

PERANCANGAN KONTROLER *NEURO-ROBUST FUZZY* (NEU-ROF) UNTUK PENGATURAN *AIR TO FUEL RATIO* (AFR) PADA MODEL MOBIL BERMESIN INJEKSI BENSIN BERDASARKAN PROFIL KARAKTERISTIK MENGENAI PENGENDARA

Aziz Nur Arifyanto^{*)}, Aris Triwiyatno, and Budi Setiyono

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

^{*)}E-mail: aziznur95@gmail.com

Abstrak

Perkembangan strategi kontrol di bidang otomotif dalam dua dekade terakhir difokuskan pada desain mesin dan strategi kontrol untuk menunjang kebijakan hemat energi dan ramah lingkungan. Pengontrolan *air to fuel ratio* (AFR) mesin agar mencapai nilai optimal merupakan salah satu cara yang tepat untuk menunjang kebijakan tersebut. Secara umum nilai AFR diatur pada angka 14,67. Karakteristik mengemudi pengemudi, yang pada penelitian ini dibagi menjadi 3, yaitu akselerasi, pengereman dan karakter *steering* yang berbeda pada setiap pengemudi memiliki nilai optimal AFR yang berbeda juga. Dalam penelitian ini, penulis mendesain kontroler yang merupakan pengembangan dari *robust fuzzy*, yakni *neuro robust fuzzy* (Neu-ROF). Kontroler *robust fuzzy* terbukti mampu mengatasi permasalahan pada torsi mesin. Sebagai salah satu teknik *clustering*, *neural network* ditambahkan dalam teori *robust fuzzy* untuk mengatur nilai referensi AFR. Penelitian *clustering* AFR referensi berdasarkan karakter mengemudi pengemudi yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan hasil nilai AFR sebesar 12,6 untuk mode *sporty*, dan 15,4 untuk mode *economic*. Hasil penelitian didapatkan nilai rata-rata *integral area error* kontroler *robust fuzzy* sebesar 4,47. Model kendaraan dengan Neu-ROF dapat berakselerasi 0,2 – 0,25 m/s² lebih cepat pada saat mode AFR *sporty*, pada saat mode AFR *economic* model kendaraan dapat menghemat bensin sebesar 4 – 5%.

Kata kunci : AFR, *neuro robust fuzzy*, Neu-ROF, karakteristik mengemudi, mesin injeksi bensin, konsumsi bahan bakar

Abstract

Development of control strategy in automotive industries in the last 2 decades, were focused on engine design and control strategy to create low fuel consumption and low emission vehicle. Controlling *air to fuel ratio* (AFR) by achieving optimal value is one way to solve the problems. Generally, AFR is set on 14,67. Driver's driving characteristic in this research are consist of acceleration, braking, and steering that varies between drivers, would also needs different optimal AFR value. This research provide a developed design of robust fuzzy logic controller named *neuro robust fuzzy* (Neu-ROF). Robust fuzzy controller has proven be able to solve the problem on engine torque. As a clustering technique, neural network has been added into robust fuzzy theory to define the AFR reference setpoint. The result obtained from previous research of AFR clustering based on driving characteristic is 12,6 AFR value for *sporty* mode, and 15,4 AFR value for the *economic* mode. The result of this research is that robust fuzzy controller is able to track setpoint, and the average value of *integral area error* is 4,47. Vehicle model with Neu-ROF controller can accelerate 0,2 – 0,25 m/s² faster on the *sporty* AFR mode, and consuming 4 – 5 % less fuel while on *economic* AFR mode.

Keywords : AFR, *neuro robust fuzzy*, driving characteristic, fuel injected engine, fuel consumption

1. Pendahuluan

Perkembangan strategi kontrol di bidang mesin injeksi bensin dalam dua dekade terakhir difokuskan pada desain mesin dan strategi kontrol untuk menunjang kebijakan hemat energi (*low fuel consumption*) dan ramah

lingkungan (*low emission*) [1]. Umumnya teknologi kontrol elektronik (*Electronic Control Unit* – ECU) pada sistem mesin injeksi bensin yang digunakan untuk memenuhi hemat energi (*low fuel consumption*) dan ramah lingkungan (*low emission*) dapat dilakukan dengan cara memperbaiki proses pembakaran, yaitu mengatur *Air*

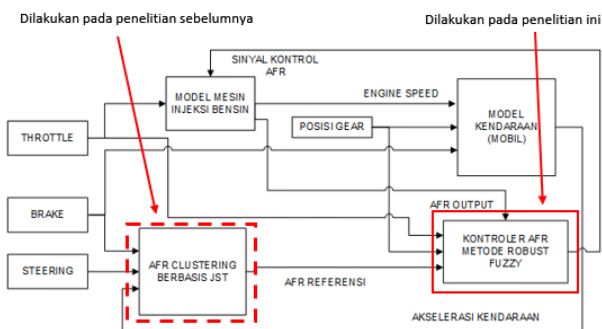
to Fuel Ratio – AFR (rasio campuran antara udara dengan bahan bakar) sehingga mendekati proses pembakaran yang ideal atau sesuai dengan kebutuhan pengendara [2]. Secara umum nilai AFR dijaga tetap berada pada nilai ideal atau stoikiometri sebesar 14,67 [3]. Variasi nilai AFR dibawah 1% dari 14,67 disebut dengan campuran kaya (*Rich Fuel*), sedangkan peningkatan 1% diatas 14,67 disebut dengan campuran miskin (*Lean Fuel*) [4].

Pengguna jalan raya khususnya mobil, mempunyai karakteristik mengemudi yang berbeda-beda. Karakteristik mengemudi dalam berkendara memengaruhi kinerja mesin dimana dibutuhkan strategi kontrol yang tepat menyesuaikan karakter pengendara dalam mengemudi agar sistem dapat bekerja dengan lebih efisien. Mesin pembakaran internal model injeksi bensin adalah mesin yang umum digunakan dalam kendaraan bermotor saat ini. Mesin tersebut bekerja dengan titik operasi yang cukup luas dan memiliki perbedaan yang signifikan pada setiap titik operasi. Mesin tersebut membutuhkan strategi kontrol yang mampu mengatasi faktor ketidakpastian yang cukup tinggi.

Pada penelitian ini, peneliti akan merancang sebuah kontroler *neuro robust-fuzzy* (Neu-ROF) yang merupakan penggabungan metode *neural network* dan *robust-fuzzy*. Kontroler *robust-fuzzy* terbukti dapat memecahkan kasus dengan tipe yang sama pada *engine torque* [5]. Metode Neu-ROF pada penelitian ini menggunakan perancangan AFR *clustering* metode *neural network* yang dilakukan oleh Pratama dkk [6], kemudian dilakukan implementasi ke model sistem pengaturan bahan bakar pada model kendaraan bermesin injeksi bensin. Model sistem tersebut diberi kontroler *robust-fuzzy* agar sistem dapat mengikuti *setpoint* yang ditentukan. Dengan menggunakan kontroler *neuro robust-fuzzy*, diharapkan bahan bakar yang dipakai lebih efisien.

2. Metode

2.1. Perancangan Umum Sistem

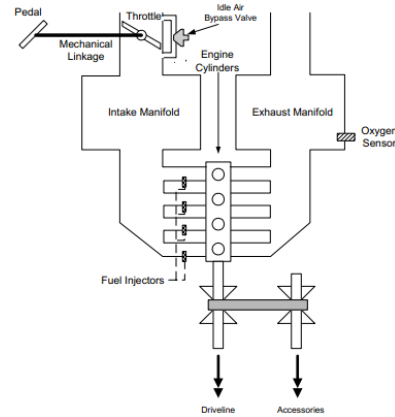


Gambar 1. Skema sistem kontroler Neu-ROF

Gambar 1 menunjukkan skema kontroler Neu-ROF yang akan dirancang untuk mengatur AFR pada model mobil bermesin injeksi bensin, berdasarkan karakteristik mengemudi pengendara. Model mesin injeksi bensin yang digunakan adalah model dari hasil penelitian Anna

Stefanopoulou [7]. *Clustering* AFR referensi berbasis jaringan saraf tiruan dilakukan pada penelitian sebelumnya oleh Pratama dkk [6]. Kontroler *robust fuzzy* akan dirancang pada penelitian ini.

2.2. Pemodelan Mobil Bermesin Injeksi Bensin



Gambar 2. Skema sistem mesin injeksi bensin [1]

Mesin injeksi bensin adalah mesin pembakaran internal yang umumnya digunakan pada mobil. Mesin tersebut membutuhkan pemicu berupa percikan bunga api untuk meledakkan campuran udara dan bahan bakar dalam ruang bakarnya. Mesin pembakaran internal secara umum memiliki 4 siklus berurutan, yaitu siklus hisap (*intake*), siklus kompresi (*compression*), siklus pembakaran (*combustion*) atau siklus usaha (*power*), dan siklus buang (*exhaust*). Gambar 2 menunjukkan skema sistem mesin pembakaran internal. Model matematika mesin pembakaran internal yang digunakan adalah dari penelitian yang dilakukan oleh Anna Stefanopoulou [7]. Dinamika udara pada *manifold* dideskripsikan melalui persamaan diferensial orde satu yang menghubungkan tingkat perubahan tekanan pada *manifold* (P_m) dengan tingkat aliran yang masuk dan keluar dari *intake manifold* (\dot{m}_θ dan \dot{m}_{cyl}) [7].

$$\frac{d}{dt}P_m = K_m(\dot{m}_\theta - \dot{m}_{cyl}), \text{ di mana } K_m = \frac{R \cdot T}{V_m} \quad (1)$$

Banyaknya aliran udara yang masuk ke *intake manifold* (\dot{m}_θ) melalui *throttle* merupakan fungsi dari sudut bukaan *throttle* (θ), tekanan hulu (P_o), yang diasumsikan sebagai tekanan atmosfer sehingga $P_o = 1$ bar, dan tekanan pada hilir, yakni tekanan pada *manifold* (P_m) [7].

$$\dot{m}_\theta = f(\theta)g(P_m) \quad (2)$$

di mana

$$f(\theta) = 2.821 - 0.05231\theta + 0.10299\theta^2 - 0.00063\theta^3 \quad (3)$$

$$g(P_m) = \begin{cases} 1, & \text{if } P_m > \frac{P_o}{2} \\ \frac{2}{P_o} \sqrt{P_m P_o - P_m^2}, & \text{if } P_m < \frac{P_o}{2} \end{cases} \quad (4)$$

Tingkat aliran udara yang dipompa pada mesin (\dot{m}_{cyl}) secara umum merupakan fungsi dari tekanan pada manifold (P_m) dan engine speed (N).

$$\dot{m}_{cyl} = -0.366 + 0.008979NP_m - 0.0337NP_m^2 + 0.0001N^2P_m \quad (5)$$

Torsi yang dihasilkan oleh mesin dinyatakan pada Persamaan (6) dengan satuan lbf-ft [7].

$$T_b = -181.3 + 379.36m_a + 21.91 AFR - 0.85 AFR^2 + 0.26\sigma - 0.0028\sigma^2 + 0.027 N - 0.000107 N^2 + 0.00048 N\sigma + 2.55\sigma m_a - 0.05\sigma^2 m_a + 2.36\sigma m_e \quad (6)$$

di mana

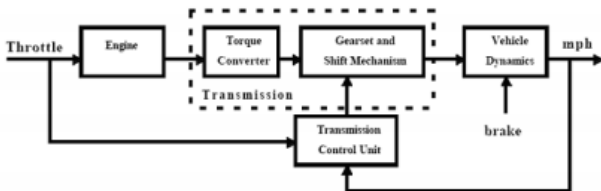
- m_a : massa dari udara yang diisikan (g/intake event)
- A/F : air-to-fuel ratio
- σ : sudut dari spark advance
- N : engine speed (rad/sec)
- m_e : sirkulasi gas buang (g / intake event)

Mesin tersebut terhubung dengan pendorong dari konversi torsi yang dikopel pada unit transmisi triptonic 4 gear. Poros engkol yang berputar tersambung dengan pendorong dari torque converter yang tersambung juga dengan perangkat transmisi.

$$I_{ei} \dot{N}_e = T_e - T_i \quad (7)$$

di mana

- N_e = kecepatan mesin (RPM)
- I_{ei} = momen inersia mesin + pendorong
- T_e = Torsi mesin
- T_i = Torsi pendorong



Gambar 3. Blok diagram mesin dengan transmisi

Karakteristik input – output dari torque converter dapat dihitung dengan rumus antara kecepatan mesin dan kecepatan turbin.

$$T_i = (N_e / K)^2$$

$$T_t = R_{TQ} T_i \quad (8)$$

di mana

- $K = f_2(N_{in} / N_e)$
= faktor-K
- N_{in} = kecepatan turbin (torque converter output)
= Kecepatan input transmisi
- T_t = Torsi turbin
- R_{TQ} = Rasio Torsi
= $f_3(N_{in} / N_e)$

Model transmisi dinyatakan sebagai rasio gear statis, dan diasumsikan menghabiskan waktu yang sangat kecil pada saat proses shifting, sehingga bisa diabaikan.

$$R_{TR} = f_4(\text{gear})$$

$$N_{in} = R_{TR} N_{out} \quad (10)$$

$$T_{out} = R_{TR} T_{in}$$

di mana

- N_{in}, N_{out} = Kecepatan transmisi masukan dan keluaran (RPM)
- T_{in}, T_{out} = Torsi transmisi masukan dan keluaran (lbf-ft)
- R_{TR} = Rasio transmisi

Dinamika kendaraan (N_w) pada model ini dipengaruhi oleh final drive, inersia kendaraan, dan beban beban dinamis [7].

$$I_v \dot{N}_w = R_{fd} T_{out} - T_{load} \quad (11)$$

$$T_{load} = \text{sgn}(v)(R_{load0} + R_{load2} v^2 + T_{brake})$$

di mana

- I_v = Momen inersia kendaraan (lb-ft²)
- R_{fd} = Final drive ratio
- T_{load} = Torsi beban (lbf-ft)
- R_{load0} = Koefisien tarik gaya gesek
- R_{load2} = Koefisien aerodinamis
- T_{brake} = Torsi pengereman (lbf-ft)

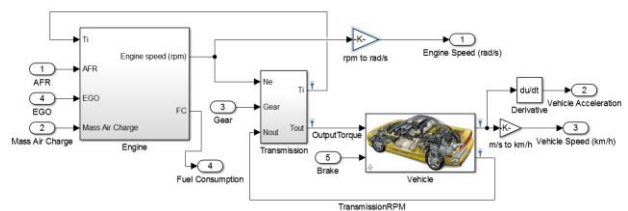
Konversi kecepatan putaran roda menjadi kecepatan kendaraan ditunjukkan pada Persamaan (13) [7].

$$v = N_w 2 \pi R_w \quad (13)$$

di mana

- v = Kecepatan kendaraan (mph)
- R_w = Jari-jari roda (ft)

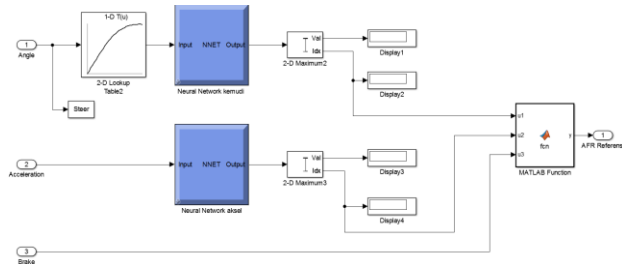
Persamaan (1) - (13) merupakan persamaan model matematika dari sistem mesin pembakaran internal. Gambar 4 menunjukkan Simulink kendaraan bermesin injeksi bensin pada Matlab 2016a.



Gambar 4. Model Simulink Mobil Bermesin Injeksi Bensin

2.3. Clustering AFR Referensi Berbasis Jaringan Saraf Tiruan

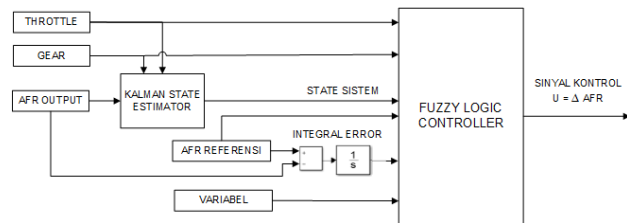
Perancangan clustering AFR referensi menggunakan rancangan pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Pratama dkk [6]. AFR clustering berbasis jaringan saraf tiruan (JST) digunakan untuk mencari nilai AFR referensi yang dibagi menjadi 3 jenis, yaitu, normal, economic, dan sporty.



Gambar 5. Diagram Simulink neural network clustering

Masukan JST adalah karakteristik mengemudi yang terdiri dari pola kemudi (dihitung dari sudut kemudi dan torsi pada kemudi), akselerasi kendaraan, dan pengereman. Keluaran sistem adalah nilai crisp 12,6 untuk mode sporty, 14,67 untuk mode normal, dan 15,4 untuk mode economic.

2.4. Metode Kontrol Robust Fuzzy



Gambar 6. Skema sistem kontroler robust fuzzy

Ide dasar dari desain kontroler robust fuzzy adalah dengan membuat soft-switching dengan fuzzy model Takagi-Sugeno, untuk solusi kontrol optimal di setiap titik operasi [5]. Untuk solusi kasus optimasi pada setiap titik operasi tersebut, bisa digunakan LQIT (Linear Quadratic Integral Tracking) ataupun metode optimasi yang lain sesuai dengan kebutuhan. Langkah dalam mendesain kontroler robust fuzzy adalah sebagai berikut:

1. Membuat model linier dengan metode piece-wise linearization dari sistem nonlinier
 Piece-wise linearization secara umum digunakan untuk membuat model linier yang merepresentasikan tiap titik operasi dari sistem. Model dibagi menjadi 16 titik operasi berdasarkan 4 posisi gear dan 4 posisi throttle.
2. Optimasi setiap persamaan model linier dari langkah 1 menggunakan skema teori kontrol optimal
 Pada penelitian ini, setiap persamaan model linier dioptimasi menggunakan skema kontrol optimal LQIT.

3. Menambahkan titik operasi sebagai pengkondisi sinyal untuk mengubah fuzzy Takagi-Sugeno sebagai soft-switching.

Sebagai soft-switching, fuzzy Takagi-Sugeno ditambah masukan tambahan berupa throttle dan gear sebagai pengkondisi sinyal. Fuzzy Takagi-Sugeno kemudian dipadukan dengan skema kontroler LQIT, yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$R^i: IF x_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } F_2^i \dots \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^i \text{ and } w_1 \text{ is } G_1^i \text{ and } w_2 \text{ is } G_2^i \dots \dots \text{ and } w_m \text{ is } G_m^i \text{ and } r_1 \text{ is } H_1^i \text{ and } r_2 \text{ is } H_2^i \dots \dots \text{ and } r_k \text{ is } H_k^i$$

$$THEN \{ u = -K_x x - K_w w + K_r r \} \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (14)$$

di mana

- R^i = Aturan dari model ke-i
- L = Jumlah titik operasi
- O_j^i = Kumpulan fuzzy dari pengkondisi sinyal
- F_j^i = Kumpulan fuzzy dari variabel state (x)
- G_j^i = Kumpulan fuzzy dari integral error antara referensi dan output (w)
- H_j^i = Kumpulan fuzzy dari referensi (r)
- q = Jumlah dari pengkondisi sinyal
- n = Jumlah dari variable state
- m = Jumlah dari variable integral error
- k = Jumlah dari variable referensi
- K_x = Gain optimal untuk umpan balik state
- K_w = Gain optimal untuk integral error
- K_r = Gain optimal untuk referensi input

4. Membangun himpunan fuzzy dari sinyal pengkondisi berdasarkan data titik operasi yang tersebar sebagai perwakilan dari sistem secara keseluruhan, dan himpunan fuzzy tunggal untuk masukan yang lain.

5. Desain aturan fuzzy

Aturan fuzzy didesain untuk membuat sistem soft-switching dalam memilih model dan kontroler yang tepat berdasarkan masukan pengkondisi sinyal. Jumlah dari aturan harus sama dengan jumlah dari model linier yang didapatkan dari piece-wise linearization dalam langkah pertama.

2.4.1. Piece-Wise Linearization

Tahap pertama dari perancangan kontroler berbasis robust-fuzzy adalah membuat model linier dengan metode piece-wise linearization dari sistem non liniernya [5]. Plant nonlinier dibagi ke dalam beberapa operating point lalu dilakukan proses linierisasi yang dilakukan dengan menggunakan bantuan identification toolbox yang

ditulis dalam *matlab editor*. Masukan sistem yang digunakan pada blok *throttle scenario* memiliki 4 variasi. Variasi *throttle* dipadukan dengan 4 variasi posisi *gear*, sehingga didapatkan 16 variasi.

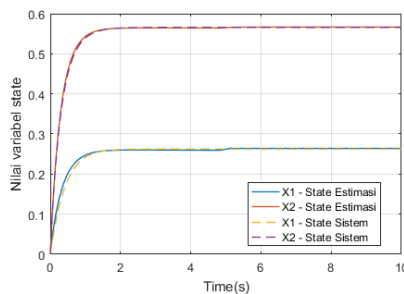
Hasil yang didapatkan dari proses identifikasi adalah bentuk model *state space* dengan orde 2. Berikut ini adalah rumus *state space* proses identifikasi:

$$\begin{aligned} x(t+Ts) &= A x(t) + B u(t) \\ y(t) &= C x(t) + D u(t) \end{aligned} \quad (15)$$

2.4.2 Kalman State Estimator

Kalman *state estimator* digunakan untuk estimasi nilai *state*. Hasil *state* estimasi ini akan digunakan untuk masukan kontrolernya. Dalam penelitian ini terdapat 2 nilai *state* estimasi yaitu X_1 dan X_2 .

Kalman *state estimator* memerlukan input (u), nilai karakteristik *noise* (Q_f dan R_f), dan *state space* sistem. Masukan filter ini yaitu *throttle* (u_1), posisi *gear* (u_2), dan AFR terukur (y). Keluaran dari *estimator* yaitu nilai *state* estimasi (\hat{x}), *output* estimasi (\hat{y}), dan *error* dari *estimator* (z). Pada desain *estimator* ini, nilai karakteristik *noise* Q_f dan R_f yang digunakan adalah 0.1. *State space* model didapatkan dari identifikasi sistem saat proses *piece wise linearization*. Dalam perancangan Kalman *state estimator*, digunakan blok Kalman *filter* pada *Simulink*.



Gambar 7. Validasi Kalman *state estimator* pada posisi *throttle* 22.5° dan posisi *gear* 2

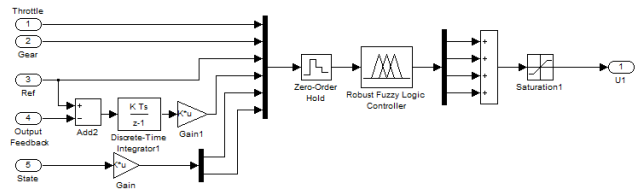
2.4.3. Optimasi seluruh titik operasi dengan LQIT

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai proses optimasi seluruh titik operasi menggunakan skema kontroler LQIT, sebagaimana yang telah diteliti oleh Triwiyatno dkk [5] dan telah berhasil menyelesaikan studi kasus tersebut. Tujuan dari optimasi menggunakan LQIT ini yaitu untuk mengontrol sistem agar mampu mengikuti set point yang telah ditentukan (*tracking*) dengan memperhatikan batasan sinyal kontrol yang sesuai dengan batasan asli masukan sistem, dalam hal ini adalah *throttle angle* (0-90°) dan *gear* (1-4).

Skema LQIT memiliki 3 jenis parameter kontrol, yaitu K_r , K_w dan K_x . Mengingat model sistem linier yang dioptimasi adalah orde 2, maka parameter K_x ada 2 variabel, yang selanjutnya diberi nama K_{x1} dan K_{x2} . Dengan demikian, ada 4 variabel yang akan dicari nilainya. Desain LQIT dilakukan dengan bantuan *matlab editor*. Nilai K_r , K_w dan K_{x1} , dan K_{x2} dicari pada setiap 16 kondisi *plant* yang berbeda beda. Nilai hasil dari *matlab editor* tersebut dimodifikasi dengan memperhatikan hasil keluaran sistem. Modifikasi dilakukan dengan metode *trial & error*.

2.4.4. Perancangan Simulasi Fuzzy

Fuzzy model yang digunakan adalah *fuzzy* dengan tipe Takagi-Sugeno, yang diaplikasikan menggunakan fungsi *fuzzy toolbox* dan *simulink* pada *Matlab*.



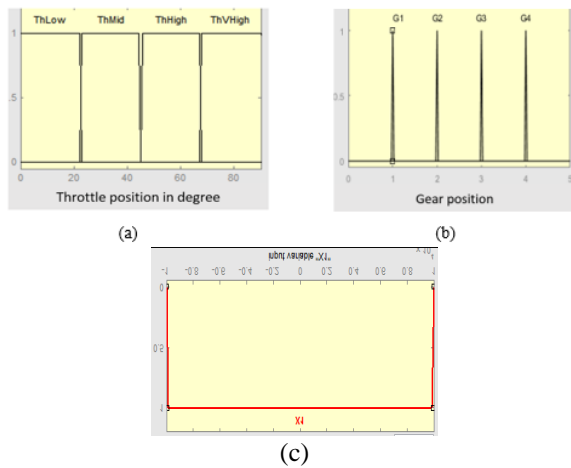
Gambar 8. Blok *simulink* logika *fuzzy*

$$u = [0 \quad 0 \quad -K_x \quad K_r \quad -K_w \quad 0] \begin{bmatrix} \text{Throttle} \\ \text{Gear} \\ x \\ r \\ w \\ c \end{bmatrix} \quad (16)$$

Ket:

- u = Nilai keluaran dari kontroler
- K_x = Nilai penguatan dari state
- K_r = Nilai penguatan untuk referensi
- K_w = Nilai penguatan dari nilai integral error
- x = Nilai variabel *state*
- r = Nilai referensi
- w = Nilai integral *error*
- c = Konstanta

Kontroler *robust-fuzzy* memiliki 6 variabel masukan, yaitu *throttle*, *gear*, r , w , x_1 dan x_2 . Variabel masukan *throttle* memiliki 4 fungsi keanggotaan yang berbentuk trapesium. *Range* fungsi keanggotaan tersebut yaitu, $ThLow$ (0° – 22,5°), $ThMid$ (22,5° – 45°), $ThHigh$ (45° – 67,5°), dan $ThVHigh$ (67,5° – 90°). Variabel masukan *gear* mewakili kondisi posisi *gear* dengan 4 fungsi keanggotaan. Adapun untuk variabel lain hanya memiliki fungsi keanggotaan tunggal yang berbentuk trapesium.



Gambar 9. Fungsi keanggotaan masukan (a) Throttle (b) Gear (c) variabel x_1, x_2, u, e, r dan w

Logika fuzzy ini memiliki variabel keluaran (u) yang memiliki 16 fungsi keanggotaan, berdasarkan kondisi sudut bukaan throttle dan posisi gear. Setiap fungsi keanggotaan keluaran memiliki bentuk fungsi linier. Fungsi linier tersebut merepresentasikan Persamaan (21), dimana koefisiennya berasal dari nilai-nilai gain LQIT, yaitu Kr, Kw dan Kx pada proses optimasi.

$$G_x T_y = [0 \ 0 \ Kr_{(x,y)} \ Kw_{(x,y)} \ Kx1_{(x,y)} \ Kx2_{(x,y)} \ 0] \quad (17)$$

Ket :

x = posisi gear

y = posisi throttle dalam angka (ThLow = 1, ThMid = 2, ThHigh = 3, ThVHigh = 4)

Tabel 1. Fungsi keanggotaan keluaran fuzzy.

Fungsi	Throttle	Gear	Gain			
			Kr	Kw	Kx1	Kx2
G1T1	ThLow	1	0,021	16,952	-7,682	-3,161
G1T2	ThMid	1	0,029	17,030	-7,682	-3,109
G1T3	ThHigh	1	0,032	17,816	-7,952	-3,232
G1T4	ThVHigh	1	0,033	17,272	-8,124	-3,448
G2T1	ThLow	2	0,027	32,972	-7,713	-3,153
G2T2	ThMid	2	0,039	34,014	-8,769	-3,114
G2T3	ThHigh	2	0,038	33,117	-8,697	-3,092
G2T4	ThVHigh	2	0,032	32,881	-8,254	-3,378
G3T1	ThLow	3	0,058	26,952	-6,682	-4,161
G3T2	ThMid	3	0,052	25,030	-6,769	-4,109
G3T3	ThHigh	3	0,051	26,816	-7,154	-4,932
G3T4	ThVHigh	3	0,053	27,272	-7,424	-5,248
G4T1	ThLow	4	0,026	42,942	-7,708	-3,327
G4T2	ThMid	4	0,039	44,013	-8,727	-3,103
G4T3	ThHigh	4	0,038	43,128	-8,671	-3,061
G4T4	ThVHigh	4	0,033	42,781	-8,218	-3,326

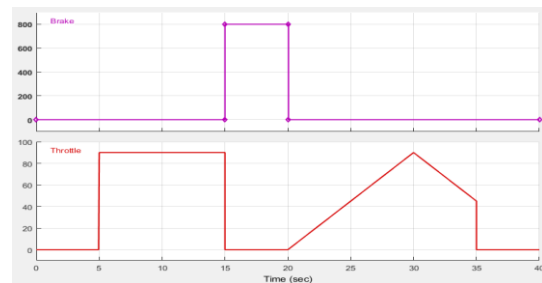
Setelah perancangan fungsi keanggotaan dan penentuan aturan fuzzy, dilakukan proses defuzzifikasi dengan metode weighted average.

3. Hasil dan Analisa

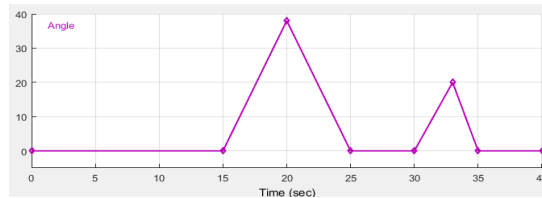
Pengujian dilakukan dengan menganalisa variabel yang dianalisis yaitu perbandingan AFR, kecepatan mesin, akselerasi kendaraan, dan konsumsi bahan bakar antara AFR model tanpa kontroler dan model dengan kontroler Neu-ROF.

3.1. Parameter pengujian

Pengujian kontroler Neu-ROF memiliki 4 masukan, yaitu sudut throttle, gear, brake torque, dan handwheel angle. Pengujian kontroler Neu-ROF dibagi menjadi 4 berdasarkan posisi gear. Pengujian dilakukan berdasarkan 4 variasi gear

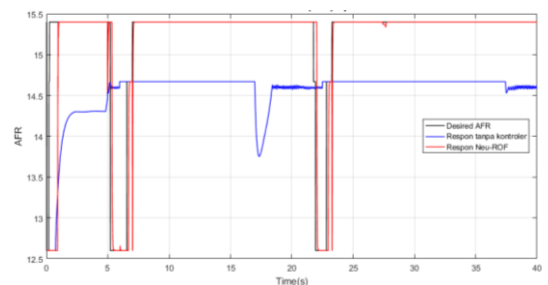


Gambar 10. Sinyal masukan throttle dan brake



Gambar 11. Sinyal masukan handwheel angle

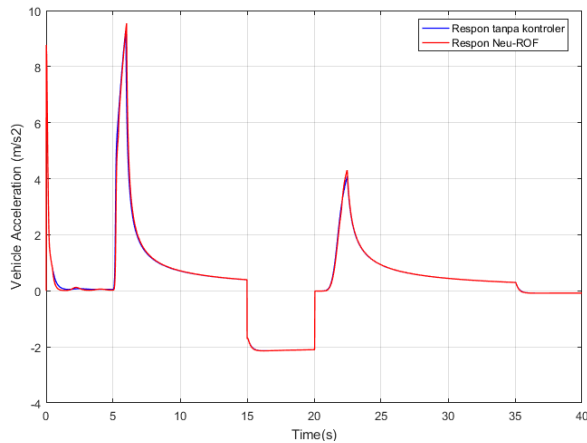
3.2. Pengujian pada Posisi Gear 1



Gambar 12. Grafik AFR pada gear 1

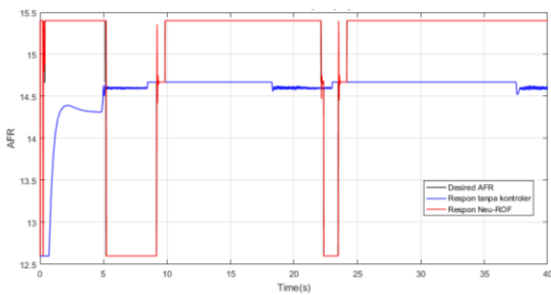
AFR referensi bernilai 15,4, menandakan pola mengemudi mode economic pada waktu 0 – 5 detik, 7 – 22 detik, 23 – 40 detik. Hal ini sesuai dengan perancangan karena pada waktu tersebut, akselerasi bernilai kurang dari 1,75 m/s² yang kemudian memicu mode economic, dan rem diaktifkan pada rentang waktu 15 – 20 detik.

Mode *sporty* yang aktif pada detik 5 menghasilkan akselerasi hingga 9.54 m/s^2 , lebih tinggi daripada tanpa kontroler yang hanya mencapai 9.31 m/s^2 . Sinyal masukan *throttle* perlahan naik kembali dari $0^\circ - 90^\circ$ pada rentang waktu 20 – 30 detik, yang menyebabkan akselerasi kendaraan meningkat hingga menghasilkan akselerasi maksimum 4.2 m/s^2 , lebih tinggi daripada tanpa kontroler yang hanya mencapai 4 m/s^2 .

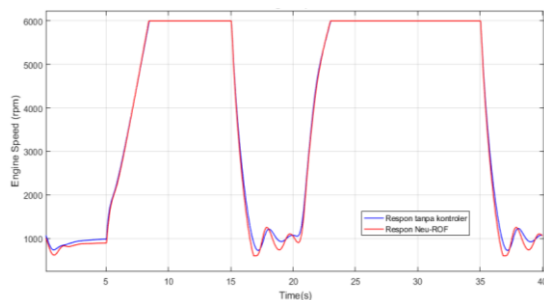


Gambar 13. Grafik akselerasi pada gear 1

3.3. Pengujian pada Posisi Gear 2



Gambar 14. Grafik AFR pada posisi gear 2

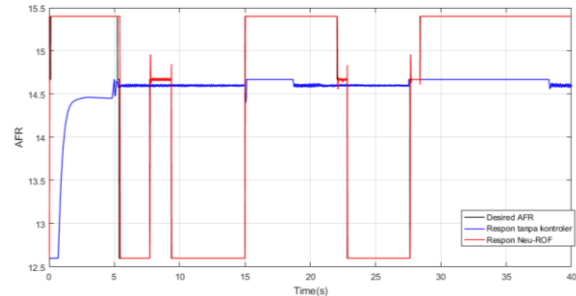


Gambar 15. Grafik kecepatan mesin pada gear 2

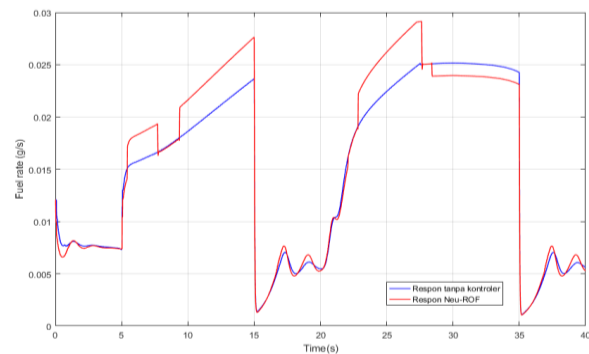
Model Neu-ROF dapat mencapai kecepatan mesin yang lebih rendah yaitu 600 rpm pada saat mode *economic*. Model tanpa kontroler hanya dapat mencapai kecepatan minimum sebesar 760 rpm. *Overrun* terjadi pada saat kecepatan mesin stagnan di 6000 rpm. AFR berada pada

mode *economic* saat kondisi tersebut. Hal ini adalah keuntungan tersendiri untuk menjaga keawetan mesin.

3.4. Pengujian Pada Posisi Gear 3



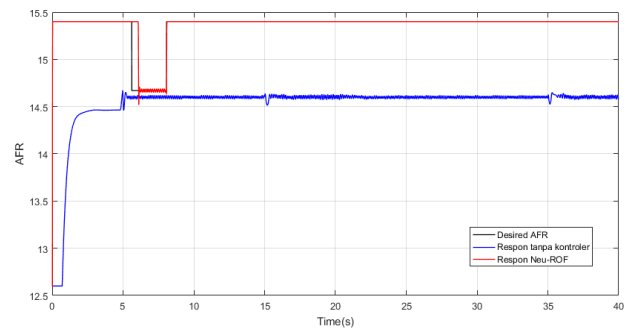
Gambar 16. Grafik AFR pada gear 3



Gambar 17. Grafik konsumsi bensin pada gear 3.

Konsumsi bahan bakar menjadi lebih banyak saat mode *sporty* aktif. Perbedaan mencapai nilai 0.003 gram/sekon, atau sekitar 15% lebih banyak daripada model tanpa kontroler. Konsumsi bensin model Neu-ROF pada saat mode normal adalah sama dengan model tanpa kontroler. Mode *economic* menghasilkan volume bensin 5% lebih hemat pada model dengan kontroler Neu-ROF.

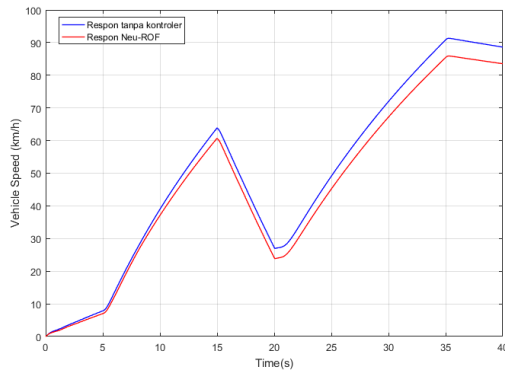
3.5. Pengujian Pada Posisi Gear 4



Gambar 18. Grafik AFR pada gear 4

Model tanpa kontroler dapat melaju lebih cepat daripada model dengan kontroler Neu-ROF pada variasi ini. Model tanpa kontroler dapat mencapai kecepatan 91 km/h, sedangkan model dengan kontroler Neu-ROF hanya dapat mencapai kecepatan

maksimum sebesar 86 km/h. Hal tersebut terjadi karena kecepatan mesin maksimum dari model Neu-ROF lebih kecil daripada model tanpa kontroler.



Gambar 19. Grafik kecepatan kendaraan pada gear 4.

Tabel 2 Nilai IAE dan jumlah konsumsi bahan bakar.

Gear	Integral Area Error		Fuel Consumption (g/40s)	
	Tanpa Kontroler	Robust Fuzzy	Tanpa Kontroler	Neu-ROF
1	21,12	7,05	65,0756	63,6725
2	23,51	2,80	64,3218	64,1439
3	26,50	4,57	60,1877	63,6523
4	17,9	3,45	48,7812	46,5308
Rata rata	22,26	4,47	59,5915	59,4998

Model Neu-ROF mengonsumsi total bensin lebih hemat pada posisi gear 1, 2, dan 4. Hal tersebut terjadi karena pada posisi variasi tersebut, mode *economic* lebih sering aktif daripada mode normal dan *sporty*. Model Neu-ROF mengonsumsi total bensin lebih boros pada posisi gear 3. Hal ini terjadi karena pada posisi variasi ini, mode *sporty* lebih sering aktif daripada posisi gear 1, 2, dan 4.

4. Kesimpulan

Dari penelitian dapat disimpulkan bahwa penggunaan kontroler Neu-ROF mampu beroperasi dengan baik pada titik operasi yang luas dan mampu memberikan peran yang penting dalam memperbaiki kinerja mesin dan konsumsi bahan bakar. Mesin telah mampu mencapai nilai AFR optimal yang berpengaruh pada pembakaran sempurna pada mesin. AFR mode *economic* dapat menghemat bensin 4 – 5%. Model kendaraan dapat berakselerasi 0,2 – 0,25 m/s² lebih cepat pada saat mode *sporty* namun bensin yang dikonsumsi lebih boros sekitar 15%. Sebagai saran untuk pengembangan selanjutnya, penelitian dapat disertakan juga dengan pengontrolan subsistem lain dalam kontrol otomotif, seperti kecepatan putar mesin, *ignition time* atau (*Exhaust Gas Recirculation*) EGR.

Referensi

- [1]. L. Nielsen and U. Kiencke, *Automotive Control Systems For Engine, Driveline, and Vehicle*, 2nd ed. Berlin: Springer, 2005.
- [2]. Buntarto, *Dasar-Dasar Sistem Kontrol Pada Kendaraan*. Yogyakarta: Pustaka Baru, 2015.
- [3]. R. Stone and J. Ball, *Automotive engineering fundamentals*. 2004.
- [4]. J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, *Automobile Mechanical and Electrical Systems*, vol. 1. 2015.
- [5]. A. Triwiyatno, M. Nuh, A. Santoso, and I. N. Sutantra, "Engine Torque Control of Spark Ignition Engine Using Robust-fuzzy Logic Control," *IACSIT Int. J. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 352–358, 2011.
- [6]. S. Pratama, B. Setiyono, and A. Triwiyatno, "Perancangan Air to Fuel Ratio (AFR) Clustering Berbasis Jaringan Saraf Tiruan pada Model Mobil Bermesin Injeksi Bensin Berdasarkan Profil Karakteristik Mengemudi Pengendara," *Transient*, 2017.
- [7]. Stefanopoulou, A. (1996), *Modeling and Control of Advanced Technology Engine*, **Ph.D. Thesis**, Electrical Engineering: Systems, The University of Michigan.