

PERANCANGAN PROTOTIPE KONTROLER ELEKTRONIK *AIR-TO-FUEL RATIO* BERBASIS *PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE* UNTUK PENGHEMATAN BAHAN BAKAR PADA MESIN SEPEDA MOTOR SISTEM INJEKSI

Bangun Saputra ^{*}), Sudjadi, dan Budi Setiyono

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

^{*}E-mail: bangunsaputra17@gmail.com

Abstrak

Konsumsi bahan bakar sekecil mungkin tanpa menurunkan performa dari sepeda motor dapat diperoleh dengan melakukan pengontrolan pada nilai Air-to-Fuel Ratio (AFR) agar selalu berada pada kondisi ideal. Namun tidak pada semua kondisi nilai AFR ideal diperlukan sehingga nilai AFR bisa diatur ke nilai yang lebih besar agar campuran menjadi lebih miskin (lean). Pada penelitian ini dirancang prototipe kontroler elektronik AFR berbasis metode kontrol PID untuk menghemat konsumsi bahan bakar sepeda motor sistem injeksi elektronik, dengan masukan berupa sinyal pengereman dan derajat bukaan gas (throttle opening) yang berfungsi untuk mengaktifkan sistem kontrol. Kontroler dipasang secara paralel dengan electronic control unit (ECU) pabrikan sepeda motor dan memiliki tugas dalam mengatur lama durasi bukaan injektor sesuai dengan kondisi yang ditetapkan. Pengujian dilakukan terhadap kestabilan sistem kontrol dan penghematan bahan bakar. Hasil pengujian kestabilan sistem kontrol membuktikan bahwa prototipe kontroler elektronik AFR mampu mengontrol nilai AFR pada rentang miskin dengan stabil. Hasil pengujian penghematan bahan bakar pada rute jalan mendatar adalah sebesar 35% serta pada rute jalan menanjak dan menurun adalah 35,1%. Rata – rata penghematan bahan bakar yang dicapai secara keseluruhan adalah 35,05%.

Kata kunci: spark ignition engine, sistem injeksi elektronik, AFR, kontrol PID, electronic control unit

Abstract

Fuel consumption as small as possible without degrading the performance of motorcycle can be obtained by controlling the value of Air-to-Fuel Ratio (AFR) in order to ideal condition. Unfortunately, not at all conditions ideal AFR values needed, so the value of AFR can be set to a larger value that made the fuel mixture leaner. The purpose of this research is to create a prototype of AFR controller device based on PID control method that would be able to reduce fuel consumption of electronic injection motorbike, where the input is braking signal and the degree of throttle opening which serves to activate the control system. The prototype device is installed in parallel along with the default electronic control unit (ECU) and has a function to regulating the opening duration of the injector. The tests are conducted on the stability of control systems, and fuel savings. The results of stability control system test prove that the prototype device is able to control the value of AFR at the stable leaner range. The results of the fuel savings test on the flat route is 35% and on the uphill and downhill route is 35.1%. Average of fuel savings is 35.05%.

Keywords: spark ignition engine, electronic fuel injection, AFR, PID, electronic control unit

1. Pendahuluan

Perkembangan strategi kontrol di bidang mesin berbahan bakar bensin dalam dipusatkan pada desain mesin dan strategi kontrol untuk menunjang kebijakan hemat energi (*low fuel consumption*) dan ramah lingkungan (*low emission*) dengan tidak meninggalkan performansi mesin secara keseluruhan. Secara umum, teknologi kontrol elektronik (*Electronic Control Unit - ECU*) pada sistem mesin berbahan bakar bensin yang digunakan untuk

memenuhi target ketiga kebijaksanaan tersebut, salah satunya melalui pengaturan rasio campuran antara udara dan bahan bakar (*Air to Fuel Ratio – AFR*) sehingga diperoleh proses pembakaran yang mendekati ideal sesuai angka *stoichiometric* [1]. Mayoritas pabrikan sepeda motor saat ini menerapkan sistem *Electronic Fuel Injection (EFI)* atau injeksi elektronik pada sepeda motor keluaran terbaru. Sejauh ini, teknologi ECU pada sistem injeksi EFI ini merupakan sistem kontrol yang lazim digunakan untuk memperoleh AFR ideal sesuai *stoichiometric* ataupun

sesuai keperluan. Sistem injeksi EFI mampu mengatasi kekurangan sistem karburator / vakum yang cenderung lebih boros dan sulit untuk dilakukan pengaturan agar memperoleh AFR yang ideal[4]. Meskipun sesungguhnya banyak sekali pilihan pengontrolan yang dapat dilakukan, kendala pengembangan teknologi AFR yaitu teknologi yang ada hanya dikuasai oleh negara – negara maju di luar negeri dan bersifat *black box*. Proses pengaturan AFR sebagian besar dalam ruang lingkup internal mesin dan belum mengintegrasikan komponen di luar mesin.

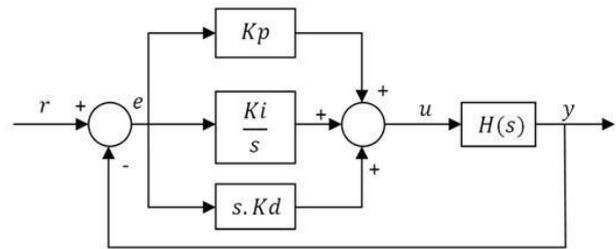
Ada dua komponen eksternal mesin yang bisa dijadikan sebagai faktor pengendali AFR, yaitu sistem pengereman (*braking system*) dan bagian bukaan gas (*throttle body*) [6]. Ketika rem dioperasikan dan/atau derajat bukaan gas pada throttle body bernilai mendekati nol alias gas tidak ditarik, mesin sepeda motor tidak membutuhkan tenaga lebih untuk menggerakkan kendaraan, sehingga nilai AFR dapat diatur pada rentangan yang lebih miskin (*lean*). Penelitian tentang sistem kontrol AFR dan *brake control system* untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar bensin sudah pernah dilakukan sebelumnya dan terbukti dapat menghemat penggunaan bahan bakar hingga 33.3% [7].

Mengacu pada karakteristik dari sistem pengereman dan throttle body tersebut, maka keduanya dapat dimanfaatkan untuk melakukan penghematan bahan bakar. Penghematan bahan bakar haruslah tetap dalam keadaan AFR terkontrol agar mesin tetap beroperasi stabil [6]. Untuk itu perlu dilakukan penelitian tentang sistem kontrol AFR dengan menggunakan metode kontrol PID untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar bensin. Penggunaan metode kontrol PID didasari atas sifat kontrol yang mampu memperbaiki respon transien sistem dengan cukup baik dan metode kontrol ini banyak digunakan pada dunia industri.

2. Metode

2.1. Sistem Kontrol PID

Sistem Kontrol PID (*Proportional – Integral – Derivative controller*) merupakan kontroler untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut. Sistem kontrol PID terdiri dari tiga buah cara pengaturan yaitu kontrol P (*Proportional*), I (*Integral*) dan D (*Derivative*), dengan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Setiap kelebihan dan kekurangan dari masing – masing kontroler P, I, dan D dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi kontroler proporsional – integral – derivatif (kontroler PID). Elemen – elemen kontroler P, I, dan D masing – masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar. Dalam perancangan sistem kontrol PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter P, I atau D agar tanggapan sinyal keluaran sistem terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diinginkan [5].



Gambar 1. Diagram blok sistem kontrol PID [5]

Persamaan dari pengontrol PID dapat ditulis sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

dimana, $K_i = K_p \times \frac{1}{T_i}$; $K_d = K_p \times T_d$

dengan,

$u(t)$ = sinyal keluaran pengendali PID

K_p = konstanta proporsional

T_i = waktu integral

T_d = waktu turunan

K_i = konstanta integral

K_d = konstanta turunan

$e(t)$ = sinyal kesalahan

Sehingga fungsi alih pengendali PID pada domain s dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

2.2. Sensor Lambda

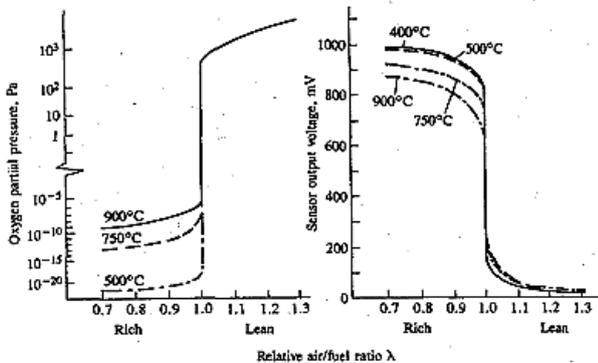
Sensor *lambda* atau sensor oksigen adalah sensor yang digunakan untuk dapat mengukur nilai AFR melalui kadar oksigen dari sisa pembakaran pada mesin pembakaran internal. Umumnya, sensor ini dipasang pada pangkal saluran pembuangan pada kendaraan atau di titik terdekat jalur pembuangan terhadap mesin. Sensor lambda jenis *narrow band* adalah jenis paling banyak digunakan pada kendaraan bersistem injeksi elektronik seperti Gambar 2 [8].



Gambar 2. Sensor lambda [8]

Sensor akan menghasilkan tegangan output dalam rentangan 0 sampai 1 volt sesuai dengan nilai AFR yang dihasilkan dari pembakaran pada mesin sehingga dapat ditentukan apakah nilai AFR sudah ideal atau belum seperti Gambar 3. Output dari lambda sensor ini kemudian

diinputkan pada ECU yang nantinya akan digunakan sebagai parameter pengontrolan. [8]. Gambar 3 menunjukkan grafik tegangan output sensor λ dan nilai AFR nya.

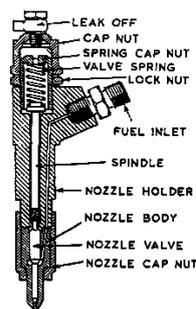


Gambar 3. Grafik tegangan output sensor λ [8]

Sensor λ yang dipakai penelitian ini adalah sensor λ bertipe *narrow band* yang hanya bisa mendeteksi 3 keadaan, yaitu *lean*, *ideal/stoichiometric*, dan *rich*.

2.3. Injektor Bahan Bakar

Injektor bahan bakar (*fuel injector*) adalah komponen pada kendaraan dengan sistem injeksi yang bertugas menyemprotkan bahan bakar ke ruang pembakaran dengan jumlah dan waktu yang tepat. Injektor akan aktif berdasarkan pemicuan pulsa yang dikeluarkan oleh ECU dengan jumlah yang berbanding lurus dengan durasi pembukaannya. [9]. Dengan begitu, injektor memegang peran penting dalam pengendalian nilai AFR pada mesin. Unit injektor dapat dilihat pada Gambar 4.

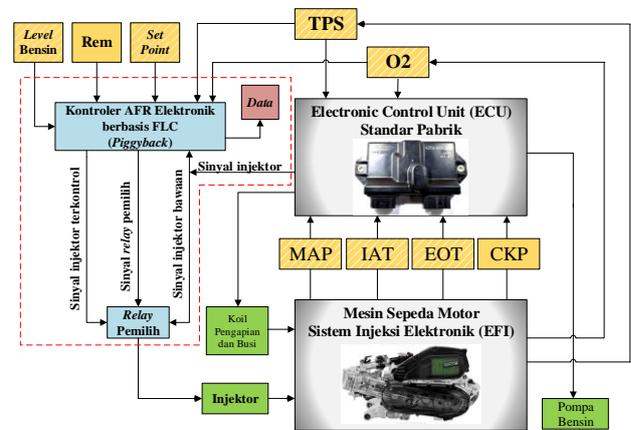


Gambar 4. *Fuel injector* [9]

2.4. Perancangan Perangkat Keras

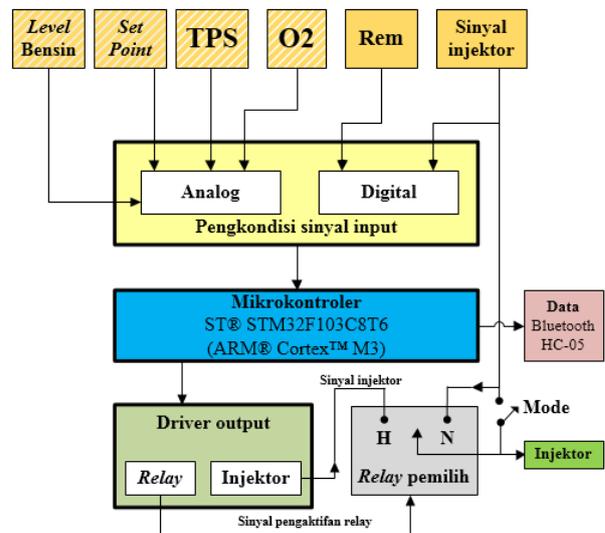
Komponen penyusun prototipe kontroler elektronik AFR dengan kontrol PID yaitu adalah mikrokontroler ARM@ STM32F103C8T6 beserta pengkondisi sinyal sebagai kontroler utama, dan sensor-sensor pendukung. Sensor-sensor yang digunakan dalam sistem ini menggunakan *brake sensor*, *throttle position sensor (TPS)*, *fuel sensor*, dan *lambda sensor (O2 sensor)* yang sudah ada pada

sepeda motor. Secara umum perancangan perangkat keras sistem kendali dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram blok keseluruhan sistem sepeda motor dengan kontroler AFR berbasis PID

Gambar 5 merupakan sistem EFI pada sepeda motor secara keseluruhan dengan alat yang dibuat (dalam garis putus-putus). Diagram dengan lebih spesifik dari alat yang dibuat ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram blok sistem utama pengendali AFR berbasis PID

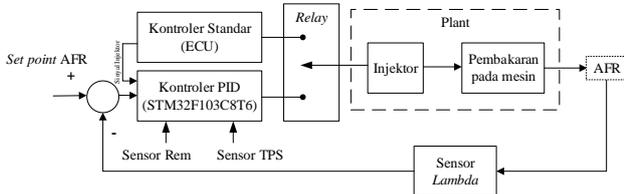
Sensor-sensor yang digunakan, diinputkan pada sistem kontrol setelah melewati pengkondisian sinyal. Kemudian kontrol akan menggerakkan aktuator berupa *relay* pemilih yang digunakan untuk memilih mode hemat (H) dimana keluaran dari sistem kontrol yang dirancang, atau mode normal dimana keluaran berasal dari ECU standar pabrikan sepeda motor (N). Sistem kontrol akan mengirim sinyal kepada injektor berupa durasi bukaan injektor dalam bentuk pulsa.

Semua pembacaan sensor yang bersifat analog (*lambda sensor*, TPS, dan *fuel sensor*) akan dinormalisasi menggunakan pengkondisi sinyal supaya menghasilkan rentangan keluaran 0 sampai 3.3V agar dapat dibaca oleh mikrokontroler.

2.5. Perancangan Kontrol PID

Pada perancangan penelitian ini, kontrol PID digunakan untuk mengatur nilai AFR pada sepeda motor dengan sistem injeksi agar sesuai dengan *set point* yang diinginkan (nilai AFR miskin). Pada perancangan kontrol PID perlu ditentukan parameter kontrol PID agar kontroler bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Parameter kontrol PID tersebut adalah Kp, Ki, dan Kd.

Penentuan parameter kontrol PID pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode penalaan *trial and error* yang dilakukan berdasarkan perkiraan dan pengecekan. Pada metode ini, pengontrolan *proportional* sangat berperan, sedangkan *integral* dan *derivative* berfungsi untuk memperbaiki keluaran yang diinginkan. Dalam menentukan nilai Kp, Ki, dan Kd secara *trial and error* harus memperhatikan aturan dari masing – masing parameter. Gambar 7 menunjukkan diagram blok sistem kontrol PID pada prototipe kontroler AFR secara umum.



Gambar 7. Diagram blok sistem kontrol PID pada prototipe kontroler AFR

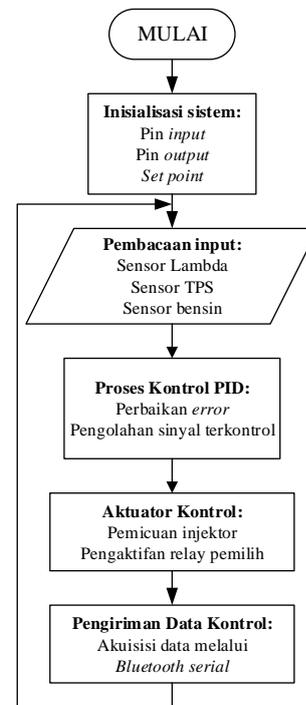
Gambar 7 menunjukkan bahwa masukan dari kontrol PID adalah berupa *error* atau selisih antara nilai keluaran AFR yang diukur oleh sensor *Lambda* dengan *set point* AFR dan keluaran dari kontrol PID adalah berupa sinyal injektor yang akan diproses oleh mikrokontroler STM32F103C8T6 untuk mengatur lama durasi bukaan injektor yang akan mempengaruhi nilai AFR.

2.6. Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak dibagi menjadi 5 bagian yaitu: inisialisasi sistem, pembacaan input, proses kontrol PID, aktuator kontrol, dan pengiriman data kontrol. Gambar 8 menunjukkan diagram alir perangkat lunak prototipe kontroler AFR. Algoritma program berdasarkan diagram alir Gambar 8 dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Inisialisasi *port* sensor dan *set point* yang akan digunakan sebagai *input* dan aktuator sebagai *output*.
2. Membaca nilai AFR, sudut bukaan *throttle* gas, *state* pengereman, dan jumlah bensin melalui hasil

3. Kalkulasi nilai aktual dan nilai acuan, selisih keduanya menjadi *error* aktual dengan *error* sebelumnya.
4. Menghitung nilai *proportional*, *integral*, dan *derivative* untuk sinyal masukan bagi injektor dalam mengatur lama bukaannya.
5. Jika kondisi sensor TPS dan sensor rem berada pada mode penghematan, maka *relay* akan aktif dan mengambil sinyal pemicuan injektor dari kontroler, sebaliknya jika kondisi sensor TPS dan sensor rem berada pada mode normal maka *relay* tidak aktif dan mengambil sinyal pemicuan injektor dari ECU pabrik.
6. Mengirimkan data berupa pembacaan nilai AFR dan jumlah bensin yang ada didalam tangki sepeda motor melalui *Bluetooth serial*.
7. Sistem kembali melakukan *loop* setelah tahap 1-6 selesai.



Gambar 8. Diagram alir perangkat lunak kontroler AFR

Pemicuan injektor akan berasal dari hasil pengolahan data pada proses kontrol PID, sedangkan pengaktifan sistem kontrol melalui *relay* pemilih akan mengacu pada kondisi-kondisi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi pengaktifan relay pemilih

Rem	Derajat bukaan gas	Relay pemilih
Aktif	<20°	Aktif (Hemat)
Aktif	≥20°	Aktif (Hemat)
Tidak aktif	<20°	Aktif (Hemat)
Tidak aktif	≥20°	Tidak aktif (Normal)

3. Hasil dan Analisa

Pengujian dilakukan langsung pada sepeda motor dalam dua tahap, yaitu pengujian kestabilan secara stasioner pada putaran mesin stasioner rendah (700-1700 RPM) selama 300 detik, serta pengujian penghematan bahan bakar pada dua rute yang berbeda. *Plant* dari pengujian adalah mesin sepeda motor. Prototipe kontroler AFR dipasang secara paralel (*piggyback*) dengan sistem ECU pabrikan sepeda motor. Semua variasi pengujian dilakukan dengan menggunakan sepeda motor yang sama. Sepeda motor yang digunakan pada saat pengujian merupakan sepeda motor dari standar pabrik serta dalam kondisi yang baik dan normal tanpa modifikasi apapun. Pengujian dilakukan secara langsung pada sepeda motor yang memiliki spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

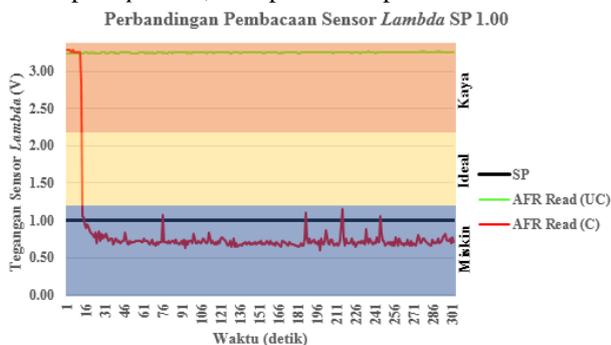
Tabel 2. Spesifikasi umum sepeda motor untuk pengujian

Spesifikasi umum Honda BeAT 110 Fi eSP	
Tipe	Skutik
Mesin	Honda NC110
Kapasitas Dimensi mesin	108 cc silinder tunggal
	50 mm bore x 55 mm stroke
Rasio kompresi	9,2:1
Bahan bakar	Bensin
Sistem bahan bakar	Indirect injection dengan Programmed Fuel Injection system (PGM-Fi)
Transmisi	Otomatis dengan sistem continuous variable transmission (CVT)
Dimensi	1873 mm x 680 mm x 1074 mm
Berat	94 Kg
Kapasitas tangki bensin	±3,7 liter

3.1. Pengujian Kestabilan Sistem Kontrol

3.1.1. Pengujian pada Set Point 1,00

Set point diatur pada angka 1,00, dimana nilai tersebut masuk pada rentangan miskin (*lean*). Pengujian kestabilan sistem pada *set point* 1,00 ini akan direpresentasikan dalam bentuk grafik. Grafik nilai tegangan dari pembacaan sensor *Lambda* antara tidak terkontrol (*uncontrolled* – UC, garis hijau) dengan terkontrol (*controlled* – C, garis merah) terhadap *set point* 1,00 dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Respon Nilai AFR dari detik 0 sampai 300 pada *set point* 1,00

Gambar 9 menunjukkan rata-rata pembacaan nilai tegangan sensor *Lambda* AFR tanpa kontroler masih berada di angka sekitar 3,25, sedangkan nilai pembacaan sensor *Lambda* keadaan terkontrol nilai AFR tidak mencapai tepat pada *set point*, melainkan stabil pada angka antara 0,7. Hal ini disebabkan karena keterbatasan kemampuan sensor *Lambda* yang berjenis rentang sempit (*narrow band*) sehingga pembacaan tegangan sensor saat kondisi miskin bisa berada pada angka berapapun diantara 0 sampai 1 V. Sistem bisa mempertahankan nilai *Lambda* AFR pada kondisi miskin. Rata-rata nilai yang didapat pada pengujian *set point* 1,00 dapat dilihat pada Tabel 3.

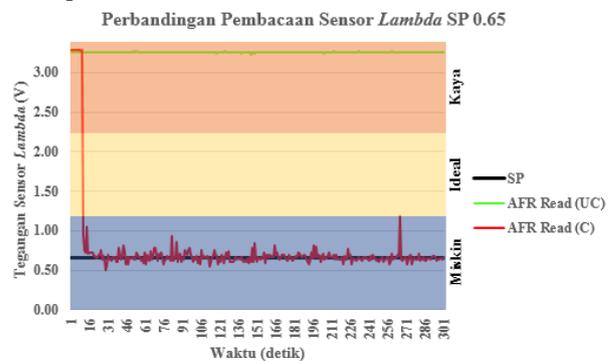
Tabel 3. Perbandingan nilai rata-rata parameter pengujian stasioner *set point* 1,00

Parameter	Perbandingan nilai rata-rata	
	Tak terkontrol	Terkontrol
<i>Lambda</i> AFR	3,25	0,72
Error	2,25	0,28

Berdasarkan Tabel 3, terbukti bahwa sistem kontrol sudah mampu mengontrol AFR dengan cukup baik. Pada saat tak terkontrol nilai *lambda* AFR stabil pada nilai 3,25 sedangkan pada keadaan terkontrol nilai *Lambda* AFR sudah mampu mencapai kondisi miskin dan stabil pada nilai 0,72. Pada kondisi tak terkontrol, *error* yang dihasilkan antara *set point* dengan nilai aktual adalah 2,25 sedangkan pada kondisi terkontrol *error* antara *set point* dengan nilai aktual adalah sebesar 0,28.

3.1.2. Pengujian pada Set Point 0,65

Set point diatur pada angka 0,65, dimana nilai tersebut masuk rentangan miskin (*lean*). Grafik nilai tegangan dari pembacaan sensor *Lambda* antara tidak terkontrol (*uncontrolled* – UC, garis hijau) dengan terkontrol (*controlled* – C, garis merah) terhadap *set point* 0,65 dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Respon Nilai AFR dari detik 0 sampai 300 pada *set point* 0,65

Gambar 10 menunjukkan rata-rata pembacaan nilai tegangan sensor *Lambda* AFR tanpa kontroler masih berada di angka sekitar 3,25 volt, jauh berada di atas *set point*. Sedangkan dengan keadaan terkontrol nilai *Lambda* AFR sudah bisa mencapai *set point* dan stabil pada rentangan miskin (*lean*). Rata-rata nilai yang didapat pada pengujian *set point* 0,65 dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan nilai rata-rata parameter pengujian stasioner *set point* 0,65

Parameter	Perbandingan nilai rata-rata	
	Tak terkontrol	Terkontrol
<i>Lambda</i> AFR	3,25	0,66
Error	2,60	0,04

Berdasarkan Tabel 4, terbukti bahwa sistem kontrol sudah bisa mengontrol AFR dengan cukup baik. Pada saat sistem tidak terkontrol nilai *lambda* AFR stabil pada nilai 3,25 sedangkan ketika sistem berada pada keadaan terkontrol nilai *Lambda* AFR sudah mampu mencapai kondisi miskin (*lean*) dan cenderung mempertahankan pada nilai *set point*nya dengan nilai rata – rata *lambda* AFR sebesar 0,66. Ketika sistem berada pada kondisi tidak terkontrol, *error* yang dihasilkan antara nilai *set point* dengan nilai aktual adalah sebesar 2,60 sedangkan pada kondisi terkontrol *error* antara *set point* dengan nilai aktual adalah sebesar 0,04.

3.2. Pengujian Penghematan Bahan Bakar

Pengujian penghematan bahan bakar dilakukan dengan mengendarai sepeda motor secara langsung pada rute yang telah ditentukan. Pengamatan hasil pengujian dilakukan dengan cara melihat presentase bahan bakar yang terukur pada tangki bahan bakar pada titik awal dan titik akhir rute pengujian, baik tanpa kontroler maupun dengan kontroler. Pengujian penghematan bahan bakar ini dilakukan pada dua rute yang berbeda. Rute pertama merupakan jalan mendatar yang minim tanjakan atau turunan dan rute kedua merupakan jalan dengan kontur menanjak dan menurun. Kondisi dan rute pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Kondisi pengujian penghematan bahan bakar

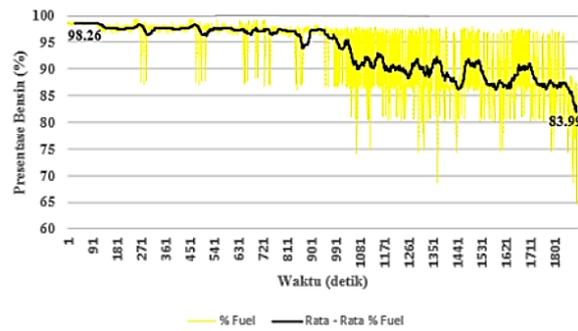
Kondisi pengujian	
Waktu pengujian	Pukul 12.00 WIB sampai 17.00 WIB
Rute pengujian	Jalan utama kota Semarang dan sekitarnya dengan rute: <ul style="list-style-type: none"> • Mangkang – Mranggen (rute mendatar ± 26,2 Km) • Jatingaleh – Ungaran – Jatingaleh (rute menanjak dan menurun ± 26,6 Km)
Kecepatan pengujian	Maksimum 60 Km/jam
Bobot pengendara	142 Kg (2 orang termasuk barang bawaan)
Bahan bakar	Pertamina Pertamax® 92, diisi sampai 98% pada tangki

Untuk mengetahui perbandingan konsumsi bahan bakar pada saat pengujian tanpa kontroler dan dengan kontroler pada tiap rute, dapat dihitung dengan persamaan:

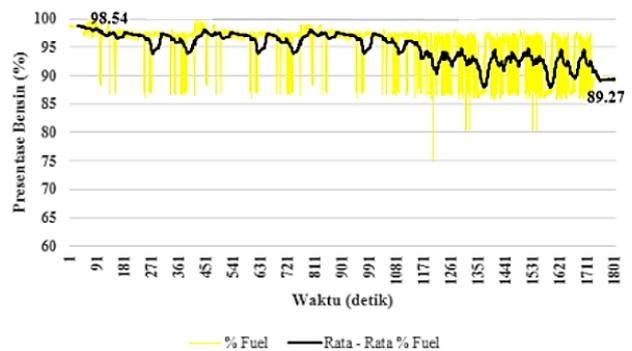
$$Penghematan = \left(1 - \frac{\text{Selisih \% bensin dengan kontroler}}{\text{Selisih \% bensin tanpa kontroler}}\right) \times 100 \% \quad (3)$$

3.2.1. Pengujian pada Rute Jalan Mendatar

Pengujian penghematan bahan bakar pada jalan yang relatif mendatar dilakukan pada rute Mangkang sampai dengan Mranggen, dimana titik awal pengujian adalah SPBU 4450105 di sekitar Terminal Mangkang dan titik akhir pengujian berada di SPBU Bandungrejo Mranggen. Pada pengujian ini akan diperlihatkan bagaimana perbandingan konsumsi bahan bakar pada sepeda motor ketika tanpa kontroler dan ketika dengan kontroler. Presentase jumlah bahan bakar yang dikonsumsi selama pengujian tanpa kontroler dan dengan kontroler berlangsung masing – masing dapat dilihat dalam grafik pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Grafik konsumsi bahan bakar tanpa kontroler pada rute jalan mendatar



Gambar 12. Grafik konsumsi bahan bakar dengan kontroler pada rute jalan mendatar

Sedangkan untuk rata-rata perbandingannya disajikan pada Tabel 6.

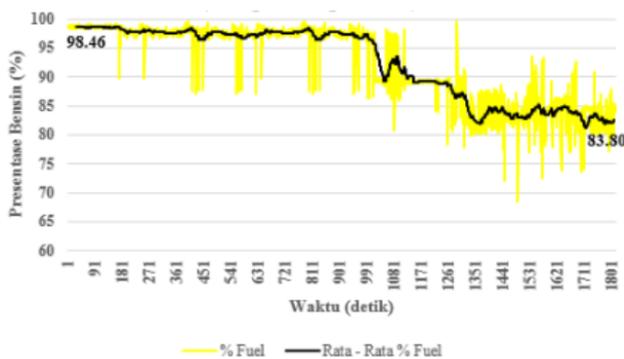
Tabel 6. Perbandingan konsumsi bahan bakar pada rute jalan mendatar

Tanpa kontroler			Dengan Kontroler		
Titik Awal	Titik Akhir	Selisih	Titik Awal	Titik Akhir	Selisih
98,26 %	83,99 %	14,27 %	98,54 %	89,27 %	9,27 %
Penghematan			35 %		

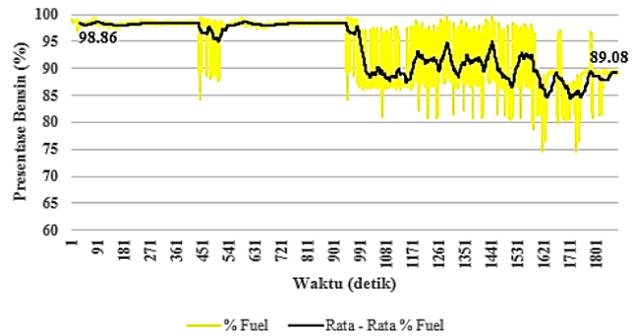
Berdasarkan Tabel 6 dapat dilihat bahwa ketika sistem berada pada kondisi tanpa kontroler, bahan bakar yang dikonsumsi oleh sepeda motor dari titik awal hingga titik akhir pengujian sebesar 14,27%. Sedangkan ketika sistem berada pada kondisi dengan kontroler, bahan bakar yang dikonsumsi oleh sepeda motor dari titik awal hingga titik akhir pengujian sebesar 9,27%. Berdasarkan perhitungan dengan persamaan 3, maka didapatkan hasil dari pengujian rute jalan mendatar membuktikan bahwa kontroler mampu melakukan penghematan bahan bakar hingga 35%.

3.2.2. Pengujian pada Rute Jalan Menanjak dan Menurun

Pengujian penghematan bahan bakar pada jalan menanjak dan menurun dilakukan pada rute Jatingaleh sampai dengan Ungaran kemudian kembali lagi ke titik awal di Jatingaleh. Titik awal pengujian adalah titik di sekitar bahu Jalan Teuku Umar diseborang Kantor PLN Distribusi Jateng & DIY, dilanjutkan hingga titik tengah di sekitar RSUD Ungaran, dan kembali lagi ke titik awal di Jatingaleh. Jarak pengujian pada rute jalan menanjak dan menurun ini kurang lebih sejauh 26,6 km. Presentase jumlah bahan bakar yang dikonsumsi selama pengujian tanpa kontroler dan dengan kontroler berlangsung masing – masing dapat dilihat dalam grafik pada Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar 13. Grafik konsumsi bahan bakar tanpa kontroler pada rute jalan menanjak dan menurun



Gambar 14. Grafik konsumsi bahan bakar dengan kontroler pada rute jalan menanjak dan menurun

Sedangkan untuk rata-rata perbandingannya disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan konsumsi bahan bakar pada rute jalan menanjak dan menurun

Tanpa kontroler			Dengan Kontroler		
Titik Awal	Titik Akhir	Selisih	Titik Awal	Titik Akhir	Selisih
98,46 %	83,80 %	15,06 %	98,86 %	89,08 %	9,78 %
Penghematan			35,1 %		

Berdasarkan Tabel 7 dapat dilihat bahwa ketika sistem berada pada kondisi tanpa kontroler, bahan bakar yang dikonsumsi oleh sepeda motor dari titik awal hingga titik akhir pengujian sebesar 15,06%. Sedangkan ketika sistem berada pada kondisi dengan kontroler, bahan bakar yang dikonsumsi oleh sepeda motor dari titik awal hingga titik akhir pengujian sebesar 9,78%. Berdasarkan perhitungan dengan persamaan 3, maka didapatkan hasil dari pengujian rute jalan mendatar membuktikan bahwa kontroler mampu melakukan penghematan bahan bakar hingga 35,1%.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang sudah dilakukan, didapatkan bahwa nilai AFR tanpa kontroler pada pengujian kestabilan sistem kontrol pada kondisi stasioner dengan *set point* 1,00 maupun 0,65 cenderung konstan berada pada rentangan kaya dan tidak dapat mencapai *set point*. Pengujian kestabilan sistem pada kondisi stasioner dengan kontroler membuktikan bahwa kontroler mampu mempertahankan nilai AFR pada rentangan miskin baik pada *set point* 1,00 maupun 0,65. Pengujian penghematan pada rute jalan mendatar didapatkan penghematan sebesar 35%, sedangkan pada rute jalan menanjak dan menurun didapatkan penghematan sebesar 35,1%. Rata-rata penghematan secara keseluruhan adalah 35,05%. Untuk pengembangan pada penelitian selanjutnya, penggunaan sensor AFR bertipe *wide band* dengan penggunaan metode kontrol *hybrid Fuzzy-PID*, kontrol adaptif, maupun kontrol *robust* sangat disarankan karena dapat meningkatkan

kestabilan dan keandalan sistem serta disarankan untuk menggunakan sensor aliran (*flow sensor*) dalam melakukan pengukuran konsumsi bahan bakar karena dapat meningkatkan akurasi pembacaan.

Referensi

- [1]. M. D. Nuralamsyah, A. Triwiyatno, and B. 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, JUNI 2013, ISSN: 2302-9927, 354
- [2]. S. F. Situmorang, A. Triwiyatno, and B. Setiyono, "Perancangan Sistem Kontrol Hybrid *Fuzzy* PI Untuk Pengaturan Ignition Timing pada Model Spark Ignition Engine." *TRANSIENT*, VOL.4, NO. 3, SEPTEMBER 2015, ISSN: 2302-9927, 728
- [3]. F. Xie, X. Li, Y. Su, W. Hong, B. Jiang, and L. Han, "Influence of air and EGR dilutions on improving performance of a high compression ratio spark-ignition engine fueled with methanol at light load," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 94, pp. 559–567, 2016.
- [4]. Nasyrudin A. (2012), *Modifikasi Mesin Sistem Konvensional Menjadi Sistem Injeksi Bahan Bakar Elektronik pada Toyota Kijang 5K (Sistem Bahan Bakar)*, Universitas Negeri Sebelas Maret. Surakarta
- [5]. K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Fifth. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2002.
- [6]. Ebrahimi, B., Tafreshi, R., Masudi, H., Franchek, M., Mohammadpour, J., & Grigoriadis, K. (2012). A parameter-varying filtered PID strategy for air-fuel ratio control of spark ignition engines. *Control Engineering Practice*, 20(8), 805–815.
- [7]. S. Munahar, A. Triwiyatno, J. D. Setiawan, M. T, "STRATEGI PENINGKATAN MODEL AIR TO FUEL RATIO (AFR)," *TRANSMISI* Vol 18, No 1 Januari (2016)
- [8]. Hamann, E., Manger, H., & Steinke, L. (1977). Lambda-sensor with Y2O3-Stabilized ZrO2-ceramic for application in automotive emission control systems (No. 770401). SAE Technical Paper.
- [9]. Landschoot, T. P., Perry, R. B., Haltiner Jr, K. J., Wendt, P. R., Ciesinski, C. H., Muller-Girard Jr, O., ... & Stuecken, J. M. (2001). U.S. Patent No. 6,264,112. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.