

# PERANCANGAN PROTOTIPE KONTROLER *AIR-TO-FUEL RATIO* ELEKTRONIK BERBASIS *FUZZY LOGIC* UNTUK PENGHEMATAN BAHAN BAKAR PADA MESIN SEPEDA MOTOR SISTEM INJEKSI

Joshua Harbangan Dharmarakel Panjaitan <sup>\*)</sup>, Sudjadi, dan Enda Wista Sinuraya

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

<sup>\*)</sup>E-mail: [joshuaharbangan@gmail.com](mailto:joshuaharbangan@gmail.com)

## Abstrak

Penggunaan bahan bakar sekecil mungkin tanpa menurunkan performa sepeda motor dapat diperoleh dengan mengontrol angka *Air-to-Fuel Ratio (AFR)* agar selalu bernilai ideal. Namun pada beberapa keadaan seperti ketika dilakukan pengereman pada sepeda motor yang sedang berjalan dan ketika tuas gas (*throttle*) tidak ditarik (*zero throttle*), sepeda motor tidak membutuhkan tenaga penuh. Kedua keadaan tersebut hanya memerlukan sedikit asupan bahan bakar sehingga nilai AFR bisa diatur ke nilai yang lebih tinggi agar campuran menjadi lebih miskin bahan bakar (*lean*). Meskipun sudah ada sistem kontrol pada sepeda motor, tetapi sulit untuk dilakukan analisis maupun modifikasi karena sistem tersebut bersifat *black box* dengan karakteristik *nonlinear*. Penelitian ini merancang prototipe kontroler AFR elektronik berbasis logika *Fuzzy (FLC)* untuk menghemat konsumsi bahan bakar sepeda motor sistem injeksi elektronik, dengan masukan berupa sinyal pengereman dan derajat bukaan gas (*throttle opening*) untuk pengaktifan sistem kontrol. Kontroler akan bekerja secara paralel dengan *electronic control module (ECM)* pabrikan pada sepeda motor dalam mengatur durasi buka injektor. Hasil penelitian membuktikan bahwa prototipe alat mampu mengontrol nilai AFR pada rentang miskin dengan stabil pada pengujian stasioner. Penghematan bahan bakar yang dicapai adalah 33% pada rute jalan mendatar, dan 31,94% pada rute jalan menanjak dan menurun. Rata-rata penghematan total adalah sebesar 32,47%.

*Kata kunci: spark ignition engine, sistem injeksi elektronik, air to fuel ratio, logika Fuzzy, electronic control module*

## Abstract

For the most motorcycle engine, optimum performance with lesser fuel usage could be achieved by tuning the Air to Fuel Ratio (AFR) value on its ideal value. Unfortunately, an ideal value is not always needed, especially when braking and/or while the throttle is not fully operated, so the AFR value could be set into leaner value to reduce fuel usage. By default, there was an embedded AFR controller in the motorcycle inside the motorcycle's Electronic Control Module (ECM) unit, but modifying such that controller was a challenging task. The controller itself is a black box device and the nonlinearity of the motorcycle system have made it more difficult to be analyzed. The scope of this research is to create a prototype of AFR controller device based on Fuzzy Logic Controller (FLC) that would be able to reduce amount of injected fuel when the brake is activated and/or the throttle opening is at zero state. The prototype device is connected in parallel along with the default ECM and would operate only when triggered. As the result of stationary test, the controller was able to reduce and stabilize the AFR at leaner value. Fuel consumption had reduced to 33% at 26,2 Km on relatively flat route, 31,94% at 26,6 Km on uphill-downhill route, and 32,47% in average.

*Keywords: spark ignition engine, electronic fuel injection, air to fuel ratio, Fuzzy Logic, electronic control module*

## 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.

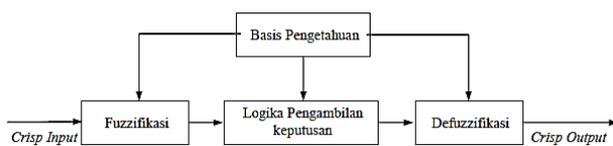
Ada dua komponen eksternal mesin yang bisa dijadikan sebagai faktor pengendali AFR, yaitu sistem pengereman (*braking system*) dan bagian bukaan gas (*throttle body*) [6]. Ketika rem dioperasikan dan/atau derajat bukaan gas pada *throttle body* bernilai mendekati nol alias gas tidak ditarik, mesin sepeda 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 logika *Fuzzy* untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar bensin. Penggunaan logika *Fuzzy* didasari atas sifat sistem sepeda motor yang *nonlinear* dan bersifat *black box*, sehingga dibutuhkan kontrol cerdas untuk mengatasinya.

## 2. Metode

### 2.1. Sistem Logika Fuzzy

Konfigurasi dasar dari sistem logika *fuzzy* yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 1.

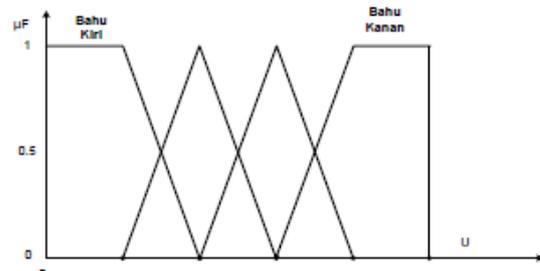


Gambar 1. Konfigurasi dasar sistem logika *fuzzy* [5]

Konfigurasi sistem logika *fuzzy* terdapat empat komponen utama, yaitu unit fuzzifikasi, basis aturan, logika pengambilan keputusan dan unit defuzzifikasi.

#### 2.1.1. Fuzzifikasi

Komponen fuzzifikasi berfungsi untuk memetakan masukan data tegas ke dalam himpunan *fuzzy* menjadi nilai derajat keanggotaan. Fungsi keanggotaan yang digunakan adalah fungsi keanggotaan bahu yang merupakan penggabungan antara fungsi keanggotaan bentuk segitiga dan trapesium seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Fungsi keanggotaan bentuk bahu [5]

#### 2.1.2. Rule Base

Basis aturan logika *fuzzy* untuk pengambilan keputusan adalah kumpulan aturan-aturan logika *fuzzy* yang dibuat berdasarkan pengetahuan manusia dalam menentukan suatu putusan. Metode yang digunakan dalam penentuan aturan *fuzzy* adalah menggunakan pendekatan heuristik. Pendekatan heuristik menggunakan pengetahuan pakar dan analisis perilaku sistem untuk mendapatkan aturan-aturan *fuzzy*. Aturan yang ditetapkan digunakan untuk menghubungkan antara variabel-variabel masukan dan variabel-variabel keluaran [5][7]. Aturan ini berbentuk 'JIKA – MAKA' (IF – THEN), sebagai contoh adalah :

Aturan i : JIKA x adalah  $A_i$  DAN y adalah  $B_i$  MAKA z adalah  $C_i$

Dengan :

$A_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) adalah himpunan *Fuzzy* untuk variabel masukan x.

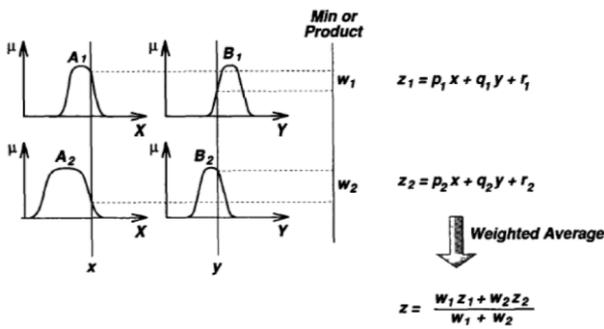
$B_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) adalah himpunan *Fuzzy* untuk variabel masukan y.

$C_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) adalah himpunan *Fuzzy* untuk variabel keluaran z.

#### 2.1.3. Logika Pengambilan Keputusan

Penyimpulan *fuzzy* (*fuzzy inference*) mengaplikasikan aturan-aturan *fuzzy* pada masukan *fuzzy* kemudian mengevaluasi setiap aturan. Prinsip logika *fuzzy* digunakan untuk mengkombinasi aturan-aturan JIKA-MAKA (IF-THEN) yang terdapat dalam basis aturan kedalam suatu pemetaan dari suatu himpunan *fuzzy* input ke suatu himpunan *fuzzy* output.

Keputusan dari sistem logika *fuzzy* akan ditentukan juga dengan nilai *singleton* dan basis aturan yang telah di desain. Gambar 3 menunjukkan inferensi *fuzzy* model Sugeno.



Gambar 3. Inferensi fuzzy model Sugeno [5]

Masukan yang digunakan merupakan himpunan fuzzy sedangkan bagian keluaran merupakan himpunan yang berupa persamaan linier. Fungsi ini didapatkan dari nilai minimum kedua fungsi keanggotaan dengan menggunakan operator AND.

2.1.4. Defuzzifikasi

Masukan dari proses defuzzifikasi adalah suatu himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy, sedangkan keluaran yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan fuzzy tersebut, sehingga jika diberikan suatu himpunan fuzzy dalam range tertentu, maka harus dapat diambil suatu nilai crisp tertentu sebagai keluarannya. proses defuzzifikasi metode Sugeno dengan metode *weighted of average* dapat ditulis dalam persamaan 2 [9].

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Dimana:

\$w\_i\$ adalah hasil operasi logika fuzzy

\$z\_i\$ adalah hasil keluaran dari rule base

\$K\$ adalah nilai keluaran defuzzifikasi dengan metode WOA

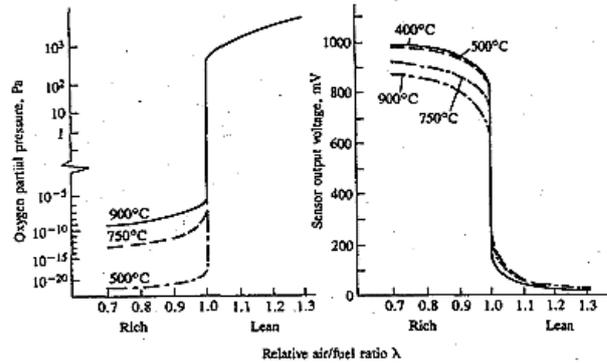
2.2. Sensor Lambda

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 4. [8].



Gambar 4. 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 5. Output dari lambda sensor ini kemudian diinputkan pada ECU yang nantinya akan digunakan sebagai parameter pengontrolan. [8]. Gambar 5 menunjukkan grafik tegangan output sensor lambda dan nilai AFR nya.

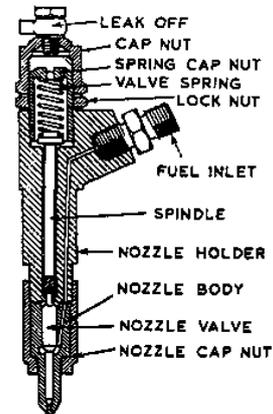


Gambar 5. Grafik tegangan output sensor lambda [8]

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

2.3. Injektor Bahan Bakar

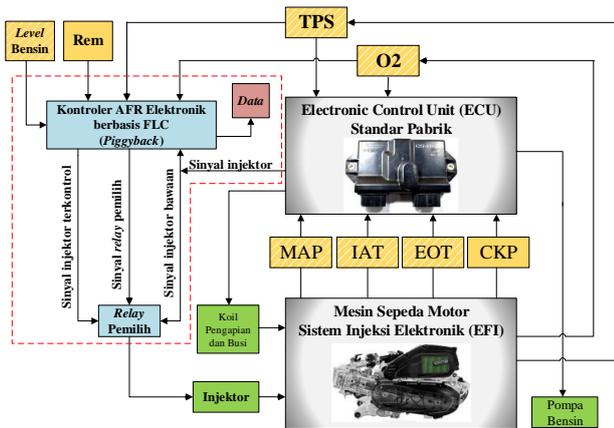
Injektor bahan bakar (*fuel injector*) adalah komponen pada kendaraan dengan sistem injeksi yang bertugas menyemprotkan bahan bakar ke ruang pembakaran dengan jumlah dan waktu yang tepat. Injektor akan aktif berdasarkan pemicuan pulsa yang dikeluarkan oleh ECU dengan jumlah yang berbanding lurus dengan durasi pembukaannya. [9]. Dengan begitu, injektor memegang peran penting dalam pengendalian nilai AFR pada mesin. Unit injektor dapat dilihat pada Gambar 6



Gambar 6. Fuel injector [9]

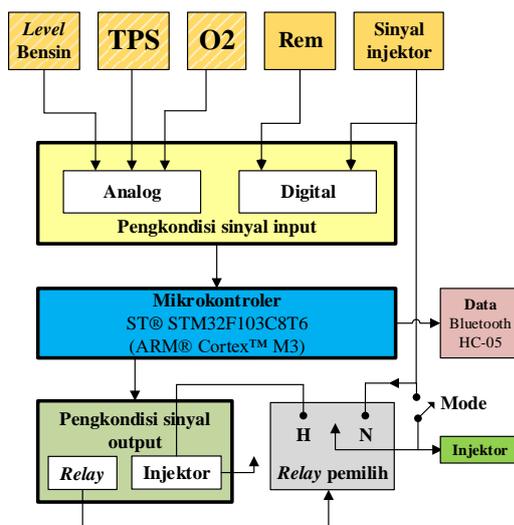
2.4. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan komponen penyusun kontrol AFR dengan logika *Fuzzy* yaitu kontroler utama berbasis mikrokontroler ARM® STM32F103C8T6 beserta pengkondisi sinyal sebagai *Fuzzy logic controller* (FLC), dan sensor-sensor. Sensor-sensor yang digunakan dalam sistem ini menggunakan *brake sensor*, *throttle position sensor* (TPS), *fuel sensor*, dan *lambda sensor* yang merupakan bawaan sepeda motor. Secara umum perancangan perangkat keras sistem kendali dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram blok keseluruhan sistem sepeda motor dengan pengendali AFR dengan *Fuzzy logic controller*

Gambar 7 merupakan sistem EFI pada sepeda motor secara keseluruhan dengan alat yang dibuat (dalam garis putus-putus). Diagram bagian spesifik dari alat ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Diagram blok sistem utama pengendali AFR berbasis FLC

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 ECM standar 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 lebih mudah dalam perhitungan pada logika *Fuzzy*.

2.5. Perancangan FLC

Perancangan FLC terbagi atas tiga tahap, yaitu fuzzifikasi, basis aturan, dan defuzzifikasi. Karena sistem yang akan dikontrol bersifat *black box*, maka perancangan FLC pada tahap fuzzifikasi dan basis aturan akan dimulai dari pengambilan data awal untuk mengetahui karakteristik sistem.

2.5.1. Fuzzifikasi

Rentangan pembacaan digunakan untuk proses fuzzifikasi. Tabel 1 menunjukkan rentangan *error* dan  $\Delta error$  yang mungkin terjadi pada sistem pada *set point* 0,65.

Tabel 1. Pengujian penentuan nilai rentangan error dan  $\Delta error$  dengan *set point* 0,65

t	Set Point	Tegangan Sensor AFR Terbaca	Error		$\Delta error$
			Real	Normalisasi*	
1	0,65	0,62	-0,03	0	0
..	..	..	..	..	..
9	0,65	0,6	-0,05	0	0
10	0,65	0,69	0,04	0,04	0,04
..	..	..	..	..	..
21	0,65	0,6	-0,05	0	0
22	0,65	3,28	2,63	2,63	2,63
..	..	..	..	..	..
26	0,65	3,28	2,63	2,63	0
27	0,65	1,61	0,96	0,96	-1,67
..	..	..	..	..	..
75	0,65	3,28	2,63	2,63	0
76	0,65	0,81	0,16	0,16	-2,46
..	..	..	..	..	..
172	0,65	3,27	2,62	2,62	0
173	0,65	1,07	0,42	0,42	-2,21
..	..	..	..	..	..
290	0,65	0,68	0,03	0,03	0
291	0,65	0,66	0,01	0,01	0,01

\*Error yang bernilai negatif akan dinormalisasi menjadi bernilai 0

Tabel 1 menunjukkan dari beberapa cuplikan data yang diambil selama pengujian dengan *set point* 0,65. Rentangan *error* berada di antara 0 sampai 2,63 dan  $\Delta error$  berada di antara -2,46 sampai dengan 2,63. Untuk

pengujian rentangan error dan  $\Delta error$  untuk set point 1,00 ditunjukkan oleh Tabel 2.

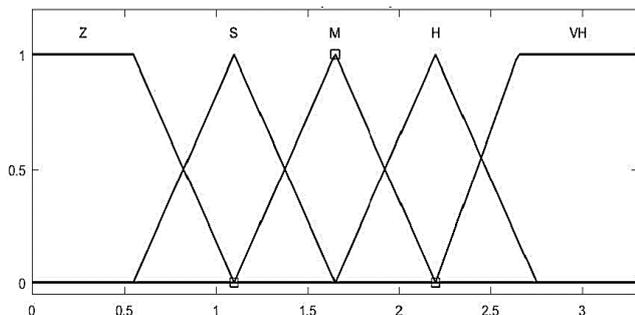
**Tabel 2. Pengujian penentuan nilai rentangan error dan  $\Delta error$  dengan set point 1,00**

t	Set Point	Tegangan Sensor AFR Terbaca	Error		$\Delta error$
			Real	Normalisasi*	
1	1,00	0,44	-0,56	0	0
..	..	..	..	..	..
21	1,00	0,38	-0,62	0	0
22	1,00	3,26	2,26	2,26	2,26
..	..	..	..	..	..
33	1,00	3,26	2,26	2,26	0
34	1,00	2,60	1,60	1,60	-1,66
..	..	..	..	..	..
38	1,00	0,69	-0,31	0	0
39	1,00	1,18	0,18	0,18	0,18
..	..	..	..	..	..
85	1,00	3,27	2,27	2,27	0
86	1,00	0,88	-0,12	0	-2,27
..	..	..	..	..	..
189	1,00	3,26	2,26	2,26	0
190	1,00	1,44	0,44	0,44	-1,83
..	..	..	..	..	..
209	1,00	0,51	-0,49	0	0
210	1,00	3,27	2,27	2,27	2,27

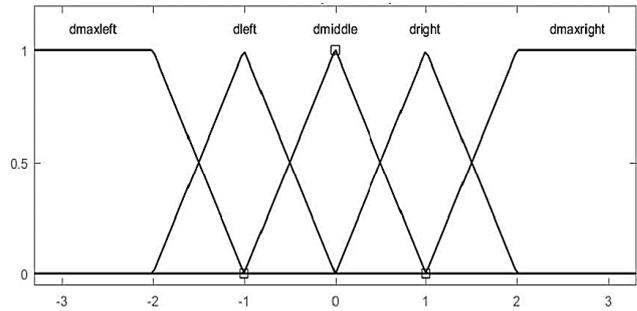
\*Error yang bernilai negatif akan dinormalisasi menjadi bernilai 0

Tabel 2 menunjukkan dari beberapa cuplikan data yang diambil selama pengujian dengan set point 1,00. Rentangan error berada di antara 0 sampai 2,27 dan  $\Delta error$  berada di antara -2,27 sampai dengan 2,27.

Berdasarkan data uji dari Tabel 1 dan Tabel 2, maka dapat dirancang kontrol Fuzzy dengan rentangan pada proses fuzzifikasi. Perancangan logika fuzzy ini memiliki dua buah masukan crisp, yaitu error dan  $\Delta error$ . Pada proses ini, dilakukan konversi data dari bentuk tegas (crisp) yang berupa error dan  $\Delta error$  diubah kedalam derajat keanggotaan menjadi variabel-variabel fuzzy pada masing-masing error dan  $\Delta error$  adalah bentuk bahu. Jumlah label error dan  $\Delta error$  terdapat 5 label yaitu Z, S, M, H, dan VH. Rentangan tersebut ditunjukkan seperti pada Gambar 9 dan Gambar 10



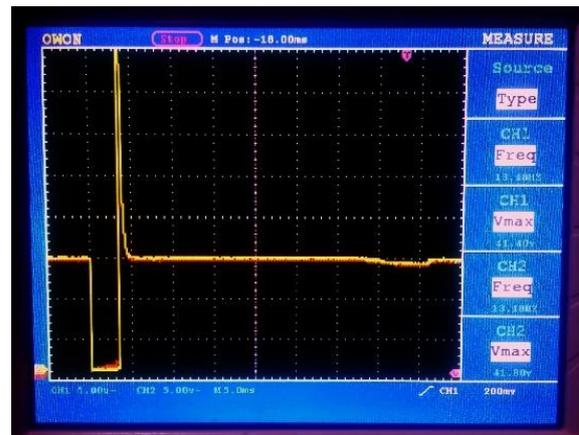
**Gambar 9. Batasan fungsi keanggotaan error**



**Gambar 10. Batasan fungsi keanggotaan  $\Delta error$**

**2.5.2. Evaluasi Aturan**

Batasan fungsi keanggotaan singleton untuk output adalah nilai pewaktuan durasi buka injektor yang digunakan untuk memicu bukaan injektor. Untuk mengetahui rentangan tersebut maka dilakukan pengujian awal dengan mengukur pulsa injektor tiap siklusnya dalam keadaan sistem belum terkontrol (standar pabrik). Pengujian tersebut dilakukan dengan menggunakan osiloskop seperti ditunjukkan oleh Gambar 11.



(v/div = 5v, t/div=5.00 ms)

**Gambar 11. Pewaktuan durasi buka injektor standar**

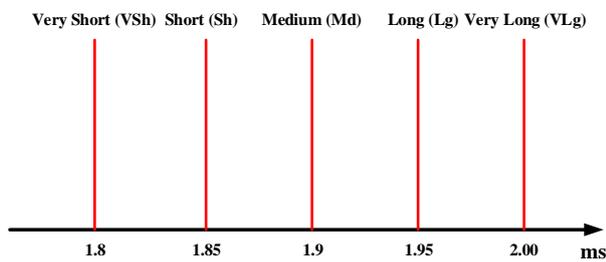
Durasi buka injektor standar pada putaran stasioner (700-1700 rpm) berkisar antara 2,5 sampai 3,0 ms tiap pulsanya, sehingga untuk melakukan penghematan durasi tersebut dapat dikurangi hingga nilai tertentu. Akan tetapi pengurangan durasi tersebut harus dalam batas dimana mesin tetap bisa menyala dengan stabil.

Pengujian durasi minimum dilakukan dengan memasukkan pewaktuan dari mulai angka yang paling besar dan dikecilkan hingga batas tertentu dimana mesin sepeda motor tidak bisa menyala dengan stabil atau tidak bisa dinyalakan sama sekali. Pengujian durasi minimum tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian durasi bukaan injektor dengan pengendara

Durasi bukaan injektor (ms)	Keadaan mesin	Keterangan
1,725	Tidak bisa dihidupkan	Tidak stabil
1,75	Tidak bisa dihidupkan	Tidak stabil
1,775	Bisa dihidupkan	Tidak stabil
1,8	Bisa dihidupkan	Stabil
1,825	Bisa dihidupkan	Stabil

Dengan mempertimbangkan pewaktuan dari Tabel 3 di atas, maka dapat ditentukan nilai *singleton* untuk keluaran inferensi *fuzzy*, seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Nilai *singleton* keluaran *timing* injektor pengujian stasioner (atas) dan pengujian berjalan (bawah)

Derajat keanggotaan keluaran pewaktuan injektor dicari dengan membandingkan derajat keanggotaan dari label *error* dan *derror*, kemudian dipilih nilai minimal dari kedua label tersebut. Jumlah kombinasi yang dihasilkan dari himpunan masukan *fuzzy*, yang tiap labelnya memiliki 5 fungsi keanggotaan. Maka total kombinasi yang dihasilkan adalah 5 buah fungsi keanggotaan label *depherror* dikali 5 buah fungsi keanggotaan yaitu 25 aturan seperti pada Tabel 4.

Tabel 4 Basis aturan *fuzzy*

error	Z	S	M	H	VH
dmaxleft	Sh	Md	Lg	Lg	VLg
dleft	VSh	Sh	Md	Md	Lg
dmedium	VSh	VSh	VSh	Sh	Md
dright	VSh	Sh	Md	Md	Lg
dmaxright	Sh	Md	Lg	Lg	VLg

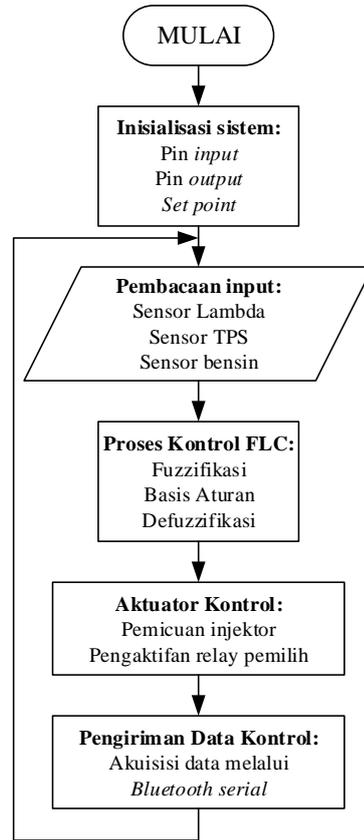
2.5.3. Defuzzifikasi

Nilai keluaran didapatkan pada defuzzifikasi melalui metode *Weight of Average* (WOA). Dimana nilai tersebut merupakan nilai keluaran *singleton* dari *fuzzy* yang akan dikalikan dengan enam buah label keluaran dari tahap *rule base* dengan menggunakan persamaan 3

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

2.6. Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak dibagi menjadi 5 bagian yaitu: inisialisasi sistem, pembacaan input, proses kontrol FLC, aktuator kontrol, dan pengiriman data kontrol. Diagram alir (*flowchart*) dari sistem dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Diagram alir (*flowchart*) dari sistem

Pemicuan injektor akan berasal dari hasil pengolahan data pada proses kontrol FLC, sedangkan pengaktifan sistem kontrol untuk penghematan dilakukan melalui *relay* pemilih akan mengacu pada kondisi-kondisi seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. 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 pada dua rute berbeda. Pengujian dilakukan secara langsung pada sepeda motor yang memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. Spesifikasi umum sepeda motor untuk pengujian

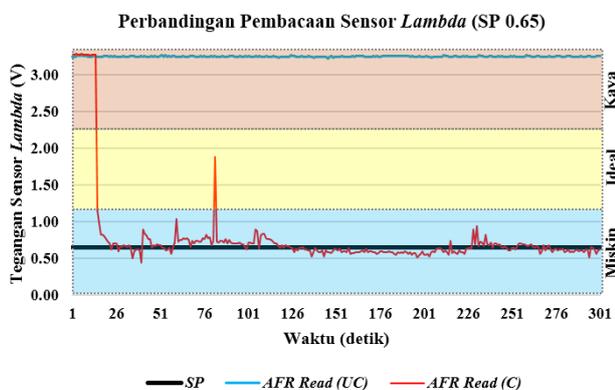
Spesifikasi umum Honda BeAT 110 Fi eSP	
Tipe	Skutik
Mesin	Honda NC110
Kapasitas mesin	108 cc silinder tunggal 50 mm bore x 55 mm stroke
Rasio kompresi	9,2:1
Bahan bakar	Bensin
Sistem bahan bakar	Indirect injection dengan Programmed Fuel Injection system (PGM-Fi)
Transmisi	Otomatis dengan sistem continuous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

Sepeda motor yang digunakan pada saat pengujian berada dalam kondisi baik tanpa dilakukan modifikasi apapun.

### 3.1. Pengujian Kestabilan Sistem Kontrol

#### 3.1.1. Pengujian pada Set point 0,65

Set point diatur pada angka 0,65, dimana nilai tersebut masuk rentangan miskin (*lean*). Grafik sistem ditunjukkan oleh Gambar 14



Gambar 14. Respon Nilai AFR dari detik 0 sampai 300 pada set point 0,65

Gambar 14 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 7.

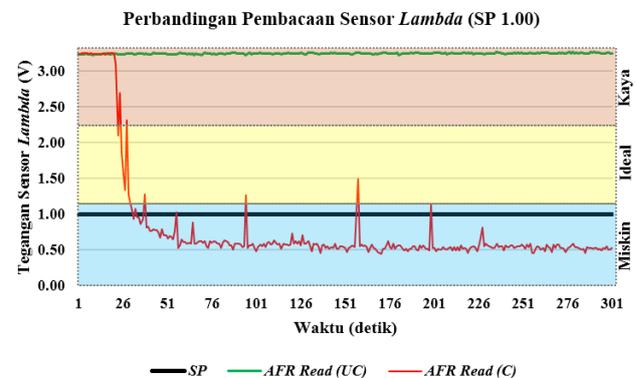
Tabel 7. Perbandingan nilai rata-rata parameter pengujian stasioner set point 0,65

Parameter	Perbandingan nilai rata-rata	
	Tak terkontrol	Terkontrol
<i>Lambda</i> AFR	3,25	0,78
Error	2,60	0,16

Berdasarkan Tabel 7, terbukti bahwa sistem kontrol sudah bisa mengontrol AFR dengan cukup baik

#### 3.1.2. Pengujian pada Set point 1,00

Set point diatur pada angka 1,00, dimana nilai tersebut masuk rentangan miskin (*lean*). Grafik sistem ditunjukkan oleh Gambar 15



Gambar 15. Respon Nilai AFR dari detik 0 sampai 300 pada set point 1,00

Gambar 15 menunjukkan rata-rata pembacaan nilai tegangan sensor *Lambda* AFR tanpa kontroler masih berada di angka sekitar 3,25 volt, sedangkan nilai pembacaan sensor *Lambda* keadaan terkontrol nilai AFR tidak mencapai tepat pada set point, melainkan berada pada angka antara 0,5 sampai 0,6. 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. Namun meskipun tidak tepat mencapai set point, karena error negatif dianggap nol maka sistem sudah dianggap stabil. Sistem bisa mempertahankan nilai *Lambda* AFR pada kondisi miskin. Rata-rata nilai yang didapat pada pengujian set point 0,65 dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. 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	0,81
Error	2,25	0,19

Berdasarkan Tabel 8, terbukti bahwa sistem kontrol sudah bisa mengontrol AFR dengan cukup baik

**3.2. Pengujian Penghematan Bahan Bakar**

Pengujian penghematan bahan bakar dilakukan dengan mengendarai sepeda motor secara langsung pada rute yang telah ditentukan dan melihat presentase bahan bakar yang terukur pada tangki bahan bakar pada titik awal dan titik akhir rute pengujian (tanpa kontroler maupun dengan kontroler). Kondisi dan rute pengujian dapat dilihat pada Tabel 9.

**Tabel 9. 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"> <li>• Mangkang – Mranggen (rute mendatar ± 26,2 Km)</li> <li>• Jatingaleh – Ungaran – Jatingaleh (rute menanjak dan menurun ± 26,6 Km)</li> </ul>
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 tanpa kontroler terpasang dengan saat kontroler terpasang 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 mendatar dilakukan pada rute Mangkang sampai dengan Mranggen, dari sekitar terminal Mangkang hingga Bandungrejo, Mranggen. Hasil pengambilan presentase jumlah bahan bakar dapat dilihat dalam grafik pada Gambar 16.

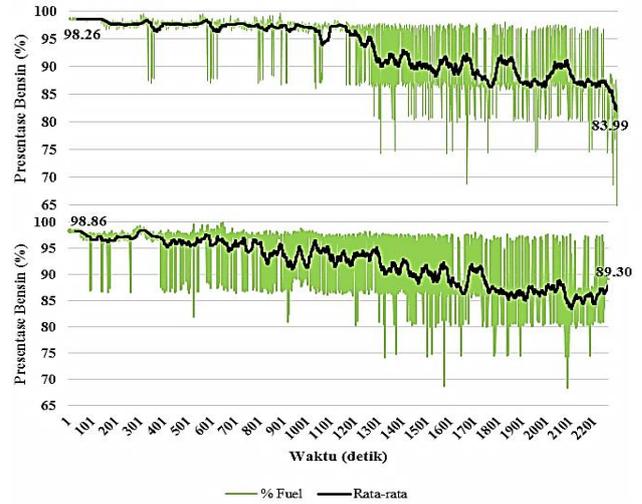
Sedangkan untuk rata-rata perbandingannya disajikan pada Tabel 10.

**Tabel 10. Perbandingan konsumsi bahan bakar pada rute jalan mendatar**

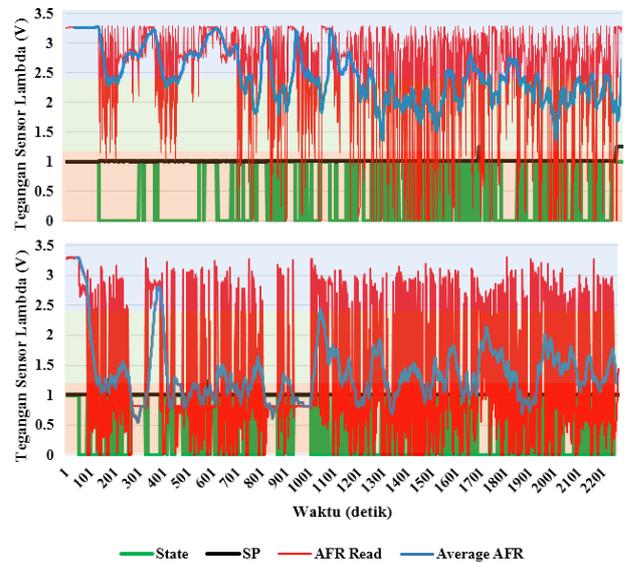
Tanpa kontroler			Dengan Kontroler		
Titik Awal	Titik Akhir	Selisih	Titik Awal	Titik Akhir	Selisih
98,26 %	83,99 %	14,27 %	98,86 %	89,30 %	9,56 %
Penghematan			33 %		

Hasil dari pengujian rute jalan mendatar membuktikan bahwa kontroler mampu menghemat bahan bakar hingga 33%.

Karakteristik sistem selama pengujian rute Mangkang – Mranggen ditunjukkan pada Gambar 17.



**Gambar 16. Grafik perbandingan konsumsi bahan bakar tanpa kontroler (atas) dan dengan kontroler (bawah) pada rute jalan mendatar**



**Gambar 17. Grafik karakteristik sistem pada pengujian rute jalan mendatar**

Rata-rata pembacaan sensor Lambda AFR dan error ditunjukkan pada Tabel 11.

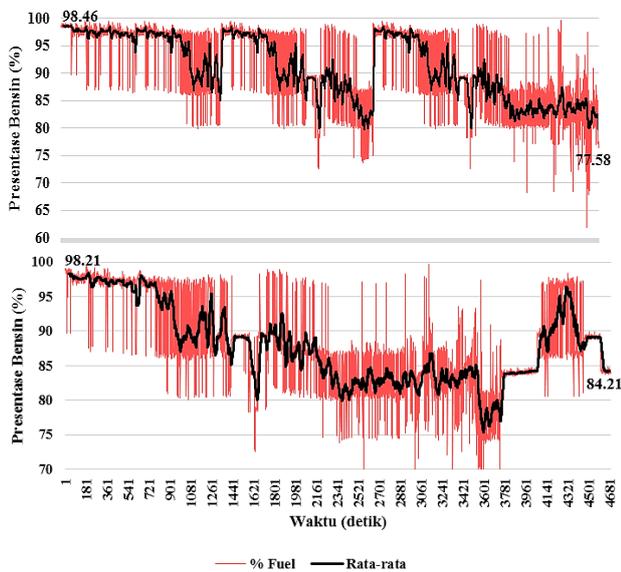
**Tabel 11. Perbandingan nilai rata-rata parameter pengujian penghematan rute jalan mendatar**

Parameter	Perbandingan nilai rata-rata	
	Tak terkontrol	Terkontrol
Lambda AFR	2,45	1,36
Error	1,54	0,62

Berdasarkan Gambar 17 dan Tabel 11 dapat dilihat bahwa nilai rata-rata pembacaan AFR tak terkontrol adalah 2,45 dengan *error* rata-rata sebesar 1,54. Nilai rata-rata pembacaan AFR terkontrol adalah 1,36 dengan *error* rata-rata 0,62. Hal ini membuktikan bahwa sistem kontrol telah meminimalisir penggunaan bahan bakar.

### 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 persimpangan Jalan Kesatrian Jatingaleh, dilanjutkan hingga titik tengah di sekitar RSUD Ungaran, dan kembali lagi ke titik awal di Jatingaleh. Hasil pengambilan presentase jumlah bahan bakar dapat dilihat dalam grafik pada Gambar 18.



Gambar 18. Grafik perbandingan konsumsi bahan bakar tanpa kontroler (atas) dan dengan kontroler (bawah) pada rute jalan menanjak dan menurun

Sedangkan untuk rata-rata perbandingannya disajikan pada Tabel 12.

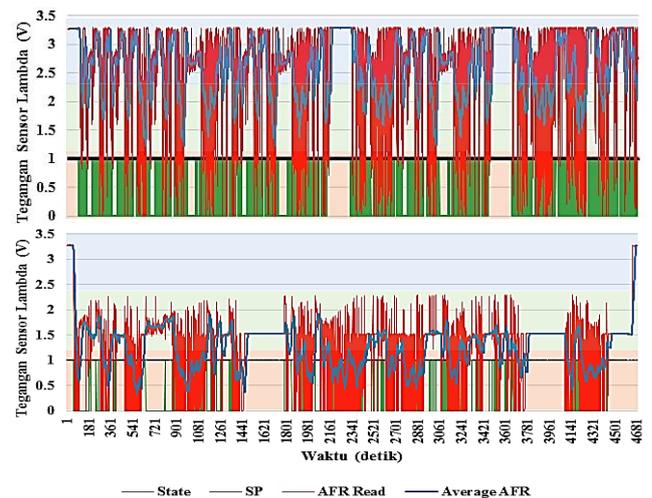
Tabel 12. Perbandingan konsumsi bahan bakar pada rute jalan menanjak dan menurun

Tanpa kontroler			Dengan Kontroler		
Titik Awal	Titik Akhir	Selisih	Titik Awal	Titik Akhir	Selisih
98,46 %	77,58 %	20,88 %	98,21 %	84,21 %	14 %
<b>Penghematan</b>			<b>31,94 %</b>		

Hasil dari pengujian rute jalan menanjak dan menurun berdasarkan data yang ditunjukkan oleh Tabel 12

membuktikan bahwa kontroler mampu menghemat bahan bakar hingga 31,94%. Penghematan sedikit lebih kecil ketimbang pengujian jalan mendatar karena pada saat jalan menanjak bahan bakar yang dibutuhkan lebih banyak karena mesin membutuhkan tenaga yang lebih besar.

Karakteristik sistem selama pengujian rute Jatingaleh – Ungaran PP ditunjukkan pada Gambar 19.



Gambar 19. Grafik karakteristik sistem pada pengujian rute jalan menanjak dan menurun

Rata-rata pembacaan sensor Lambda AFR dan error ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13. Perbandingan nilai rata-rata parameter pengujian penghematan rute jalan menanjak dan menurun

Parameter	Perbandingan nilai rata-rata	
	Tak terkontrol	Terkontrol
<b>Lambda AFR</b>	2,56	1,26
<b>Error</b>	1,63	0,46

Berdasarkan Gambar 19 dan Tabel 13 dapat dilihat bahwa nilai rata-rata pembacaan AFR tak terkontrol adalah 2,56 dengan *error* rata-rata sebesar 1,63. Nilai rata-rata pembacaan AFR terkontrol adalah 1,26 dengan *error* rata-rata 0,46. Hal ini membuktikan bahwa sistem kontrol telah meminimalisir penggunaan bahan bakar.

## 4. Kesimpulan

Dari percobaan, didapatkan bahwa nilai AFR tanpa kontroler pada pengujian stasioner dengan *set point* 0,65 maupun 1,00 cenderung konstan berada pada rentangan kaya dan tidak bisa mencapai *set point*. Pengujian stasioner dengan kontroler membuktikan bahwa kontroler mampu mempertahankan nilai AFR pada rentangan miskin baik pada *set point* 0,65 maupun 1,00. Pengujian penghematan pada rute jalan mendatar didapatkan penghematan sebesar 33%, sedangkan pada rute jalan menanjak dan menurun didapatkan penghematan sebesar 31,94%. Rata-rata

penghematan secara keseluruhan adalah 32,47%. Untuk pengembangan pada penelitian berikutnya, penggunaan sensor AFR bertipe wide band dengan penggunaan metode kontrol gabungan *hybrid Fuzzy-PID*, kontrol adaptif, maupun kontrol *robust* akan meningkatkan kestabilan dan keandalan sistem. Penggunaan sensor aliran (*flow sensor*) dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi pengukuran konsumsi bahan bakar.

## Referensi

- [1]. M. D. Nuralamsyah, A. Triwiyatno, and B. Setiyono, "Desain Sistem Kontrol Rasio Perbandinganudara 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]. A. Vandy, R. Muhammad, A. Triwiyatno, and B. Setiyono, "DESAIN KONTROL AIR FUEL RATIO ( AFR ) PADA MODEL SPARK IGNITION ENGINE DENGAN METODE HYBRID *FUZZY* PI." *TRANSIENT*, VOL.2, NO. 2, JUNI 2013, ISSN: 2302-9927, 217.
- [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.