

DESAIN KONTROLER PID ADAPTIF BERBASIS ANFIS UNTUK PENGATURAN RASIO PERBANDINGAN UDARA DAN BAHAN BAKAR (AFR) PADA MODEL MESIN BENSIN 4 LANGKAH

Aris Triwiyatno^{*)}, Yoga Adi Candra, and Budi Setiyono

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

^{*)}E-mail: aristriwiyatno@undip.ac.id

Abstrak

Untuk menjaga agar pemakaian bensin pada mesin bensin 4 langkah pada kondisi optimal, dapat dilakukan 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 Penelitian ini, akan dilakukan penelitian tentang sistem cerdas injeksi bahan bakar untuk mengoptimalkan Air to Fuel Ratio (AFR) pada model mesin bensin 4 langkah. Digunakan kontroler PID adaptif dengan penalaan yang berbasis ANFIS pada tiap parameternya. Hasil perancangan PID adaptif dibandingkan dengan sistem tanpa kontroler dan kontroler PID konvensional. Berdasarkan hasil simulasi, menunjukkan bahwa respon sistem mesin 4 langkah dengan kontroler PID adaptif berbasis ANFIS yang dirancang memiliki faktor ketahanan yang paling baik, rise time yang paling cepat, overshoot yang kecil, integral area error (IAE) paling rendah dibanding dengan metode uji yang lain pada saat ada gangguan, dan juga penghematan konsumsi bahan bakar hingga 3,19% saat pengereman dan 7,03% saat overrun.

Kata kunci : Mesin bensin 4 langkah, Air to Fuel Ratio, ANFIS, PID adaptif

Abstract

To keep the fuel consumption of 4 stroke gasoline engine in optimum conditions, it can be solved by regulating the quantity of fuel to any changes in system performance. The arrangement of the fuel injection will increase the effectiveness of combustion, which also reduce exhaust gas emissions indirectly. In this research, the research was conducted on intelligent system to optimized the fuel injection of Air to Fuel Ratio (AFR) in 4 stroke gasoline engine model. The research used adaptive PID control with ANFIS tuning based for its each parameters. The adaptive PID results was compared with the non-controlled system and conventional PID controlled system. The simulation result showed that the response of adaptive PID controlled 4 stroke gasoline engine has the most excellent resistance factor, the fastest rise time, small of overshoot, the lowest integral area error (IAE) than other test method when there was an inference, and be able to save fuel consumption up to 3,19% during braking, and 7,03% while on the engine overrun.

Keywords : 4 stroke gasoline engine, Air to Fuel Ratio, ANFIS, adaptive PID

1. Pendahuluan

Pemerintah saat ini memberlakukan regulasi tentang standard emisi untuk mengurangi polusi udara. Sebuah kendaraan tidak hanya harus memenuhi standar pemerintah, tetapi juga memenuhi kebutuhan konsumen dalam hal penggunaan bahan bakar yang lebih irit dan ramah lingkungan.

Emisi dari kendaraan bermotor merupakan salah satu penyebab utama dalam pencemaran udara. Variabel terpenting untuk meminimumkan emisi pada *spark*

ignition engine sementara tetap menjaga keseimbangan antara daya dan konsumsi bahan bakar adalah *Air to Fuel Ratio* (AFR)[1]. Targetnya adalah untuk menjaga agar AFR tetap berada pada nilai *stoichiometric* 14,67 untuk operasi *steady state* dan *transient*[2]. Variasi AFR yang lebih besar dari 1% di bawah 14,67 berakibat meningkatnya emisi CO dan HC, sedangkan peningkatan 1% di atas 14,67 berakibat meningkatnya NO_x hingga 50%[1].

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk merancang pengendalian mesin bensin 4 langkah dalam sistem pembakaran bahan bakar pada mesin guna menekan

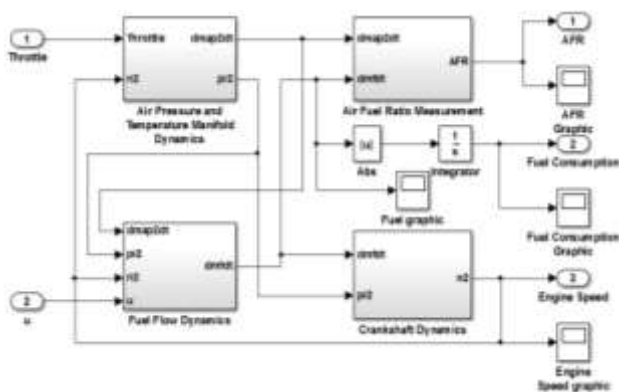
konsumsi bahan bakar dan pencemaran udara. Prasetya melakukan pemodelan kontrol mesin 4 langkah menggunakan kendali PID[3]. Penelitian pada model sistem mesin bensin 4 langkah dengan metode kendali fuzzy juga sudah dilakukan oleh Triwiyatno[4], Nuralamasyah[5], dan Lee[6]. Reactor juga telah melakukan penelitian desain kontrol AFR dengan hybrid fuzzy PI[2]. Perancangan kontroller pada AFR dengan metode neural network sudah dilakukan oleh Wang[7]. Penelitian untuk mengurangi emisi dan konsumsi bahan bakar telah dilakukan oleh Kheir dengan membuat AFR menjadi campuran kurus pada saat kondisi pengereman[8]. Dari penelitian yang dilakukan Aleiferis didapatkan mesin bensin 4 langkah tetap dapat bekerja selama $AFR \leq 21$ [9].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang suatu pemodelan dari sistem pengontrolan *Air to Fuel Ratio* (AFR) pada model mesin bensin 4 langkah[10] dengan menggunakan metode kontrol PID adaptif dengan penalaan menggunakan ANFIS, yang diharapkan bisa mengurangi emisi gas buang dari pembakaran dengan cara memperhatikan nilai kestabilan dari AFR model sistem pada angka stokiometri, dan juga dan mengurangi konsumsi bahan bakar saat terjadi pengereman (*engine braking*) dan *engine overrun*. Yang selanjutnya akan dilakukan analisis terhadap model mesin bensin 4 langkah yang telah dirancang berdasarkan unjuk kerja yang dihasilkan.

2. Metode

2.1. Pemodelan Plant Mesin Bensin

Berikut gambar plant sistem *spark ignition engine* model Hendricks yang digunakan :



Gambar 1. Model sistem spark ignition engine

Sedangkan parameter model sistem tersebut ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 1. Parameter fisik model spark ignition engine

Parameter	Nilai	Satuan
T_{EGR}	293	Kelvin
T_a	293	Kelvin
ρ_a	1,013	Bar
H_u	$4,3 \times 10^4$	-
R	287×10^{-5}	Kg/detik
L_{th}	14,67	Air/fuel ratio
L_{am}	1	-
I_{ac}	0,48	Kg m2
$dm_{egr} dt$	0	kg/detik
V_d	1,275	Liter
k	1,4	-
$p_{i2_{ini}}$	0,23926	Bar
$T_{i2_{ini}}$	293	Kelvin
$n_{2_{ini}}$	0,9	Krpm
$n_{2_{ini}}$	0,9	Krpm
p_{i2}	0,24	Bar
T_{i2}	293	Kelvin
V_i	$1,692 \times 10^{-5}$	J/kg °F
p_c	0,4125	Bar
R_{fd}	5,357	-
R_w	1,897	M
r_{load0}	40	-
I_v	12,09	Kgm ²

2.2. Perancangan Kontrol

Kontroler PID akan digunakan sebagai guru untuk proses pembelajaran ANFIS. Proses *tuning* PID dilakukan secara *trial and error*. Pemilihan nilai konstanta yang akan digunakan ditentukan dari nilai IAE (*Integral Area Error*) yang paling kecil. Dari percobaan dengan 5 variasi konstanta, didapatkan hasil respon sistem dengan kontroler PID yang menghasilkan nilai IAE paling kecil yaitu $K_p=3 \times 10^{-6}$, $K_i=2,75 \times 10^{-4}$, dan $K_d=5 \times 10^{-6}$.

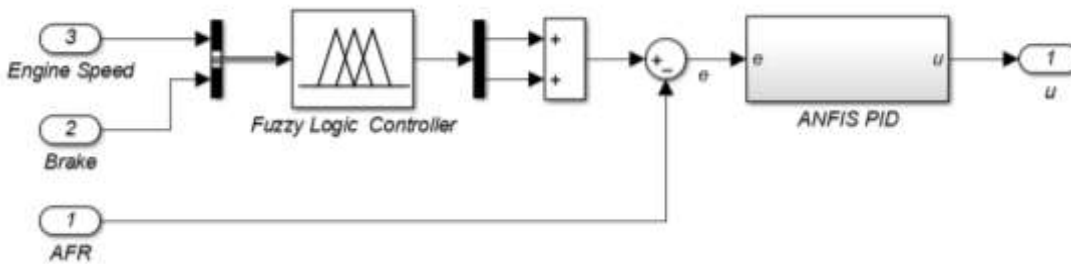
ANFIS digunakan untuk mengubah parameter pengendali PID yaitu nilai K_p (*proportional gain*), K_i (*integral gain*), dan K_d (*derivative gain*). Terdapat dua masukan pada sistem, yaitu nilai *error* dan *delta error*. Keluaran dari ANFIS berupa parameter K_p , K_i , dan K_d .

Perancangan kontroler PID berbasis ANFIS dilakukan dengan aturan sebagai berikut:

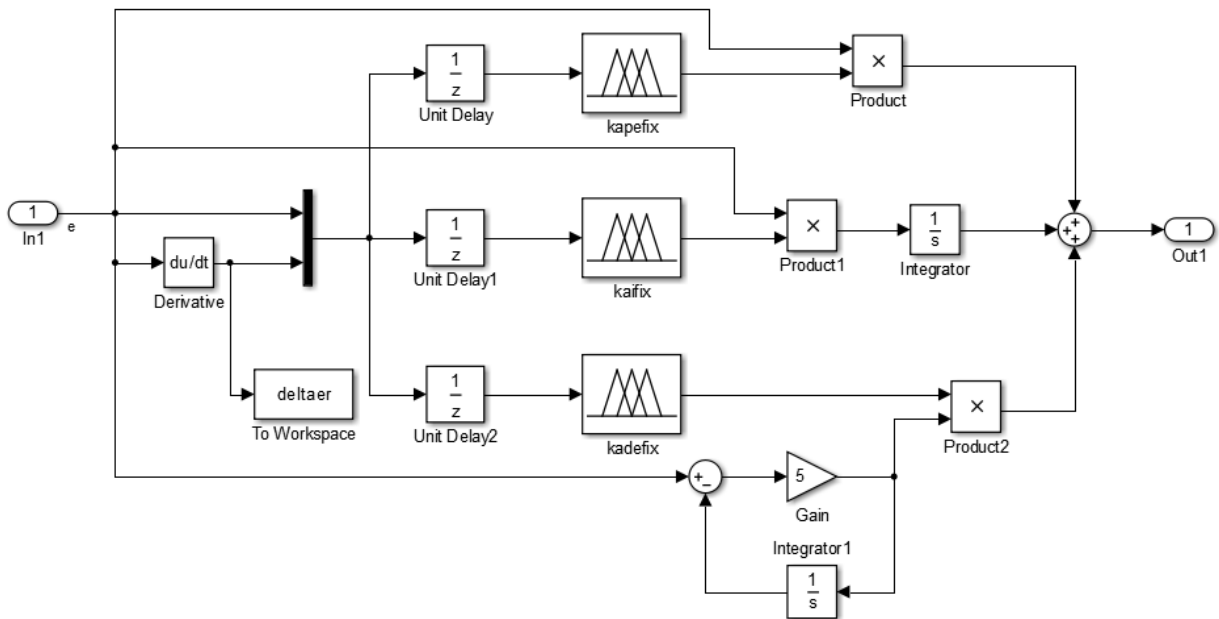
- Arsitektur jaringan yang digunakan merupakan *Fuzzy Inference System* tipe Takagi-Sugeno.
- Input yang digunakan sebanyak 2 buah yaitu *error* dan *delta error*, output yang digunakan sebanyak 1 buah yaitu K_p , K_i , atau K_d untuk tiap-tiap parameter.
- Tipe fungsi keanggotaan yang digunakan adalah tipe segitiga.
- Jumlah fungsi keanggotaan masing-masing *input* tiap *subsystem* adalah 5 buah serta 25 buah fungsi keanggotaan *output*.
- Jumlah *rules* yang dibangkitkan berjumlah 25 buah.

Kontrol injeksi bahan bakar diaplikasikan untuk mengatur besarnya injeksi bahan bakar saat keadaan *steady*, terdapat gangguan, maupun kompensasi pada saat terjadinya pengereman dan *engine overrun* agar emisi kecil, menghemat bahan bakar, dan memperoleh performa mesin yang baik. Digunakan logika *fuzzy* untuk mencari besarnya injeksi bahan bakar. Terdapat dua masukan pada sistem yaitu *engine speed* dan *brake*. Keluaran berupa besarnya AFR yang akan digunakan sebagai *set point* bagi kontroler PID adaptif berbasis ANFIS.

- R₃ : If *speed* is *high* and *brake* is *off* then *stoc* is *on* and *eco* is *off*.
- R₄ : If *speed* is *high* and *brake* is *on* then *stoc* is *off* and *eco* is *on*.
- R₅ : If *speed* is *over* and *brake* is *off* then *stoc* is *off* and *eco* is *on*.
- R₆ : If *speed* is *over* and *brake* is *on* then *stoc* is *off* and *eco* is *on*.



Gambar 2. Blok diagram kontrol injeksi bahan bakar



Gambar 3. Blok diagram kontroler PID adaptif

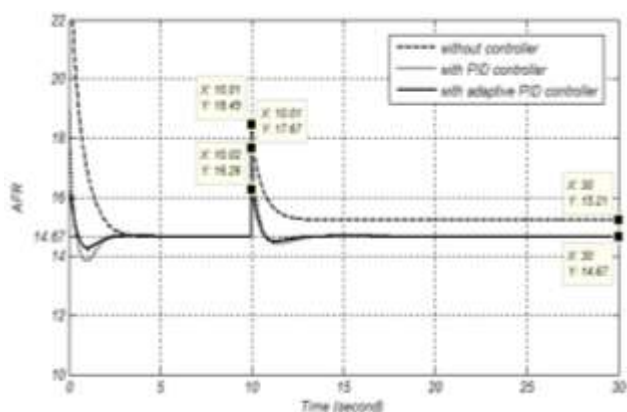
Adapun maksud *rule base fuzzy* yang digunakan pada penelitian adalah sebagai berikut :

- R₁ : If *speed* is *low* and *brake* is *off* then *stoc* is *on* and *eco* is *off*.
- R₂ : If *speed* is *low* and *brake* is *on* then *stoc* is *off* and *eco* is *on*.

3. Hasil dan Analisa

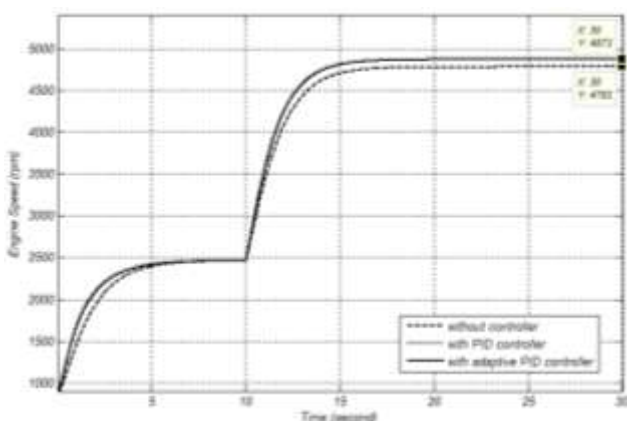
3.1 Pengujian dengan Gangguan Negatif pada Fuel Injector

Pengujian dilakukan dengan menggunakan sinyal *step up* dan gangguan negatif pada *fuel injector* (pengurangan suplai bahan bakar) sebesar 0,0001 kg/detik.



Gambar 4. AFR dengan gangguan negatif pada fuel injector

Unjuk kerja sistem tanpa kontroler AFR memiliki nilai puncak 18,45 dengan *overshoot* sebesar 3,78, sedangkan pada sistem dengan kontroler PID AFR mencapai angka 17,67 dengan *overshoot* 3,00, dan pada sistem dengan kontroler PID adaptif AFR nilai puncak mencapai 16,26 dengan *overshoot* sebesar 1,59. Setelah diberi gangguan pada *fuel injector*, sistem tanpa kontroler tidak dapat mencapai *set point* lagi, nilai AFR sistem tanpa kontroler menjadi campuran miskin mencapai angka 15,21, sedangkan sistem dengan kontroler dapat mencapai *set point* 14,67.



Gambar 5. ES dengan gangguan negatif pada fuel injector

Setelah melewati detik ke-10 setelah mengalami gangguan negatif pada *fuel injector*, sistem dengan kontroler memiliki kecepatan mesin yang lebih besar mencapai 4.873 rpm sedangkan sistem tanpa kontroler hanya mencapai 4.783 rpm.

Model sistem dengan kontroler PID maupun dengan PID adaptif mengkonsumsi bensin lebih banyak dibanding sistem tanpa kontroler karena pengurangan pasokan bahan bakar pada *fuel injector* membuat sistem yang dikontrol berusaha mengimbangi rasio massa bensin dengan massa udara pada *intake manifold* agar AFR mencapai nilai *stoichiometric*, dengan cara menambah injeksi bahan

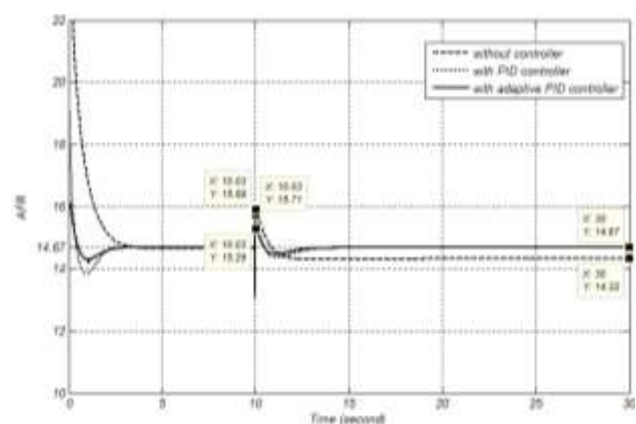
bakar yang masuk ke *intake manifold*, sehingga didapat konsumsi bensin meningkat sebesar 4,92% untuk mengimbangi massa udara agar tercapai pembakaran sempurna.

Tabel 2. Pengujian dengan gangguan negatif pada fuel injector

Kontrol	AFR	Kecepatan mesin	Konsumsi bahan bakar	IAE
Tanpa kontroler	15,21	4873 rpm	0,0582755 kg/30 detik	20,02
PID	14,67	4959 rpm	0,0612966 kg/30 detik	2,83
PID adaptif	14,67	4959 rpm	0,0612965 kg/30 detik	1,49

3.2. Pengujian dengan Gangguan Negatif pada Air Charge

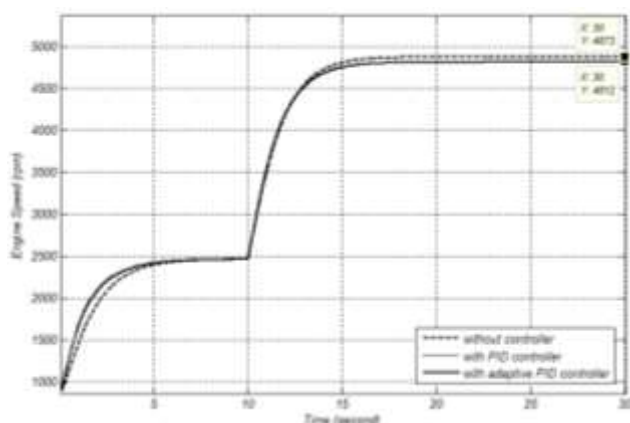
Pengujian dilakukan dengan menggunakan sinyal *step up* dan gangguan negatif pada *air charge* (pengurangan suplai udara) sebesar 0,001 kg/detik.



Gambar 6. AFR dengan gangguan negatif pada air charge

Dari hasil simulasi didapatkan unjuk kerja pada sistem tanpa kontroler AFR memiliki nilai puncak 15,89 dengan *overshoot* sebesar 1,22, sedangkan pada sistem dengan kontroler PID AFR mencapai 15,71 dengan *overshoot* 1,04, dan pada sistem dengan kontroler PID adaptif AFR nilai puncak mencapai 15,29 dengan *overshoot* sebesar 0,62. Setelah diberi gangguan pada *air charge* kestabilan sistem tanpa kontroler tidak dapat mencapai *set point* lagi, dari grafik terlihat *set point* AFR sistem tanpa kontroler menjadi campuran kaya mencapai angka 14,32, sedangkan sistem dengan kontroler dapat mencapai *set point* 14,67.

Sistem tanpa kontroler memiliki kecepatan yang lebih besar mencapai 4.873 rpm, sementara sistem dengan kontroler memiliki kecepatan 4.812, lebih rendah 1,25% dibandingkan sistem tanpa kontroler.



Gambar 7. ES dengan gangguan negatif pada air charge

Tabel 3. Pengujian dengan gangguan negatif pada air charge

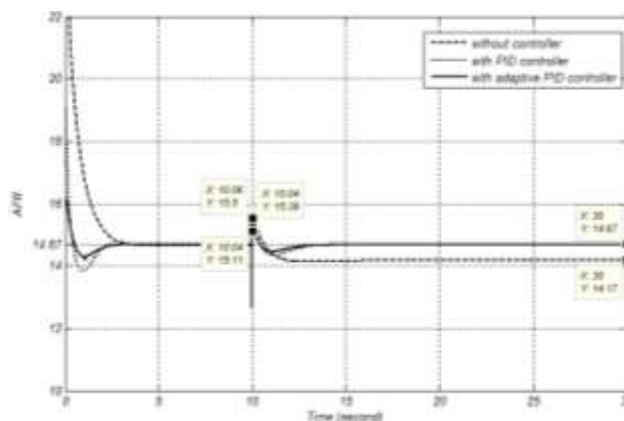
Kontrol	AFR	Kecepatan mesin	Konsumsi bahan bakar	IAE
Tanpa kontroler	14,32	4873 rpm	0,0608703 kg/30 detik	14,55
PID	14,67	4812 rpm	0,0596613 kg/30 detik	2,417
PID adaptif	14,67	4812 rpm	0,0596186 kg/30 detik	1,257

Model sistem dengan kontroler PID adaptif mengkonsumsi bensin lebih sedikit dibanding sistem tanpa kontroler karena pengurangan pasokan udara pada *air charge* membuat sistem yang dikontrol berusaha mengimbangi rasio massa bensin dengan massa udara pada *intake manifold* agar AFR mencapai nilai *stoichiometric* dengan cara mengurangi injeksi bahan bakar yang masuk ke *intake manifold*, sehingga didapat konsumsi bensin menurun sebesar 2,05% untuk mengimbangi massa udara agar tercapai pembakaran sempurna.

3.3. Pengujian dengan Gangguan Positif pada Fuel Injector

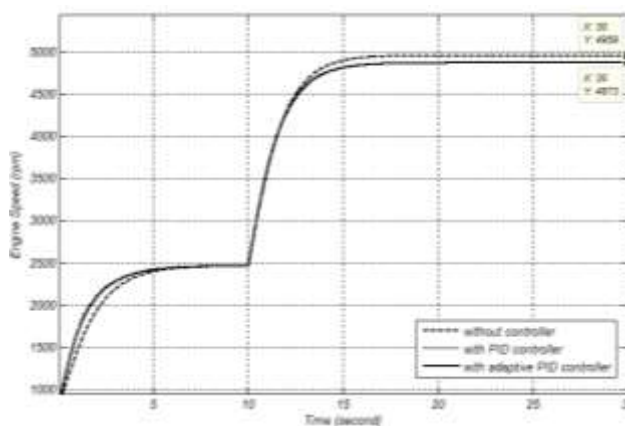
Pengujian dilakukan dengan menggunakan sinyal *step up* dan gangguan positif pada *fuel injector* (penambahan suplai bahan bakar) sebesar 0,0001 kg/detik.

Dari hasil simulasi didapatkan unjuk kerja pada sistem tanpa kontroler AFR memiliki nilai puncak 15,5 dengan *overshoot* sebesar 0,83, sedangkan pada sistem dengan kontroler PID AFR mencapai angka 15,39 dengan *overshoot* 0,72, dan pada sistem dengan kontroler PID adaptif AFR nilai puncak mencapai 15,11 dengan *overshoot* sebesar 0,44. Setelah diberi gangguan pada *fuel injector*, sistem tanpa kontroler tidak dapat mencapai *set point* lagi, dari grafik terlihat nilai AFR sistem tanpa kontroler menjadi campuran kaya mencapai angka 14,17, sedangkan sistem dengan kontroler dapat mencapai *set point* 14,67.



Gambar 8. AFR dengan gangguan positif pada fuel injector

Sistem tanpa kontroler memiliki kecepatan yang lebih besar mencapai 4.959 rpm, sementara sistem dengan kontroler memiliki kecepatan 4.873, penurunan sebesar 1,73% dibandingkan sistem tanpa kontroler.



Gambar 9. ES dengan gangguan positif pada fuel injector

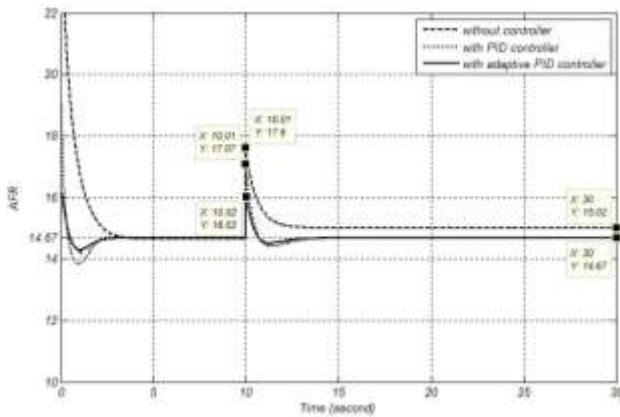
Tabel 4. Pengujian dengan gangguan positif pada fuel injector

Kontrol	AFR	Kecepatan mesin	Konsumsi bahan bakar	IAE
Tanpa kontroler	14,17	4959 rpm	0,0634210 kg/30 detik	17,16
PID	14,67	4873 rpm	0,0614435 kg/30 detik	2,369
PID adaptif	14,67	4873 rpm	0,0613913 kg/30 detik	1,233

Model sistem dengan kontroler PID adaptif mengkonsumsi bensin lebih sedikit dibanding sistem tanpa kontroler karena penambahan pasokan bahan bakar pada *fuel injector* membuat sistem yang dikontrol berusaha mengimbangi jumlah massa bensin dengan massa udara pada *intake manifold* agar AFR mencapai nilai *stoichiometric* dengan cara mengurangi injeksi bahan bakar yang masuk ke *intake manifold*.

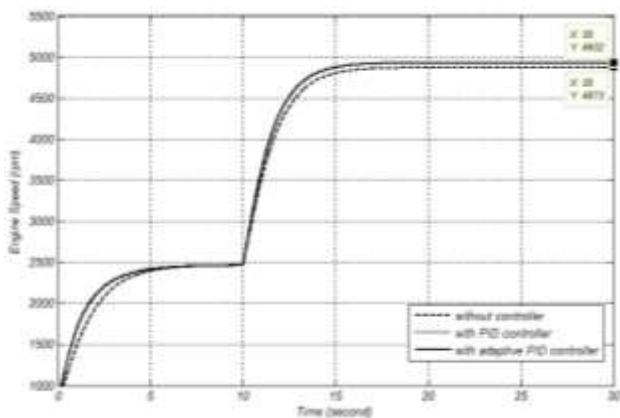
3.4. Pengujian dengan Gangguan Positif pada Air Charge

Pengujian dilakukan dengan menggunakan sinyal *step up* dan gangguan positif pada *air charge* (penambahan suplai udara) sebesar 0,001 kg/detik.



Gambar 10. AFR dengan gangguan positif pada air charge

Dari hasil simulasi didapatkan unjuk kerja pada sistem tanpa kontroler AFR memiliki nilai puncak 17,6 dengan *overshoot* sebesar 2,93, sedangkan pada sistem dengan kontroler PID AFR mencapai 17,07 dengan *overshoot* 2,4, dan pada sistem dengan kontroler PID adaptif AFR nilai puncak mencapai 16,02 dengan *overshoot* sebesar 1,35. Saat diberi gangguan pada *air charge* kestabilan sistem tanpa kontroler tidak dapat mencapai *set point* lagi, *set point* AFR sistem tanpa kontroler menjadi campuran miskin mencapai angka 15,02, sedangkan sistem dengan kontroler dapat mencapai *set point* 14,67.



Gambar 11. ES dengan gangguan positif pada air charge

Sistem tanpa kontroler memiliki kecepatan yang lebih kecil 4.873 rpm, sementara sistem dengan kontroler memiliki kecepatan 4.932, terjadi peningkatan sebesar 1,19% dibandingkan sistem tanpa kontroler.

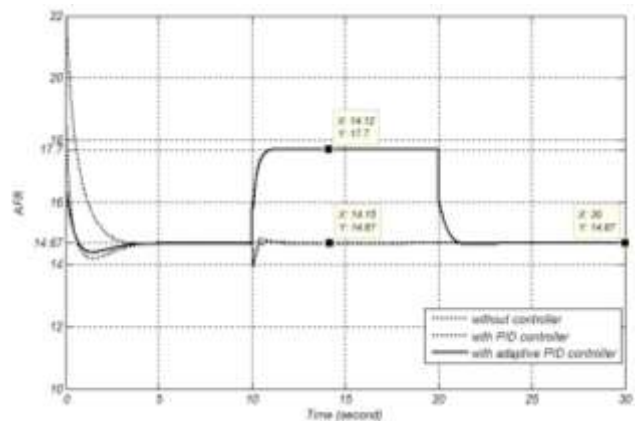
Tabel 5. Pengujian dengan gangguan positif pada air charge

Kontrol	AFR	Kecepatan mesin	Konsumsi bahan bakar	IAE
Tanpa kontroler	15,02	4873 rpm	0,0608703 kg/30 detik	15,93
PID	14,67	4932 rpm	0,0630528 kg/30 detik	2,716
PID adaptif	14,67	4932 rpm	0,0630460 kg/30 detik	1,431

Model sistem dengan kontroler PID maupun kontroler PID adaptif mengkonsumsi bensin lebih banyak dibanding sistem tanpa kontroler karena penambahan pasokan udara pada *air charge* membuat sistem yang dikontrol berusaha mengimbangi rasio massa bensin dengan massa udara pada *intake manifold* agar AFR mencapai nilai *stoichiometric* dengan cara menambah injeksi bahan bakar yang masuk ke *intake manifold*, sehingga didapat konsumsi bensin meningkat sebesar 3,45% untuk mengimbangi massa udara agar tercapai pembakaran sempurna.

3.5. Pengujian saat Terjadi Pengereman

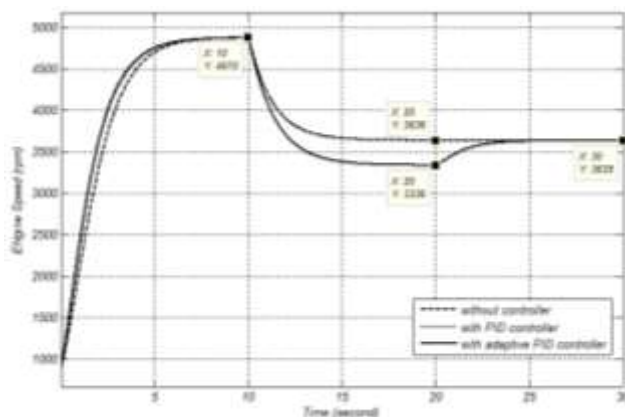
Pengujian dilakukan dengan menggunakan sinyal *step down* yang mensimulasikan deselerasi. Nilai awal detik ke-0 bukaan *throttle* sebesar 40° dan *throttle* berubah menjadi 25° pada saat detik ke-10 sampai detik ke-30. Pada saat bersamaan pada detik ke-10 diberikan masukan berupa variasi rem (*brake*) dari 0 sampai 325 Nm secara gradual sampai detik ke-20, setelah detik ke-20 rem dilepas kembali ke 0.



Gambar 12. AFR saat terjadi pengereman

Pada saat kondisi pengereman pada detik ke-10 sampai dengan detik ke-20, respon AFR pada sistem dengan kontroler PID adaptif menjadi campuran kurus (*lean*) dengan nilai 17,7, sementara pada sistem tanpa kontroler maupun dengan kontroler PID konvensional AFR tetap berada pada nilai *stoichiometric* 14,67. Hal ini disebabkan pada sistem dengan kontrol PID adaptif terdapat kompensasi untuk mengurangi injeksi bahan bakar, mengubah set point menjadi campuran kurus apabila

terdapat kondisi pengereman (*engine braking*) untuk menghemat konsumsi bahan bakar. Setelah rem dilepas, AFR akan kembali ke nilai *stoichiometric* 14,67.



Gambar 13. ES saat terjadi pengereman

Sistem dengan kontroler PID maupun PID adaptif memiliki *rise time* yang lebih cepat untuk mencapai *set point*, daripada sistem tanpa kontroler. Sebelum dilakukan deselerasi dan pengereman kecepatan mesin untuk sistem terkontrol maupun tidak terkontrol mencapai 4.870 rpm. Setelah dilakukan deselerasi dan pengereman pada detik ke-10 kecepatan mesin turun menjadi 3.336 rpm untuk sistem dengan kontroler PID adaptif, dan 3636 untuk sistem dengan kontroler PID maupun tanpa kontroler. Setelah rem dilepas kecepatan mesin untuk sistem dengan kontroler PID adaptif akan kembali ke 3.636 rpm.

Tabel 6. Pengujian saat terjadi pengereman

Kontrol	AFR	Kecepatan mesin	Konsumsi bahan bakar	IAE
Tanpa kontroler	14,67	3636 rpm	0,0525159 kg/30 detik	5,391
PID	14,67	3636 rpm	0,0534475 kg/30 detik	2,049
PID adaptif	17,7	3336 rpm	0,0508374 kg/30 detik	31,33

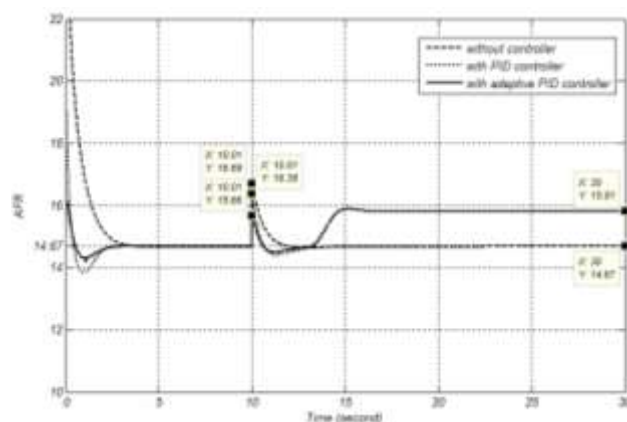
Dari hasil simulasi diperoleh konsumsi bahan bakar sistem tanpa kontroler mengkonsumsi bensin 0,0525159 kg/30 detik, sistem dengan kontroler PID mengkonsumsi bensin sebesar 0,0534475 kg/30 detik, sedangkan pada sistem dengan kontroler PID adaptif konsumsi bensin sebesar 0,0508374 kg/30 detik.

Dengan adanya kompensasi pengereman pada sistem dengan kontroler PID adaptif, konsumsi bahan bakar dihemat sebanyak 3,19% .

3.6. Pengujian saat Terjadi Engine Overrun

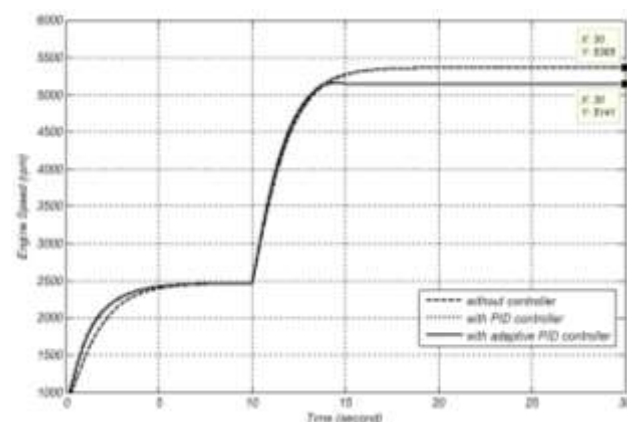
Masukan pada pengujian ini berupa variasi *throttle* bukaan penuh sebesar 45° dengan sinyal *step up*. Nilai awal *throttle* adalah bukaan sebesar 20° dan pedal gas

diinjak penuh secara mendadak menjadi 45° pada saat detik ke-10.



Gambar 14. AFR saat terjadi engine overrun

Dari hasil simulasi didapatkan unjuk kerja sistem tanpa kontroler sesaat setelah akselerasi mendadak pada detik ke-10 memiliki nilai puncak AFR 16,69 dengan *overshoot* sebesar 2,02, sedangkan pada sistem dengan kontroler PID AFR mencapai angka 16,38 dengan *overshoot* 1,71, dan pada sistem dengan kontroler PID adaptif AFR nilai puncak mencapai 15,66 dengan *overshoot* sebesar 0,99.



Gambar 15. ES saat terjadi engine overrun

Setelah throttle dibuka secara penuh 45°, kecepatan mesin berangsur-angsur naik. Pada sistem dengan kontroler PID adaptif terdapat kompensasi *overrun* saat kecepatan mesin melebihi 5.200 rpm untuk menjaga agar mesin tidak rusak dan untuk keselamatan pengendara. Saat kecepatan mesin melebihi 5.200, injeksi bahan bakar akan dikurangi. Pengurangan injeksi bahan bakar berpengaruh terhadap rasio perbandingan udara dengan bahan bakar. Saat terjadi overrun nilai AFR pada sistem dengan kontroler PID adaptif menjadi campuran kurus (*lean mixture*) 15,81 dengan kecepatan mesin 5.141 rpm, sementara sistem tanpa kontroler maupun dengan kontroler PID tetap di 14,67 dengan kecepatan mesin 5.365 rpm, melebihi batas aman yang ditentukan 5.200 rpm.

Tabel 7. Pengujian saat terjadi engine overrun

Kontrol	AFR	Kecepatan mesin	Konsumsi bahan bakar	IAE
Tanpa kontroler	14,67	5365 rpm	0,0763637 kg/30 detik	8,535
PID	14,67	5365 rpm	0,0768883 kg/30 detik	2,544
PID adaptif	15,61	5141 rpm	0,0709912 kg/30 detik	19,64

Dari hasil simulasi sistem dengan bukaan *throttle* maksimum pada detik ke-10 sampai detik ke-30 hingga terjadi *overrun*, didapatkan konsumsi bahan bakar sistem tanpa kontroler mengkonsumsi bensin sebesar 0,0763637 kg/30 detik, sistem dengan kontroler PID mengkonsumsi bensin sebesar 0,0768883 kg/30 detik, sedangkan pada sistem dengan kontroler PID adaptif konsumsi bensin sebesar 0,0709912 kg/30 detik. Kontroler pada PID adaptif membuat rasio campuran bahan bakar dengan udara menjadi campuran kurus (*lean mixture*) 15,61 untuk mengurangi kecepatan mesin agar tidak terjadi *overrun* yang dapat merusak mesin dan berbahaya bagi pengendara.

Dengan adanya kompensasi *overrun* pada sistem dengan kontroler PID adaptif, selain mengurangi kecepatan putaran mesin juga mengurangi konsumsi bahan bakar sebesar 7,03%.

4. Kesimpulan

Dari seluruh hasil pengujian dengan gangguan, sistem dengan kontroler PID adaptif selalu memiliki *integral area error* (IAE) dan *overshoot* yang terkecil. Dari hasil pengujian dengan pengereman, sistem dengan kontroler PID adaptif mampu menghemat bahan bakar sebanyak 3,19% lebih sedikit daripada sistem tanpa kontroler tiap 30 detik. Dan juga pada pengujian sistem saat terjadi *engine overrun*, sistem dengan kontroler PID adaptif mampu menjaga kecepatan mesin rata-rata 5.141 rpm, dibawah batas yang diijinkan 5.200 rpm.

Untuk penelitian lebih lanjut, dapat dikembangkan dengan menambah O₂ sensor untuk menambah ketelitian penghitungan emisi. Juga menambah parameter masukan seperti kondisi jalan tanjakan atau turunan, *engine temperature sensor*, *intake air temperature sensor*, *transmission stage*, dan beban kendaraan untuk memperoleh hasil simulasi yang mendekati nyata.

Referensi

- [1]. A. Ghaffari, H. Shamekhi, A. Saki, dan E. Kamrani, "Adaptive Fuzzy Control for Air-Fuel Ratio of Automobile Spark Ignition Engine," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol:2, 2008.
- [2]. M. Al Vandy Reactor, Aris Triwiyatno, dan Budi Setiyono, "Desain Kontrol Air Fuel Ratio (AFR) pada Model Spark Ignition Engine dengan Metode Hybrid Fuzzy PI," *Transient*, vol.2, no.2, 2012.
- [3]. H. A. Prasetya, dan Rusdianto Effendi, "Penerapan PID Predictive Air-Ratio Controller pada Mesin Mobil Mitsubishi Tipe Tipe 4G63 untuk Meminimumkan Emisi Gas Buang," *Jurnal Teknik ITS*, vol.1, no.1, 2012.
- [4]. Aris Triwiyatno, dan Sumardi, "Fuel Saving Strategy in Spark Ignition Engine Using Fuzzy Logic Engine Torque Control," *Makara Teknologi*, vol.16, no.1, 2012.
- [5]. M. D. Nuralamsyah, Aris Triwiyatno, dan Budi Setiyono, "Desain Sistem Kontrol Rasio Perbandingan Udara dan Bahan Bakar (AFR) pada Mesin 4 Langkah dengan Metode Penalaan PID Berbasis Logika Fuzzy," *Transient*, vol.2, no.2, 2013.
- [6]. S. H. Lee, R. J. Howlett, dan S. D. Walters, "Fuzzy Air-Fuel Ratio Control of a Small Gasoline Engine." *Intelligent System & Signal Processing*, 2003.
- [7]. S. W. Wang, dan D. L. Yu, "Adaptive Air-Fuel Ratio Control with MLP Network," *International Journal of Automation and Computing* 2, hal 125-133, 2005.
- [8]. N. A. Kheir, M. A. Salman, dan N. J. Schouten, "Emissions and Fuel Economy Trade-Off for Hybrid Vehicles Using Fuzzy Logic." *Mathematics and Computers in Simulation* 66, hal. 155-172, 2004.
- [9]. P. G. Aleiferis *dkk.*, "Flame Chemiluminescence Studies of Cyclic Combustion Variations and Air to Fuel Ratio of the Reacting Mixture in a Lean-Burn Stratified-Charge Spark Ignition Engine." *Combustion and Flame*, hal. 72-90, 2004.
- [10]. E. Hendricks, A. Chevalier, A. Jensen, dan S. C. Sorenson, "Modelling of the intake manifold filling dynamics," *SAE paper 960037*, 1996.