk menggunakan *model predictive control* ataupun MRAC untuk menentukan parameter-parameter penguatan kontroler sehingga sistem penguatan tidak hanya terpacu pada penjadwalan nilai dari *error*. Sehingga hasil yang diharapkan akan lebih optimal lagi

### Daftar Pustaka

- [1]. [http://id.wikipedia.org/wiki/Mesin\\_piston](http://id.wikipedia.org/wiki/Mesin_piston), Januari 2013
- [2]. Fuel delivery and injection control, Toyota Motor Sales, U.S.A, Inc.
- [3]. Windharto Arif S.W, "Perbaikan Kinerja Engine Toyota 5K 4 Silinder 1500CC pada Kondisi Percepatan Menggunakan Knowledge Base Kontrol", Tugas akhir Jurusan Teknik Elektro ITS (2005).
- [4]. Hendricks, Elbert, "A Generic Mean Value Engine Model for Spark Ignition Engines". DTU. 2000.
- [5]. Angga, Effendi Rusdianto., Penerapan PID Predictive Air-Ratio Controler Pada Mesin Mobil Mitsubishi Tipe 4G63 Untuk Meminimumkan Emisi Gas Buang.
- [6]. Triwiyatno, A., Sumardi., "Fuel Saving Strategy In Spark Ignition Engine Using Fuzzy Logic Engine Torque Control". MAKARA Journal of Technology Series, Vol 16, No 1 (2012)
- [7]. S.H.Lee, R.J.Howlett, S.D.Walters, "Fuzzy Air-Fuel Ratio Control of a Small Gasoline Engine". Intelligent Systems & Signal Processing Laboratories, University of Brighton. 2003
- [8]. Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, Department of Electrical Engineering and Electronics Research Laboratory, University of California, Berkeley, 1965.
- [9]. Abdul Hadi, Muhammad. 2011. "Desain dan Implementasi Sistem Pengaturan Fuzzy untuk Waktu Pengapian pada Mesin Pengapian Busi", ITS Surabaya.
- [9]. Abdul Hadi, Muhammad. 2011. "Desain dan Implementasi Sistem Pengaturan Fuzzy untuk Waktu Pengapian pada Mesin Pengapian Busi", ITS Surabaya.
- [10]. Angga, Effendi Rusdianto., Penerapan PID Predictive Air-Ratio Controler Pada Mesin Mobil Mitsubishi Tipe 4G63 Untuk Meminimumkan Emisi Gas Buang.
- [11]. Hendricks, E., Vesterholm, T., Kaidantzis, P., Rasmussen, P. B., Jensen, M., "Nonlinear Transient Fuel Film Compensation", SAE Technical Paper No. 930767, 1993.
- [12]. Hendricks, E., Chevalier, A., Jensen, M., Sorenson, S. C., Asik, J., and Trumpy, D., "Modelling of the Intake Manifold Filling Dynamics", SAE Technical Paper No. 960037, 1996.