

DESAIN ALGORITMA GENETIKA – KONTROL LOGIKA FUZZY ROBUST STUDI KASUS : KONTROL TORSI MESIN PADA MESIN PEMBAKARAN INTERNAL

Esa Apriaskar^{*)}, Aris Triwiyatno, and Budi Setiyono

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

^{*)}Email: esaindo@gmail.com

Abstrak

Semakin menipisnya produksi bahan bakar minyak (BBM) dan meningkatnya pengguna kendaraan bermotor di Indonesia mengakibatkan perlunya suatu perkembangan teknologi di bidang kontrol otomotif. Pengontrolan torsi mesin agar mencapai nilai optimal merupakan salah satu cara yang tepat untuk mengatasi permasalahan tersebut. Sebagai mesin yang sering digunakan dalam aplikasi otomotif, mesin pembakaran internal memiliki kondisi operasi yang cukup luas. Dengan demikian, kontroler tunggal akan susah untuk mencapai performansi yang diinginkan untuk semua kondisi. Kontroler *robust fuzzy* telah terbukti mampu mengatasi permasalahan yang sama. Dalam penelitian ini, penulis mendesain sebuah kontroler yang merupakan pengembangan dari *robust fuzzy*, yakni algoritma genetika – kontrol logika fuzzy robust (GA-RFLC). Sebagai salah satu teknik optimasi global, algoritma genetika ditambahkan dalam teori *robust fuzzy* yang sebelumnya memanfaatkan teknik optimasi lokal dengan *linear quadratic integral tracking* (LQIT) karena teknik optimasi global telah terbukti lebih baik daripada teknik optimasi lokal. Selanjutnya, pengujian akan dilakukan dengan membandingkan nilai *integral area error* (IAE) dari hasil respon sistem menggunakan kontroler GA-RFLC dan LQIT.

Kata kunci : torsi mesin, algoritma genetika – kontrol logika fuzzy robust, integral area error, mesin pembakaran internal

Abstract

Decreasing production of fuel and increasing the user of vehicle at Indonesia have effected in the need of automotive technology development. Controlling engine torque by achieving optimal value is one way to solve the problems. As an engine which is often used in automotive application, spark ignition engine has wide operating point. A single controller will be hard to achieve the requirements for the whole condition. Robust fuzzy logic controller has proven be able to solve the same problem. This research provide a development design of robust fuzzy logic controller named genetic algorithm – robust fuzzy logic control (GA-RFLC). As a global optimization technique, genetic algorithm has been added into robust fuzzy logic theory which used a local optimization with linear quadratic integral tracking (LQIT) since global optimization technique had been proven to be better than local optimization technique. Then, the value of integral area error (IAE) from system respon using GA-RFLC and will be compared to LQIT.

Keywords : engine torque, genetic algorithm – robust fuzzy logic control, integral area error, spark ignition engine

1. Pendahuluan

Dewasa ini, seiring dengan meningkatnya kebutuhan manusia dengan alat transportasi, penggunaan kendaraan bermotor di Indonesia cukup berkembang pesat^[1]. Di samping itu, produksi bahan bakar minyak di Indonesia semakin menipis, ditunjukkan dengan data Kementerian ESDM pada tahun 2011^[2]. Hal inilah yang membuat pemerintah harus berusaha untuk melakukan beberapa kebijakan dalam penghematan penggunaan bahan bakar.

Untuk mendukung hal tersebut, maka diperlukan perkembangan teknologi di bidang kontrol otomotif yang bermanfaat dalam efektifitas penggunaan bahan bakar.

Sebuah teknik pengontrolan yang tepat dibutuhkan untuk dapat menunjang kebijakan penghematan penggunaan BBM pada kendaraan bermotor. Pengontrolan torsi mesin untuk mencapai nilai optimal merupakan salah satu strategi yang tepat. Hal ini terjadi karena torsi mesin yang optimal dapat diraih hanya dengan melakukan pembakaran bahan bakar secara sempurna di dalam

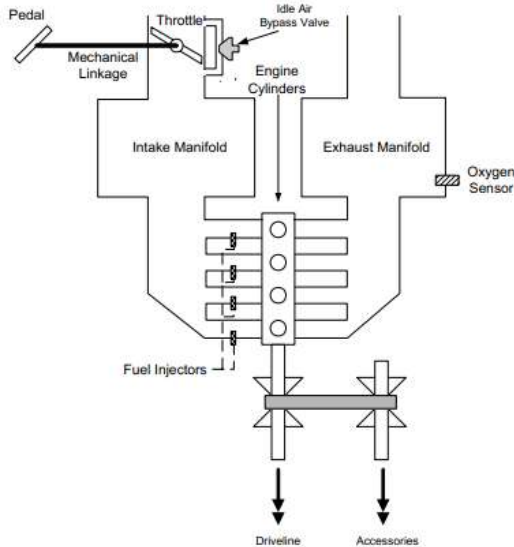
silinder pembakaran, yang mengindikasikan penggunaan bahan bakar yang efektif dan efisien. Dengan demikian, secara tidak langsung akan meningkatkan performa mesin, menghemat penggunaan bahan bakar dan mengurangi emisi gas buang^[3].

Pada penelitian ini, dilakukan studi kasus untuk pengontrolan torsi mesin pada mesin pembakaran internal dengan menggunakan metode algoritma genetika – kontrol logika fuzzy robust. Metode ini merupakan modifikasi pengembangan dari metode kontrol *robust fuzzy* yang sebelumnya telah terbukti mampu menyelesaikan kasus yang sama. Akan tetapi, pada *robust fuzzy* yang sebelumnya menggunakan teknik optimasi lokal dengan kontrol optimal LQIT untuk langkah optimasi. Penambahan algoritma genetika yang merupakan salah satu teknik optimasi global pada teori *robust fuzzy* dilakukan karena penelitian yang dilakukan oleh Hong Biao dan Nan Yu^[19] telah menunjukkan bahwa teknik optimasi global adalah lebih baik dari pada teknik optimasi lokal. Dengan menggunakan algoritma genetika – kontrol logika fuzzy robust diharapkan dapat tercapai optimasi penggunaan torsi mesin pada semua kondisi operasi mesin yang mungkin.

2 Metode

2.1 Pemodelan Mesin Pembakaran Internal

Mesin pembakaran internal merupakan salah satu jenis mesin bakar yang 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 1 menunjukkan skema sistem mesin pembakaran internal.



Gambar 1 Skema sistem mesin pembakaran internal^[7]

Model matematika mesin pembakaran internal yang digunakan adalah dari penelitian yang dilakukan oleh Anna Stefanopoulou^[6].

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

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})^[6].

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

di mana

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

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

Banyaknya tingkat aliran udara yang masuk ke *intake manifold* (\dot{m}_θ) melalui *first 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)^[6].

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

$$\dot{m}_{cyl} = \theta_c \dot{m}_f \quad (6)$$

Tingkat aliran udara yang dipompa pada mesin secara umum merupakan fungsi dari tekanan pada *manifold* (P_m) dan *engine speed* (N)^[6].

Torsi yang dihasilkan oleh mesin bergantung pada pengapian silinder, formasi pencampuran antara udara dan bahan bakar, dan parameter – parameter fisik mesin yang spesifik^[6].

$$T_b = -181.3 + 379.36m_a + 21.91 AFR - 0.85 AFR^2 + 0.26\sigma - 0.0028\sigma^2 + 0.027 N - 0.000107 N^2 + 0.00048 N\sigma + 2.55\sigma m_a - 0.05\sigma^2 m_a + 2.36\sigma m_e \quad (7)$$

di mana

m_a : massa dari udara yang diisikan (*g/intake event*)

AFR : *air-to-fuel ratio*

σ : sudut dari *spark advance*

N : *engine speed* (rad/sec)

m_e : sirkulasi gas buang (*g / intake event*)

Gerakan rotasi dari *crankshaft* mesin didapatkan dari hubungan antara mesin dengan momen inersia dari kendaraan (J), percepatan angular ($\dot{\omega}$ dalam rad/sec²) dan perbedaan antara torsi yang dihasilkan oleh mesin (T_b

dalam Nm) dan torsi beban pada *crankshaft* (T_l dalam Nm) ^[6].

$$\sum T = T_b - T_l = J\dot{\omega} \quad (8)$$

Torsi beban pada *crankshaft* bisa direpresentasikan sebagai sebuah fungsi dari pengereman dalam kaitan dengan pergeseran mesin (c_{df}), pengereman aerodinamis (c_{dv}) dan rasio *gear* yang dipilih (g_r) ^[6].

$$T_l = (c_{df} + c_{dv}g_r)\omega^2 \quad (9)$$

Total inersia adalah kombinasi dari inersia mesin (J_e) dan inersia kendaraan dan diberikan dalam persamaan

$$J = J_c + m_v(r_\omega g_r)^2 \quad (10)$$

2.2 Fuzzy Model Takagi - Sugeno

Sebuah model dinamik *fuzzy* Takagi-Sugeno dijelaskan dengan sebuah kumpulan aturan *fuzzy* "IF ... THEN" dan sistem dinamik linier kawasan waktu ^[10]. Sebuah aturan sistem Takagi-Sugeno dapat ditulis sebagai berikut ^[11]:

Aturan Plant ke - i:

$$\text{IF } x_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots x_n(t) \text{ is } M_{in} \text{ THEN } \dot{x} = A_i x + B_i u \quad (11)$$

Di mana $x \in R^{nx1}$ adalah vektor *state*, r adalah jumlah *rule*, M_y adalah kumpulan *fuzzy*, $u \in R^{mx1}$ u adalah masukan dan $A \in R^{nxn}$ adalah matriks *state*, $B \in R^{nxm}$ adalah matriks masukan.

Dengan menggunakan *singleton fuzzifier*, *max product inference* dan *center average defuzzifier*, penjumlahan model *fuzzy* dapat ditulis ^[12]

$$\dot{x} = \frac{\sum_{i=1}^r \omega_i(x)(A_i x + B_i u)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x)} \quad (12)$$

dengan ω_i adalah

$$\omega_i(x) = \prod_{j=1}^n \mu_{ij}(x_j) \quad (13)$$

Di mana μ_{ij} adalah *membership function* dari j^{th} kumpulan *fuzzy* dalam aturan ke-i. Koefisien a_i adalah

$$a_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^r \omega_i} \quad (14)$$

Kemudian persamaan (12) diubah menjadi ^[13]

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r a_i(x)(A_i x + B_i u) \quad i = 1, 2, 3, \dots, r \quad (15)$$

Di mana $a_i > 0$ dan $\sum_{i=1}^r a_i = 1$.

Dengan menggunakan metode yang sama untuk membuat rule fuzzy Takagi-Sugeno sebagai kontroler, aturan kontroler dapat ditulis sebagai berikut ^[11]

Aturan Plant ke - i:

$$\begin{aligned} \text{IF } x_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots x_n(t) \text{ is } M_{in} \\ \text{THEN } u = -K_i x \end{aligned} \quad (16) \quad (3.8)$$

Persamaan kontroler menjadi sebagai berikut ^[12]

$$u = -\sum_{i=1}^r a_i(x)K_i x \quad (17)$$

2.4 Metode Kontrol Robust Fuzzy

Ide dasar dari desain kontrol *robust fuzzy* adalah dengan membuat *soft-switching* dengan *fuzzy* model Takagi-Sugeno, sebagaimana dalam persamaan (16) untuk solusi kontrol optimal di setiap titik operasi ^[14]. 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 ^[14]:

1. Membuat model linier dengan metode *piece-wise linearization* dari sistem nonlinier ^[14]

Piece-wise linearization secara umum digunakan untuk membuat model linier yang merepresentasikan tiap titik operasi dari sistem.

2. Optimasi setiap persamaan model linier dari langkah 1 menggunakan skema teori kontrol optimal ^[14]

Pada penelitian ini, setiap persamaan model linier dioptimasi menggunakan algoritma genetika yang dipadukan dengan skema kontrol optimal LQIT ^[14]. Kemudian aksi kontrol Takagi-Sugeno seperti pada persamaan (16) diubah menjadi

$$\begin{aligned} R^i: \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } F_2^i \dots \dots \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^i \\ \text{and } w_1 \text{ is } G_1^i \text{ and } w_2 \text{ is } G_2^i \dots \dots \dots \text{ and } w_m \text{ is } G_m^i \\ \text{and } r_1 \text{ is } H_1^i \text{ and } r_2 \text{ is } H_2^i \dots \dots \dots \text{ and } r_k \text{ is } H_k^i \\ \text{THEN } \begin{cases} \dot{x} = A_i x + B_i u \\ u = -K_x x - K_w w + K_r r \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, L \end{aligned} \quad (18)$$

di mana,

- R^i = Aturan dari model ke-i
- L = Jumlah titik operasi
- F_j^i = Kumpulan *fuzzy* dari variabel *state* (x)
- G_j^i = Kumpulan *fuzzy* dari integral dari *error* antara referensi dan output (w)
- H_j^i = Kumpulan *fuzzy* dari referensi (r)
- 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

- Menambahkan titik operasi sebagai pengkondisi sinyal untuk mengubah *fuzzy* Takagi-Sugeno sebagai *soft-switching*^[14]

Sebagai *soft-switching*, *fuzzy* Takagi-Sugeno yang diubah dengan perhitungan algoritma genetika seperti dijelaskan pada persamaan (18) ditambah masukan tambahan sebagai pengkondisi sinyal. Dengan penambahan beberapa masukan, *fuzzy* Takagi-Sugeno dalam persamaan (18) dapat diubah menjadi

$$R^l: \text{IF } c_1 \text{ is } O_1^i \text{ and } c_2 \text{ is } O_2^i \dots \dots \text{and } c_q \text{ is } O_q^i \text{ and } x_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } F_2^i \dots \dots \text{and } x_n \text{ is } F_n^i \text{ and } w_1 \text{ is } G_1^i \text{ and } w_2 \text{ is } G_2^i \dots \dots \text{and } w_m \text{ is } G_m^i \text{ and } r_1 \text{ is } H_1^i \text{ and } r_2 \text{ is } H_2^i \dots \dots \text{and } r_k \text{ is } H_k^i$$

$$\text{THEN } \begin{cases} \dot{x} = A_i x + B_i u \\ u = K_c c - K_x x - K_w w + K_r r \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (19)$$

di mana

O_j^i = Kumpulan *fuzzy* dari pengkondisi sinyal

q = Jumlah dari pengkondisi sinyal

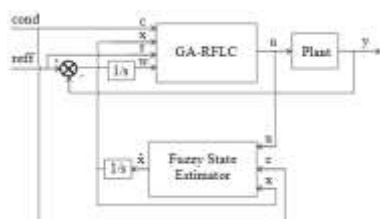
K_c = Gain untuk pengkondisi sinyal (sebagai sinyal pemicu, didefinisikan K_c adalah *zero vector*)

- 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^[14].
- Desain aturan *fuzzy*^[14]

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.

2.3 Perancangan Simulasi

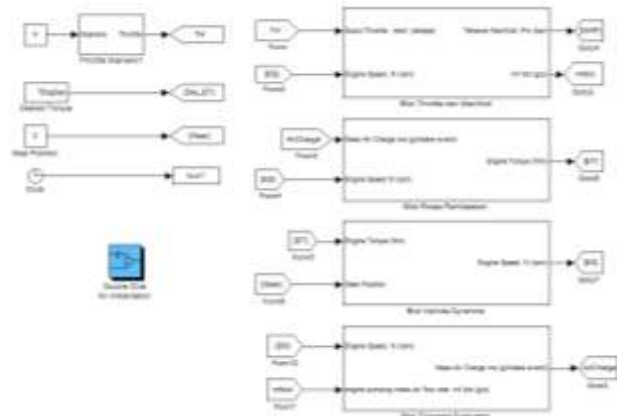
Perancangan simulasi pada penelitian ini didesain berdasarkan diagram blok pada gambar 2. Perancangan simulasi ini menggunakan program bantu yaitu *Matlab* 2008a. Pada aplikasi program *Matlab* ini digunakan beberapa sub program, yaitu *Matlab Command Window*, *Matlab Editor*, *FIS Editor*, dan *Matlab Simulink*.



Gambar 2 Diagram blok perancangan sistem kontrol

2.3.1 Perancangan Plant Mesin Pembakaran Internal

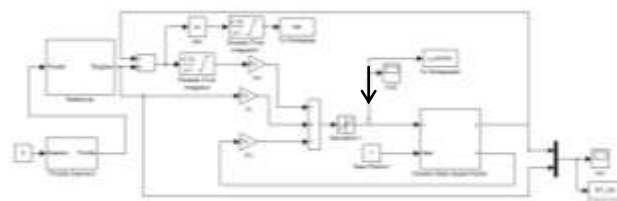
Persamaan (2.1) hingga persamaan (2.16) merupakan persamaan model matematika dari sistem mesin pembakaran internal. Gambar 3 menunjukkan aplikasi sistem mesin pembakaran internal pada *Matlab* 2008a.



Gambar 3 Sistem mesin pembakaran internal

2.3.2 Perancangan Algoritma Genetika

Algoritma genetika pada penelitian ini digunakan sebagai langkah optimasi dari teori desain *robust fuzzy*. Siklus algoritma genetika yang digunakan menyerupai siklus David Goldberg^[8]. Skema optimasi yang digunakan adalah LQIT seperti pada gambar 4.



Gambar 4 Diagram skema LQIT pada sistem

Pada skema LQIT yang ditunjukkan oleh gambar 4 terdapat 3 jenis parameter kontrol, yaitu K_r , K_w dan K_x . Parameter kontrol itulah yang nantinya akan dicari nilainya dengan menggunakan algoritma genetika. Mengingat model sistem linier yang dioptimasi adalah orde 2, maka parameter K_x ada 2 variabel. Dengan demikian, ada 4 variabel yang dicari nilainya oleh algoritma genetika. Keempat variabel tersebut nantinya akan dijadikan sebagai gen pembentuk individu dalam algoritma genetika dengan fungsi *fitness* berupa nilai IAE. Parameter algoritma genetika yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tabel 1 Parameter algoritma genetika

No	Parameter	Nilai
1	P _m	0,3
2	P _c	0,9
3	Populasi	40
4	Iterasi	30

Penentuan populasi dan iterasi dilakukan secara coba-coba dengan pertimbangan nilai IAE dan lamanya waktu *running* program algoritma genetika, sehingga didapatkan parameter yang paling efektif. Adapun untuk nilai P_m dan P_c ditentukan berdasarkan pertimbangan yang disampaikan oleh Sutojo, Mulyanto dan Suhartono^[8].

2.3.3 Perancangan Fuzzy Model Takagi - Sugeno

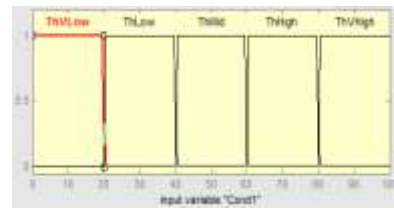
Fuzzy model Takagi-Sugeno ini digunakan untuk estimasi nilai *state* sistem yang dihasilkan jika diberi nilai masukan atau disebut juga *fuzzy state estimator*. Nilai *state* ini yang nantinya akan digunakan untuk masukan kontroler.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & A & B & K & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Cond\ 1 \\ Cond\ 2 \\ x \\ u \\ e \\ c \end{bmatrix} \quad (20)$$

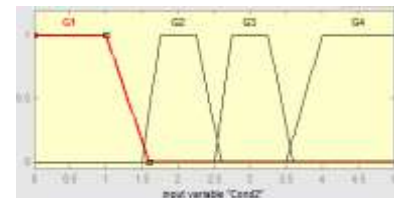
di mana :

- \dot{x} = State estimasi
- A = Matriks A
- B = Matriks B
- K = Matriks K
- Cond 1 = Sudut bukaan *throttle*
- Cond 2 = Posisi gigi
- x = Variabel *state*
- u = Masukan sistem
- e = Error model
- c = Konstanta

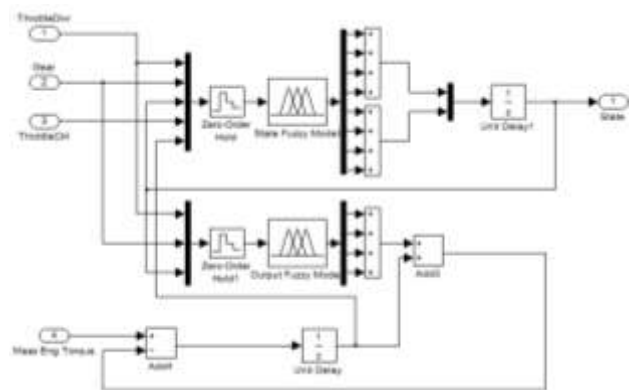
Pada *fuzzy model* ini terdapat 6 variabel masukan yaitu cond1, cond2, x₁, x₂, u dan e. Variabel masukan cond1 mewakili kondisi sudut bukaan *throttle* dengan 5 fungsi keanggotaan yang berbentuk trapesium. Nilai *range* dari setiap fungsi keanggotaan cond1 memiliki nilai yang sama yaitu 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 dan 80-100. Variabel masukan cond2 mewakili kondisi posisi gigi dengan 4 fungsi keanggotaan yang juga berbentuk trapesium. Adapun variabel lain hanya memiliki fungsi keanggotaan tunggal yang berbentuk trapesium.



Gambar 5 Fungsi keanggotaan cond1



Gambar 6 Fungsi keanggotaan cond2



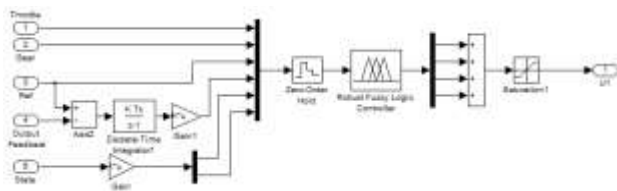
Gambar 7 Blok diagram *fuzzy state estimator*

2.3.4 Perancangan Kontrol Logika Fuzzy Robust

Kontrol logika *fuzzy robust* digunakan sebagai *soft-switching* dalam pemilihan nilai *gain* Kr, Kw dan Kx dari optimasi yang dilakukan oleh algoritma genetika. Dalam pemilihan nilai *gain* ini disesuaikan dengan kondisi operasi yang aktif.

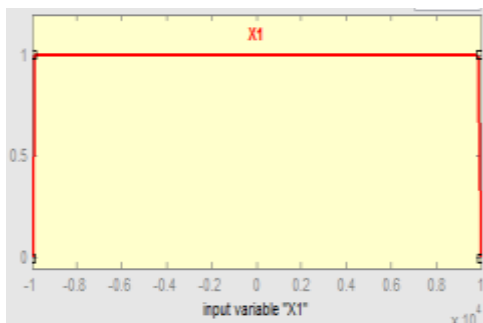
$$output = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -K_x & K_r & -K_w & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cond1 \\ cond2 \\ x \\ r \\ w \\ c \end{bmatrix} \quad (21)$$

- Ket:
- output = Nilai keluaran dari kontroler
 - Kx = Nilai penguatan dari state
 - Kr = Nilai penguatan untuk referensi
 - Kw = Nilai penguatan dari nilai integral error
 - x = Nilai variabel *state*
 - r = Nilai referensi
 - w = Nilai integral *error*
 - c = Konstanta



Gambar 8 Blok diagram kontrol logika fuzzy robust

Pada kontroler *fuzzy robust* ini terdapat 6 variabel masukan yaitu cond1, cond2, r , w , x_1 dan x_2 . Variabel masukan cond1 mewakili kondisi sudut bukaan *throttle* dengan 5 fungsi keanggotaan yang berbentuk trapesium. Nilai *range* dari setiap fungsi keanggotaan cond1 memiliki nilai yang sama yaitu 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 dan 80-100. Variabel masukan cond2 mewakili kondisi posisi gigi dengan 4 fungsi keanggotaan yang juga berbentuk trapesium. Desain ini sama dengan desain pada *fuzzy model* untuk *state estimator*. Adapun untuk variabel lain hanya memiliki fungsi keanggotaan tunggal yang berbentuk trapesium.



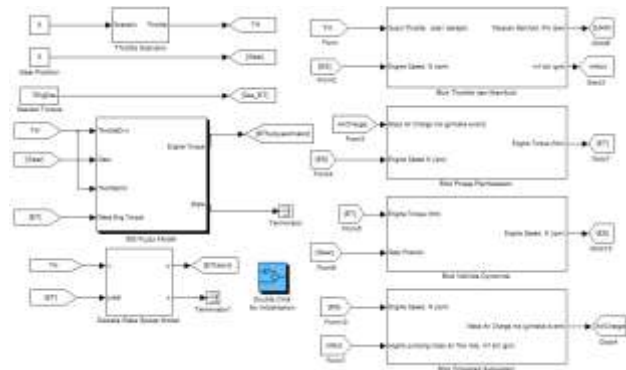
Gambar 9 Fungsi keanggotaan tunggal yang berlaku untuk variabel x_1 , x_2 , u , e , r dan w

3. Hasil dan Analisa

Pada bagian ini terbagi menjadi dua tahap, yaitu pengujian terhadap *fuzzy state estimator* dan pengujian perbandingan respon sistem antara kontroler algoritma genetika – kontrol logika *fuzzy robust* kontroler LQIT.

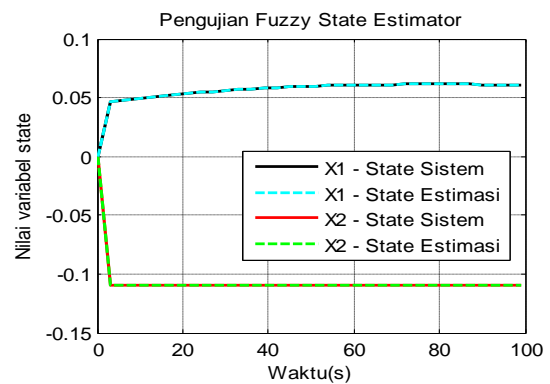
3.1 Pengujian terhadap Fuzzy State Estimator

Pada bagian ini dilakukan pengujian terhadap *fuzzy state estimator* yang didesain menggunakan *fuzzy model* Takagi-Sugeno. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan nilai keluaran *state* sistem dengan nilai keluaran dari *fuzzy model*. Dalam pengujian ini, sistem dirangkai secara *open loop*. Gambar 10 menunjukkan rangkaian *simulink* dari pengujian *fuzzy model*.



Gambar 10 Simulink pengujian fuzzy model

Gambar 11 menunjukkan hasil yang didapatkan dari pengujian *fuzzy state estimator* untuk sudut bukaan *throttle* 10 derajat dan posisi gigi 1. Pada gambar 11 dapat kita lihat bahwa perubahan nilai *state* sistem juga diikuti oleh perubahan nilai *state* hasil dari *fuzzy state estimator* untuk tiap satuan waktu. Hal yang sama juga terjadi pada variasi masukan yang lain di mana nilai *state* estimasi sudah sesuai dengan nilai *state* sistem, sehingga dapat dikatakan bahwa *fuzzy state estimator* dapat bekerja dengan baik. Dengan demikian, hasil *state* estimasi dari *fuzzy state estimator* dapat digunakan sebagai masukan yang *valid* untuk kontroler.

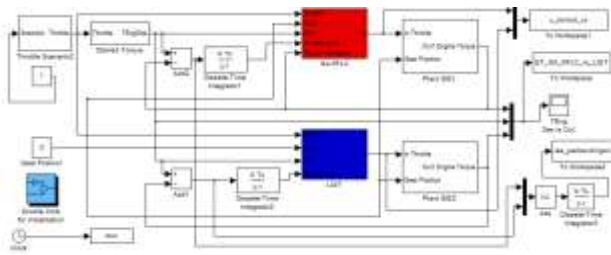


Gambar 11 Hasil pengujian *state* untuk sudut bukaan *throttle* 10 derajat dan posisi gigi 1

3.2 Pengujian Perbandingan Respon Sistem dengan Algoritma Genetika – Kontrol Logika Fuzzy Robust dan Kontrol Optimal

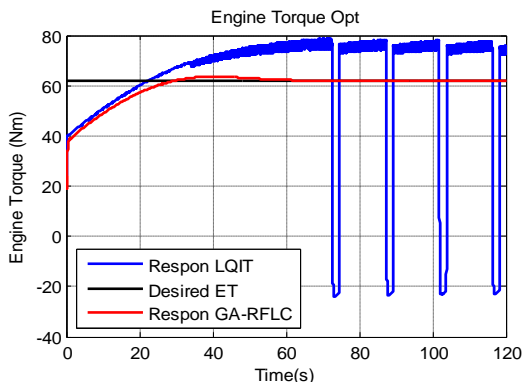
Pada bagian ini dilakukan perbandingan respon sistem mesin pembakaran internal dengan metode kontrol algoritma genetika – kontrol logika *fuzzy robust* dan kontrol optimal LQIT. Penentuan referensi torsi mesin yang optimal didapatkan dari sumber yang sama dengan penelitian sebelumnya oleh Aris Triwiyatno, Mohammad Nuh, Ari Santoso, I Nyoman Sutantra^[3]. Hasil keluaran sistem yang dibandingkan adalah nilai torsi mesin. Gambar 12 adalah rangkaian *simulink* dari pengujian

perbandingan respon sistem dengan algoritma genetika – *fuzzy robust* dan kontrol optimal LQIT.

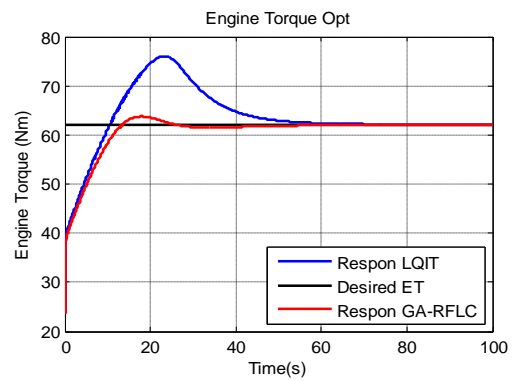


Gambar 12 Simulink pengujian perbandingan respon sistem mesin pembakaran internal dengan algoritma genetika – kontrol logika *fuzzy robust* dan LQIT

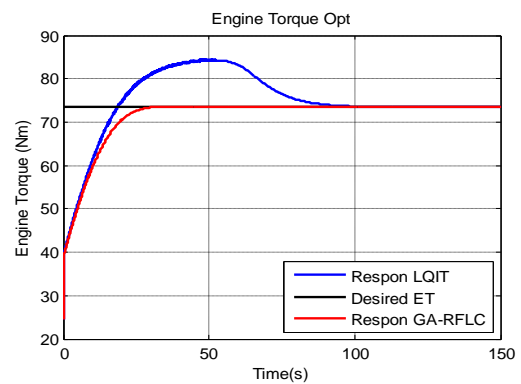
Setelah dilakukan pengujian, didapatkan bahwa untuk setiap kondisi yang mungkin pada mesin kontroler GA-RFLC mampu mengikuti referensi torsi mesin optimal yang diinginkan dan kontroler LQIT tidak mampu mengikuti referensi untuk beberapa kondisi yang mungkin, seperti ditunjukkan pada gambar 13. Selain itu, kondisi di mana kedua kontroler mampu mengikuti referensi juga didapatkan saat pengujian. Akan tetapi, hasil respon sistem dengan kontroler GA-RFLC lebih baik dari pada kontroler LQIT. Hal tersebut ditunjukkan pada gambar 14 dan 15.



Gambar 13 Hasil respon sistem untuk sudut bukaan *throttle* 50 derajat dan posisi gigi 2

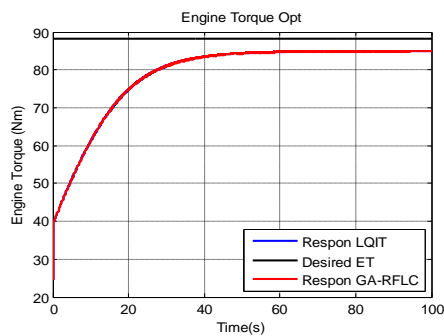


Gambar 14 Hasil respon sistem untuk sudut bukaan *throttle* 50 derajat dan posisi gigi 3

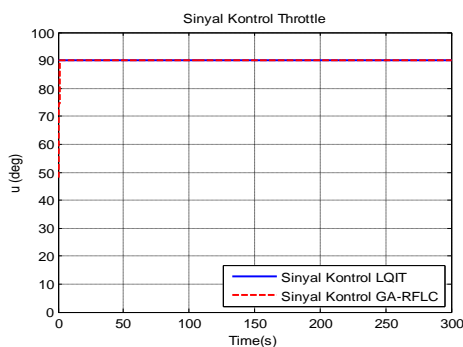


Gambar 15 Hasil respon sistem untuk sudut bukaan *throttle* 70 derajat dan posisi gigi 3

Meskipun demikian, ada beberapa kondisi di mana kedua kontroler memiliki sama-sama tidak mampu mencapai nilai referensi yang diinginkan. Hal ini dikarenakan nilai referensi yang diinginkan melebihi batas maksimum kemampuan mesin dalam menghasilkan torsi mesin, sehingga dapat dikatakan bahwa kondisi-kondisi tersebut tidak mungkin terjadi pada mesin. Kondisi-kondisi tersebut adalah saat variasi masukan sudut bukaan *throttle* 90 derajat pada posisi gigi 1, 2 dan 3. Gambar 16 menunjukkan salah satu hasil respon sistemnya. Gambar 17 menunjukkan sinyal kontrol dari ketiga kondisi tersebut yang sudah mencapai nilai batas maksimum masukan yang mungkin terjadi pada mesin, yakni 90 derajat.



Gambar 16 Hasil respon sistem untuk sudut bukaan throttle 90 derajat dan posisi gigi 3



Gambar 17 Sinyal kontrol yang dihasilkan untuk sudut bukaan throttle 90 derajat dan posisi gigi 1, 2 dan 3

Rata-rata *integral area error* (IAE) digunakan untuk menganalisis secara umum kontroler mana yang memiliki pengendalian lebih baik. Semakin kecil nilai IAE menunjukkan output sistem semakin baik. Tabel 5 memperlihatkan perbandingan nilai IAE kedua kontroler.

Tabel 2 Perbandingan rata-rata nilai IAE

No.	Variasi masukan		Nilai IAE	
	Sudut Throttle	Posisi gigi	GA - RFLC	LQIT
1	10	1	64,9323	130,1523
2	30	1	315,3676	447,7187
3	50	1	1396,8892	3086,3108
4	70	1	2017,4013	2017,7563
5	90	1	6419,4609	6419,4882
6	10	2	29,2014	112,5832
7	30	2	121,3619	234,8151
8	50	2	339,9842	3642,0108
9	70	2	1178,0299	1400,4727
10	90	2	1791,6749	1791,6956
11	10	3	18,8241	91,5931
12	30	3	81,0049	153,4322
13	50	3	163,2783	379,8033
14	70	3	331,1732	755,8256
15	90	3	926,1855	929,6951
16	10	4	13,1358	88,6524
17	30	4	40,4790	91,8469
18	50	4	85,2811	6496,6429
19	70	4	167,1667	3970,3334
20	90	4	330,3821	330,8955
Rata-rata nilai IAE			791,5607	1628,5862

Dari tabel 2 dapat kita lihat bahwa kontroler GA-RFLC memiliki rata-rata nilai IAE relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan kontroler LQIT untuk semua kondisi. Akan tetapi, masih ada beberapa kondisi yang nilai IAE kedua kontroler hampir sama. Hal ini terjadi karena kedua kontroler menghasilkan sinyal kontrol yang sama, seperti yang ditunjukkan pada gambar 17.

4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa penggunaan kontroler GA-RFLC yang didesain pada penelitian ini mampu beroperasi dengan baik untuk titik operasi yang luas dengan karakter tiap titik operasi yang cukup berbeda. Penggunaan kontroler ini akan mampu memberikan peran yang penting dalam memperbaiki performa mesin karena telah mampu mencapai nilai torsi optimal yang berpengaruh pada kondisi ideal pembakaran sempurna pada mesin. Adapun penggunaan kontroler tunggal seperti kontrol optimal LQIT telah terbukti tidak mampu mencapai nilai referensi untuk sistem dengan kondisi yang memiliki titik operasi yang cukup luas. Sebagai saran untuk pengembangan selanjutnya, dapat dilakukan modifikasi proses mutasi dan pindah silang yang adaptif pada algoritma genetika agar proses iterasi yang dilakukan menjadi lebih efektif. Selain itu, pengendalian torsi mesin akan menjadi lebih aplikatif apabila disertakan juga dengan pengendalian subsistem lain dalam kontrol otomotif, seperti pengendalian kecepatan putar mesin, A/F (*Air to Fuel ratio*), *ignition time* atau EGR (*Exhaust Gas Recirculation*).

Referensi

- [1]. Badan Pusat Statistik, (2011), *Jumlah Kendaraan Bermotor di Indonesia tahun 2008-2011*, <http://www.bps.go.id/> [19 Mei 2012]
- [2]. Kementerian ESDM, (2011), *Produksi, Konsumsi dan Impor BBM Indonesia 2005-2010*, <http://www.esdm.go.id/> [19 Mei 2012]
- [3]. Triwiyatno, A., Nuh, M., Santoso, A. dan Sutantra I. N., (2011), *Engine Torque Control of Spark Ignition Engine Using Robust Fuzzy Logic Control*, IACSIT Journal International of Engineering and Technology, vol. 3, no. 4, hal 352 - 358
- [4]. Triwiyatno, A., Nuh, M., Santoso, A. dan Sutantra I. N., (2012), *Engine Torque Control of Spark Ignition Engine Using Fuzzy Gain Scheduling*, Telkonnika, vol. 10, no. 1, hal 83 - 90
- [5]. Triwiyatno, A., (2011), *Optimal-Fuzzy Control Design : Case Study of Engine Torque Control of Spark Ignition Engine*, International Conference on Informatics for Development 2011
- [6]. Stefanopoulou, A. (1996), *Modeling and Control of Advanced Technology Engine*, **Ph.D. Thesis**, Electrical Engineering: Systems, The University of Michigan.
- [7]. Lamberson, D.M. (2003), *Torque Management of Gasoline Engine*, **Tesis Master**, Mechanical Engineering, University of California at Berkeley

- [8]. Sutojo, T., Mulyanto, E. dan Suhartono, V., (2011) *Kecerdasan Buatan*, Penerbit ANDI Yogyakarta
- [9]. Kuswadi, Son., (2007) *Kendali Cerdas Teori dan Aplikasi Praktisnya*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- [10]. T. Takagi dan M. Sugeno, Fuzzy identification of systems and its applicationsto modeling and control”, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. SMC-15, pp. 116–132, May 1985.
- [11]. Mastorakis, N.E. (2004), “Modelling dynamical systems via the Takagi-Sugeno fuzzy model”, Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Fuzzy sets and Fuzzy Systems, Udine, Italy, March 25-27.
- [12]. Triwiyatno, Aris., Mohammad Nuh., Ari Santoso., I NyomanSutantra., “Fuzzy State Observer Design for Engine Torque Control System of Spark Ignition Engine”, Dissertation, InstitutTeknologiSepuluh November, Surabaya, 2011.
- [13]. F. Khaber, K. Zehar, dan A. Hamzaoui, “State feedback controller design via Takagi-Sugeno fuzzy model: LMI approach”, International Journal of Computation Intelligence, Vol 2, No 2, pp. 148-153, 2005.
- [14]. Triwiyatno, Aris., Mohammad Nuh., Ari Santoso., I Nyoman Sutantra., A New Method of Robust Fuzzy Control: Case Study of Engine Torque Control of Spark Ignition Engine, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2011.
- [15]. Lewis, Frank, dkk. Optimal Control, John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [16]. Ogata, Katsuhiko (2002) Modern Control Engineering, University of Minnesota, New Jersey : Prentice Hall.
- [17]. ---,Transient Response Analysis, http://www.ece.uvic.ca/~agullive/trans/B_p1-38.pdf/, Oktober 2012.
- [18]. Storn, R. dan Price, K. “Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces”, Journal of Global Optimization, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 11: 341-359, 1997
- [19]. Yu, Hong Biao dan Nan Yu, Application of Genetic Algorithms to Vehicle Suspension Design, Mechanical Engineering Department, The Pennsylvania State University.