

DESAIN SISTEM KONTROL ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS) PADA MODEL AUTOMATIC-ANTILOCK BRAKING SYSTEM

Kurniawan Nur Aryadi^{*)}, Aris Triwiyatno, and Budi Setiyono

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

^{*)}E-mail :kurrz23@gmail.com

Abstrak

Automatic-antilock Braking System merupakan sistem pengereman otomatis yang aman pada kendaraan, khususnya mobil. Cara kerja dari sistem ini adalah untuk mengukur slip pada roda sebagai variabel yang dikontrol dan torsi (torque) pengereman sebagai variabel yang dapat dimanipulasi. Penelitian ini dilakukan untuk merancang sistem kontrol yang dapat menjaga keluaran sistem yang berupa slip agar tetap dapat dipertahankan pada nilai setpoint. Pada penelitian ini, Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) digunakan sebagai kontroler, yang merupakan kombinasi Fuzzy Logic Control dengan Neural Network yang memiliki kemampuan Adaptasi. Proses perancangan ANFIS memerlukan pasangan data masukan-keluaran yang disebut data pelatihan (training) yang diperlukan untuk proses pembelajaran. Pada penelitian ini pasangan data pelatihan didapat dari kontroler PID yang dianggap sebagai “guru” bagi ANFIS. Tujuan dari proses pembelajaran ANFIS adalah meminimalkan error yang terjadi antara keluaran ANFIS dan PID. Implementasi kontroler pada penelitian ini dilakukan secara simulasi dengan menggunakan Matlab/Simulink dan akan dibandingkan hasilnya dengan Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System. Hasil penelitian dan analisis yang didapatkan dari simulasi ANFIS automatic-antilock braking system berhasil mencapai jarak pemberhentian yang paling pendek serta nilai integral absolute error (IAE) dari slip yang paling kecil jika dibandingkan dengan Genetic-Fuzzy automatic-antilock braking system.

Kata Kunci : Slip, Automatic-Antilock Braking, ANFIS, PID

Abstract

Automatic-Antilock Braking System is the safe braking system which implemented to the vehicle, especially for the car. This system works to measure the slip on wheels as the parameter to be controlled, and braking torque as the manipulative variable. The objective of the research is to design control system that can keep the output of the system which is the slip that should be kept on its setpoint. In this research, Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) was used to be a controller, which is a combination of fuzzy logic control and neural network system that have capability of adaptation. Design process of ANFIS need an input /output data set, called training data for training process. In this research, training data was gotten from PID controller as teacher for ANFIS. The objective of ANFIS training process is to minimize output error between ANFIS and PID. Implementation of controller in this research will be simulated using Matlab/Simulink and will be compared with Genetic Fuzzy Automatic-Antilock Braking System. The results and analysis obtained by simulation, ANFIS success to achieve the shortest stopping distance and the IAE value from slip is the smallest than Genetic-Fuzzy Automatic Braking System.

Key word : Slip, Automatic-Antilock Braking, ANFIS, PID

1. Pendahuluan

Produsen otomotif telah membidik Indonesia sebagai target pasar yang prospektif dalam jangka 5 tahun belakangan ini. Lantaran Indonesia dianggap banyak pihak merupakan pasar potensial, para produsen pun mensinyalir bakal menghadirkan mobil-mobil terbaru di

tahun 2015. Dengan kondisi ini, dipastikan, persaingan otomotif di Tanah Air bakal kian sengit.. Hal ini terbukti dari pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor dari tahun 2008 sampai 2014 yang terus meningkat, telah dipublikasikan oleh Badan Pusat Statistik. Semakin banyak kendaraan bermotor yang beroperasi di jalan,

semakin tinggi pula resiko adanya kecelakaan setiap tahunnya.

Banyaknya jumlah kendaraan berimbas pada makin banyaknya kecelakaan yang terjadi. Agus Hamonangan mengungkapkan dalam tulisannya bahwa 80 persen kecelakaan berawal dari kesalahan manusia, diantaranya adalah terlambat melakukan pengereman dan kepanikan dalam menekan pedal rem, sehingga pedal rem tidak ditekan secara penuh. Berbagai sistem keamanan telah dikembangkan, namun sayangnya sistem keamanan tersebut tidak menjamin berkurangnya angka kecelakaan lalu lintas, beberapa faktor penting ditemukan sebagai penyebab tingginya angka kecelakaan. Menurut sumber, Mabes Polri menyebutkan bahwa kecelakaan sepanjang tahun 2012, 65 persen disebabkan oleh manusia.

Penulis merancang sebuah simulasi sistem *safety* untuk pengereman otomatis dengan menjaga slip agar tidak terjadi penguncian pada roda menggunakan Matlab. Dalam penelitian ini didesain kontroler ANFIS pada model *Automatic-Antilock Braking System* untuk mengikuti ratio slip ideal dan dapat melakukan perlambatan hingga kendaraan berhenti pada jarak yang aman terhadap kendaraan lain yang melakukan pemberhentian darurat. Metode ini merupakan pengembangan penelitian sebelumnya [1] yang telah menggunakan *fuzzy* pada model *automatic-antilock braking system*. Pada penelitian ini akan digunakan kontroler ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) dan untuk metode pembelajaran ANFIS, menggunakan kontroler PID yang bertindak sebagai “guru” bagi kontroler ANFIS.

2. Metode

2.1. Automatic-Antilock Braking System

Model *automatic antilock braking* diperoleh dengan memodifikasi beberapa parameter masukan pada *antilock braking*, di mana umumnya dimulai ketika sensor kecepatan mendeteksi kecepatan angular roda mendekati nol, kemudian kontroler akan memerintahkan piston rem untuk mengurangi tekanan, kemudian ketika sensor kecepatan mendeteksi kecepatan angular roda lebih besar dari nol, kontroler akan menambahkan tekanan kembali agar roda tetap berputar.

a. Model Matematika Dinamik Kendaraan

Persamaan dan model *antilock braking system* [2] adalah hasil dari hukum *Newton* yang diaplikasikan pada roda dan *body* kendaraan. Pergerakan kendaraan merupakan gaya total yang ditujukan untuk kendaraan selama proses pengereman berlangsung.

$$\dot{V}_v = \frac{-1}{M_v} [4F_t(t) + F_v(t) + F_\theta(\theta)] \quad (1)$$

Dimana \dot{V}_v adalah percepatan atau perlambatan linear kendaraan (m/s^2), namun dalam hal ini adalah

perlambatan, sebab kendaraan melakukan pengereman sehingga bernilai negatif. M_v adalah massa dari kendaraan dalam satuan kg dan F_v merupakan gaya aerodinamis yang dilawan oleh kendaraan (N).

$$F_v(t) = B_v V_v \quad (2)$$

Gaya lawan angin berasal dari perkalian konstanta (B_v) dan kecepatan linear body kendaraan V_v (m/s). Gaya lawan angin tercipta karena tabrakan antara angin dan kendaraan, dalam hal ini adalah mobil. $F_t(t)$ adalah gaya traksi dan $F_\theta(\theta)$ adalah gaya dari kendaraan yang merupakan hasil dari pergerakan vertikal gradien di jalan yang mengakibatkan

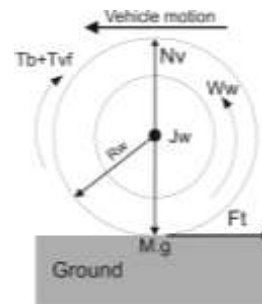
$$F_\theta(\theta) = M_v g \sin(\theta) \quad (3)$$

Di mana θ (θ) adalah sudut kemiringan terhadap permukaan jalan dan g adalah konstanta percepatan gravitasi (satuan m/s^2). Gaya traksi diperoleh dari persamaan :

$$F_t(t) = \mu(\lambda) N_v(\theta) \quad (4)$$

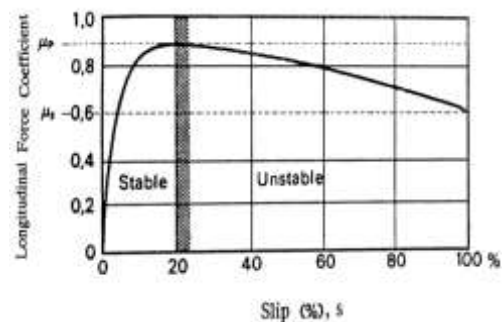
$$\mu(\lambda) = \frac{T_b}{T_t} \quad (5)$$

$\mu(\lambda)$ adalah koefisien gesek roda dengan jalan dan $N_v(\theta)$ adalah gaya normal yang bekerja vertikal pada kendaraan dengan pusat gravitasi.



Gambar 1. Pergerakan roda [2]

Besar gaya traksi dipengaruhi oleh $\mu(\lambda)$, dan $\mu(\lambda)$ selalu berubah berdasarkan slip yang dialami oleh roda [3].



Gambar 2. Grafik Kestabilan Ratio Slip terhadap Koefisien gesek [3]

Gambar 2 menjelaskan rasio aman (stabil) ketika ratio slip $\leq 20\%$, dan ratio tidak aman (tidak stabil) ketika ratio slip $> 20\%$. Model ini diasumsikan bahwa kendaraan mempunyai 4 roda (mobil) dan berat kendaraan didistribusikan merata di setiap roda. Sehingga gaya yang diterima masing-masing roda adalah :

$$N_v(\theta) = \frac{M_v g}{4} \cos(\theta) \quad (6)$$

Karena $V_v(t)/R_w$ [2] adalah kecepatan sudut dari kendaraan, sehingga diperoleh hubungan :

$$\omega_v = \frac{V_v(t)}{R_w} \quad (7)$$

di mana, ω_v adalah kecepatan angular bodi kendaraan (rad/s). $V_v(t)$ adalah kecepatan linear kendaraan (m/s), dan R_w adalah radius atau jari-jari roda kendaraan (m).

b. Model Matematika Dinamik Roda

Persamaan dinamik roda kendaraan diperoleh dari keseluruhan gaya torsi rotasi yang terjadi di roda, sehingga diperoleh Persamaan 8 [8]

$$\dot{w}_w(t) = \frac{1}{J_w} [-T_b(t) - B_w w_w + T_t(t)] \quad (8)$$

di mana $\dot{w}_w(t)$ adalah percepatan sudut dari roda (rad/s²), J_w adalah inersia rotasi (kg m²), w_w adalah kecepatan sudut dari roda (rad/s), B_w adalah koefisien gesekan roda, $T_b(t)$ adalah torsi pengereman (Nm), $T_t(t)$ adalah torsi yang dihasilkan karena slip antara roda dan jalan (Nm). Torsi roda yang dialami keempat roda diperoleh dari persamaan :

$$T_t(t) = R_w F_t(t) \quad (9)$$

di mana $F_t(t)$ adalah gaya traksi (N), R_w adalah jari-jari roda (m). Pengontrolan *antilock braking system* adalah menjaga nilai maksimal pada perubahan koefisien gesek. Umumnya, koefisien gesek μ selama pengereman

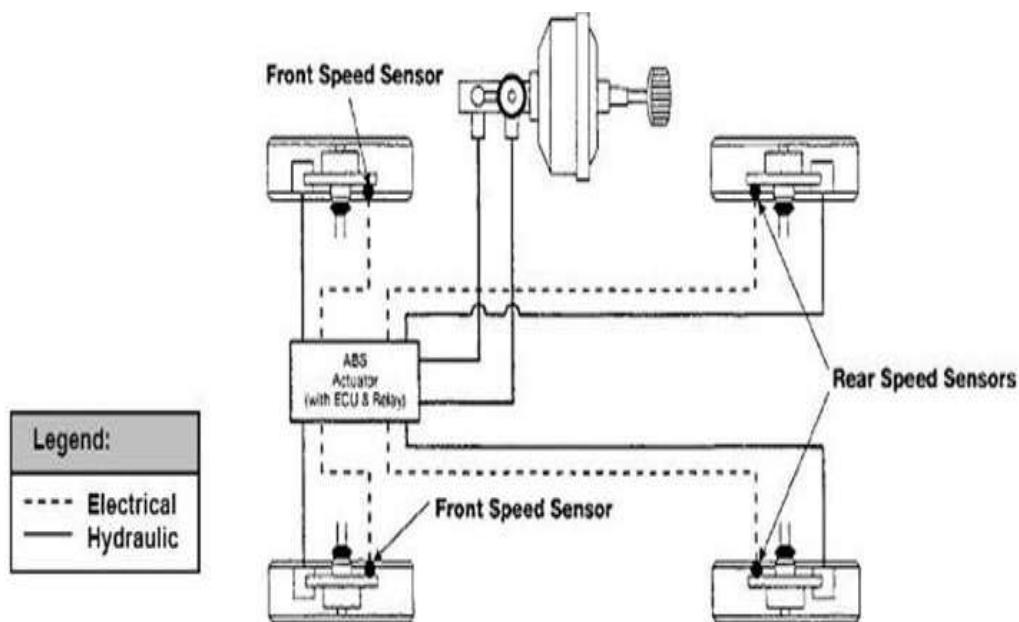
berlangsung didefinisikan sebagai slip (ketidaklinieran) λ , diperoleh dari persamaan :

$$\lambda(t) = \frac{\omega_v(t) - \omega_w(t)}{\omega_v(t)} \quad (10)$$

di mana, $\lambda(t)$ adalah ratio slip pada roda, $\omega_v(t)$ adalah kecepatan angular bodi kendaraan (rad/s), dan $\omega_w(t)$ adalah kecepatan angular kendaraan (rad/s). Sketsa *wireline* pada antilock braking system ditunjukkan pada gambar 3

Tabel 1. Parameter Automatic Antilock Braking System

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
M_v	1368	kg	Massa bodi kendaraan
R_w	0,33	m	Jari-jari roda kendaraan
J_w	1,13	kgm ²	Inersia rotasi roda kendaraan
B_w	6	Ns	Viscous friction roda kendaraan
B_v	4	Ns	Viscous friction bodi kendaraan
g	9,8	m/s ²	Percepatan gravitasi
D_s	0,2	-	Nilai slip yang diinginkan

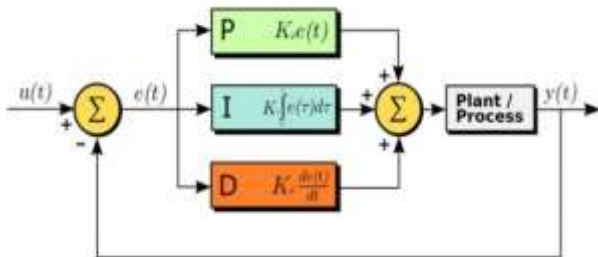


Gambar 3. Antilock Braking System [2]

2.3. Perancangan Kontroler PID

Kontroler PID merupakan gabungan dari tiga macam kontroler, yaitu kontroler proporsional (proportional controller), kontroler integral (integral controller) dan kontroler turunan / derivatif (derivative controller). Tujuan dari penggabungan ketiga macam pengendali

tersebut adalah untuk memperbaiki kinerja sistem di mana masing-masing kontroler akan saling melengkapi dan menutupi dengan kelebihan masing-masing. Kontroler PID akan bertindak sebagai “guru” untuk proses pembelajaran kontroler ANFIS.



Gambar 4. Diagram blok kontroler PID

Proses perancangan kontroler PID menggunakan algoritma PSO untuk melakukan proses *tuning gain* pengendali PID secara *offline*, dengan fungsi obyektif yang digunakan adalah Integral Absolute Error (IAE) yang dirumuskan dalam persamaan berikut,

$$IAE = \int_{t_i=0}^{t_i} |e(t)| dt \quad (11)$$

2.4. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*) merupakan gabungan antara prinsip belajar dari JST untuk adaptasi fungsi keanggotaan dari *fuzzy*. Kombinasi dari kedua jenis kontroler ini dilakukan untuk saling melengkapi kelebihan dan mengurangi kekurangan masing-masing kontroler. Secara fungsional, arsitektur ANFIS sama dengan *fuzzy rule base* dengan model Sugeno. Dapat dikatakan bahwa ANFIS adalah suatu metode yang menggunakan algoritma pembelajaran terhadap sekumpulan data untuk melakukan penyetelan aturan [4].

2.4.1. Arsitektur ANFIS

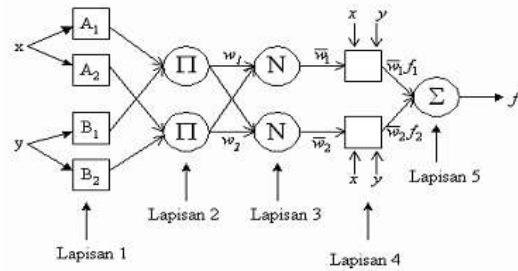
Misalkan terdapat 2 masukan x dan y dengan masing-masing masukan memiliki 2 buah fungsi keanggotaan. Keluaran jaringan yang dihasilkan yaitu f dengan 2 buah fungsi keanggotaan. Jika dalam suatu sistem hanya membutuhkan 2 buah aturan sebagai berikut :

If x_1 is A_1 and x_2 is B_1 then $f_1 = p_{11}x_1 + q_{12}x_2 + r_{10}$
 If x_1 is A_2 and x_2 is B_2 then $f_2 = p_{21}x_1 + q_{22}x_2 + r_{20}$

maka dapat dihitung nilai rata-rata terbobot sebagai keluaran jaringan (f) dengan nilai *firing strength* untuk kedua aturan adalah w_1 dan w_2 :

$$f = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \quad (12)$$

ANFIS dibentuk dengan arsitektur jaringan seperti *neural network* yang memiliki beberapa lapisan terdiri dari lapisan masukan, lapisan tersembunyi, serta lapisan keluaran. Pada setiap lapisan terdapat proses perhitungan yang pada akhirnya akan menghasilkan keluaran jaringan ANFIS. Arsitektur jaringan ANFIS dengan 5 lapisan ditampilkan pada Gambar 5



Gambar 5. Arsitektur jaringan ANFIS [11]

Jaringan ANFIS pada Gambar 2.29 terdiri dari lapisan-lapisan sebagai berikut [4],[5] :

- Lapisan 1 : Tiap tiap neuron i pada lapisan pertama adaptif terhadap parameter suatu fungsi aktivasi. Keluaran dari tiap neuron berupa derajat keanggotaan yang diberikan oleh fungsi keanggotaan masukan, yaitu: $\mu_{A1}(x)$, $\mu_{B1}(y)$, $\mu_{A2}(x)$, atau $\mu_{B2}(y)$. Fungsi simpul pada lapisan ini adalah :

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \text{ untuk } i = 1,2 \quad (13)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_i}(y) \text{ untuk } i = 1,2 \quad (14)$$

Sebagai contoh, misalkan fungsi keanggotaan yang digunakan adalah *generalized bell* berikut :

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (15)$$

{ a, b, c } adalah parameter-parameter, biasanya $b=1$. Jika nilai parameter-parameter ini berubah, maka bentuk kurva yang terjadi pun akan ikut berubah. Parameter-parameter pada lapisan ini biasanya dikenal dengan nama *premise parameters*.

- Lapisan 2 : Pada tahap ini berlaku operasi perkalian (AND) antara nilai fuzzifikasi dari titik yang ada sebelumnya sebagai proses implikasi *fuzzy*. Persamaan keluaran pada simpul tetap ini adalah :

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \text{ untuk } i = 1,2 \quad (16)$$

- Lapisan 3 : Setiap neuron pada lapisan ini adalah simpul tetap yang merupakan hasil perhitungan rasio dari aturan derajat keanggotaan ke- i dengan jumlah dari seluruh aturan derajat keanggotaan, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1,2 \quad (17)$$

- Lapisan 4 : Setiap neuron pada lapisan ini merupakan simpul adaptif terhadap suatu keluaran :

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (18)$$

dengan \bar{w}_i adalah *normalized firing strength* pada lapisan ke-3 dan (p_i, q_i, r_i) adalah parameter-parameter pada neuron tersebut. Parameter-parameter pada lapisan tersebut disebut dengan nama *consequent parameters*.

Lapisan 5 : *Output layer*

Setiap neuron pada lapisan ini merupakan simpul tunggal tetap yang menghitung keluaran dengan cara menjumlahkan semua masukan.

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (19)$$

2.4.2. Algoritma Pembelajaran Hybrid

Proses adaptasi yang terjadi dalam sistem ANFIS dikenal juga dengan proses pembelajaran, yaitu parameter-parameter ANFIS (baik *premise* maupun *consequent*) akan diperbaharui selama proses pembelajaran. Pada saat parameter-parameter tersebut ditemukan, keluaran yang terjadi merupakan kombinasi linier dari *consequent parameters*, yaitu [10] :

$$f = \frac{w_1}{w_1+w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1+w_2} f_2 \quad (20)$$

$$= \bar{w}_1 (p_{11}x + q_{12}y + r_{10}) + \bar{w}_2 (p_{21}x + q_{22}y + r_{20}) \quad (21)$$

$$= (\bar{w}_1 x) p_{11} + (\bar{w}_1 y) q_{12} + \bar{w}_1 r_{10} + (\bar{w}_2 x) p_{21} + (\bar{w}_2 y) q_{22} + \bar{w}_2 r_{20} \quad (22)$$

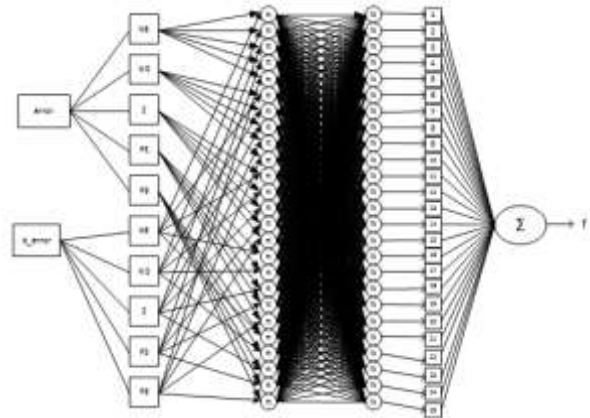
Algoritma pembelajaran ANFIS akan mengatur parameter-parameter *output* p_{ij} , q_{ij} , dan r_{ij} secara maju (*forward*) dan akan mengatur parameter-parameter himpunan *fuzzy* (a_i , b_i , c_i) secara mundur (*backward*). Pada langkah maju, masukan jaringan akan merambat maju sampai pada lapisan ke empat, di mana parameter-parameter p_{ij} akan diidentifikasi menggunakan metode *least square*. Sedangkan pada langkah mundur, galat / *error* akan merambat mundur dan parameter-parameter (a_i , b_i , c_i) akan diperbaiki dengan menggunakan metode *backpropagation gradient descent*.

2.4.3. Perancangan Kontroler ANFIS

Perancangan kontroler ANFIS perlu dilakukan agar *plant Automatic-Antilock Braking System* yang dikontrol dengan ANFIS dapat menghasilkan respon yang baik. Pada penelitian ini, perancangan kontroler ANFIS dilakukan sebagai berikut :

- Arsitektur jaringan yang digunakan merupakan *Fuzzy Inference System* tipe *Sugeno*
- Fungsi keanggotaan yang digunakan adalah tipe *generalized bell*
- Jumlah fungsi keanggotaan masing-masing masukan adalah 5 buah serta 25 buah fungsi keanggotaan keluaran.

- Jumlah *rules* yang dibangkitkan berjumlah 25 *rules*



Gambar 6. Arsitektur jaringan dari perancangan ANFIS

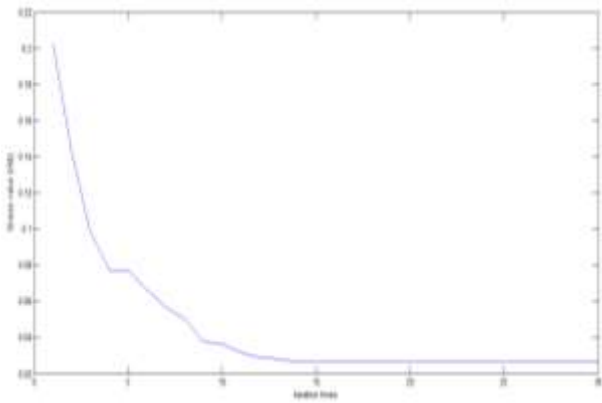
3. Hasil dan Analisa

Pengujian dan Analisa pada sistem Automatic-Antilock Braking System dibagi atas beberapa tahap, yaitu : penentuan konstanta kontroler PID hasil *tuning* dengan menggunakan algoritma PSO untuk simulasi kondisi aspal kering dan aspal basah, pengujian kontroler ANFIS dibandingkan kontroler *Genetic-Fuzzy* pada simulasi kondisi aspal kering, dan pengujian kontroler ANFIS dibandingkan kontroler *Genetic-Fuzzy* pada simulasi kondisi aspal basah.

3.1. Hasil Optimasi Kontroler PID dengan algoritma PSO (Aspal Kering)

Pada proses optimasi ini, iterasi dilakukan sebanyak 30 kali. Berikut adalah hasil optimasi kontroler PID dengan PSO menggunakan fungsi obyektif IAE (*Integral Absolute Error*) pada kondisi aspal kering untuk kecepatan 15 m/s dan jarak 15,7 meter yang ditunjukkan pada Gambar 7.

Berdasarkan hasil konvergensi pada Gambar 7, diperoleh konstanta kontroler PID yang telah di *tuning* dengan PSO masing-masing yaitu $K_p = 23,7660$, $K_i = 3,5869$, dan $K_d = 0,5226$ untuk simulasi kondisi aspal kering. Konstanta PID ini akan digunakan sebagai “guru” untuk kontroler ANFIS.



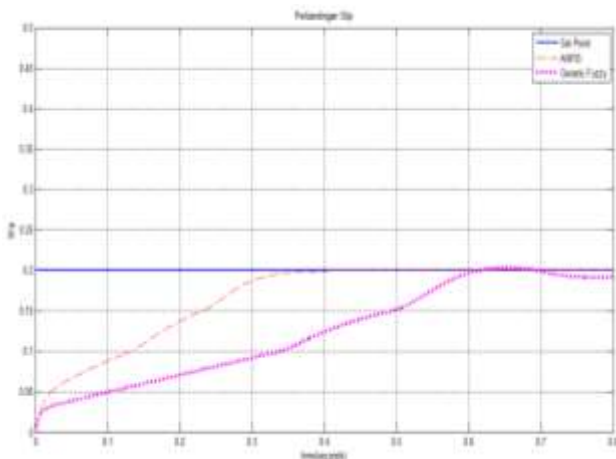
Gambar 7. Grafik konvergensi fungsi obyektif (IAE)

3.2. Pengujian ANFIS pada Simulasi Kondisi Aspal Kering

Pada bagian ini, keluaran sistem yang berupa *slip* roda akan diamati, dan dibandingkan antara ANFIS dengan *genetic fuzzy*. Kontroler dirancang untuk mempertahankan nilai *slip* berada pada 0,2 agar mendapatkan gaya gesek terbesar yaitu 1. Pada saat simulasi kondisi aspal kering, sistem akan diberikan masukan kecepatan 15 m/s (54 km/jam) dan jarak 15,7 meter.

Hasil Uji Slip

Hasil pengujian terhadap slip ditunjukkan pada Gambar 8. Grafik dengan garis putus-putus (- -) merupakan *slip* dari kontroler ANFIS sedangkan garis putus dengan tanda (:) merupakan *slip* dari *genetic-fuzzy*.

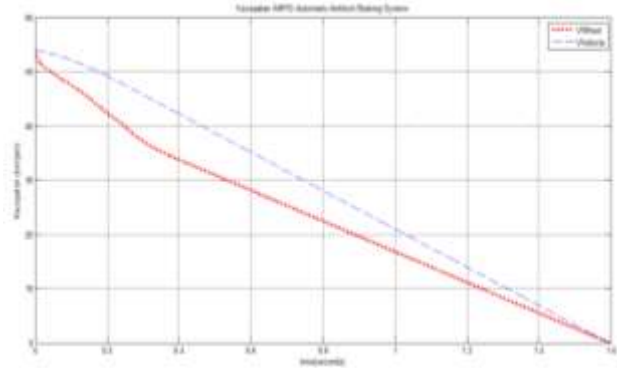


Gambar 8. Perbandingan Slip

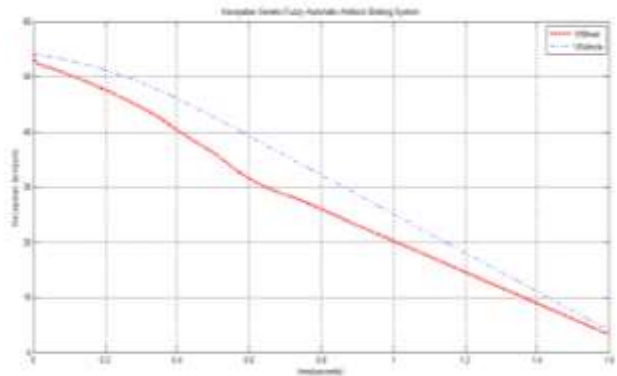
Nilai slip tertinggi dari ANFIS *automatic-antilock braking system* adalah 0,1999. Nilai ini merupakan titik overshoot tertinggi dari ANFIS *automatic-antilock braking system*, sedangkan untuk *genetic-fuzzy* memiliki overshoot tertinggi 0,2034.

Hasil Uji Kecepatan Angular

Hasil pengujian untuk kecepatan angular dari masing-masing kontroler ditunjukkan pada Gambar 9 dan 10.



Gambar 9. Kecepatan Angular dari Kontroler ANFIS

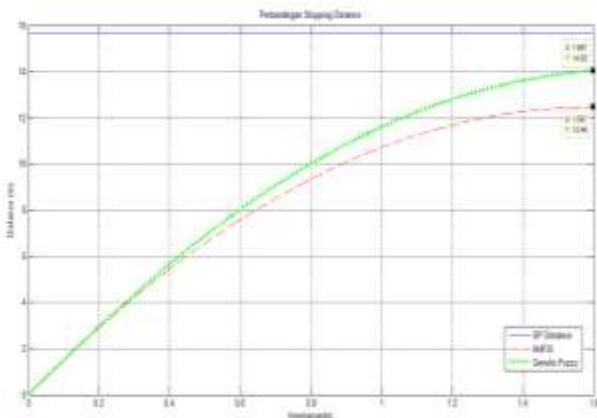


Gambar 10. Kecepatan Angular dari kontroler Genetic-Fuzzy

Pada detik ke 1,597 s kecepatan roda dan bodi kendaraan dari kontroler ANFIS telah mencapai 0 km/jam sedangkan *genetic-fuzzy* masih menyisakan kecepatan bodi kendaraan menunjukkan 4,124 km/jam dan kecepatan roda 3,323 km/jam.

Hasil Uji Jarak Pengereman

Hasil pengujian terhadap jarak pengereman seperti ditunjukkan pada Gambar 11, yang merupakan jarak berhenti pengereman dari masing-masing kontroler.

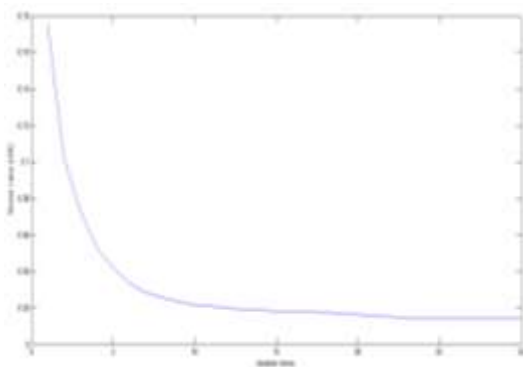


Gambar 11. Perbandingan Braking Distance dari Kontroler ANFIS dan Genetic-Fuzzy

Grafik dengan garis putus-putus menggunakan tanda (- -) merupakan jarak pengereman (*braking distance*) dari kontroler ANFIS sedangkan garis dengan tanda titik dua putus-putus (: :) merupakan jarak pengereman dari kontroler genetic-fuzzy. Gambar 11 menunjukkan bahwa *automatic-antilock braking system* dengan kontroler ANFIS lebih cepat berhenti. Pada detik ke 1,597 s kontroler ANFIS menempuh jarak 12,46 m sedangkan kontroler genetic-fuzzy 14,02 m.

3.3. Hasil Optimasi Kontroler PID dengan algoritma PSO (Aspal Basah)

Sama seperti halnya pada kondisi aspal kering, pada kondisi aspal basah, iterasi dilakukan sebanyak 30 kali. Berikut adalah hasil optimasi kontroler PID dengan PSO menggunakan fungsi obyektif IAE (*Integral Absolute Error*) pada kondisi aspal basah untuk kecepatan 15 m/s dan jarak 17,5 meter seperti ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik konvergensi fungsi objektif (IAE)

Berdasarkan hasil konvergensi pada Gambar 7, diperoleh konstanta kontroler PID yang telah di *tuning* dengan PSO masing-masing yaitu $K_p = 35,5508$, $K_i = 5,8131$, dan $K_d = 0,6880$ untuk simulasi kondisi aspal basah. Konstanta

PID ini akan digunakan sebagai “guru” untuk kontroler ANFIS.

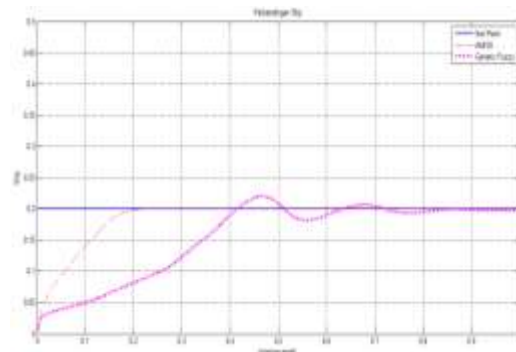
3.4. Pengujian ANFIS pada Simulasi Kondisi Aspal Basah

Perbedaan kondisi jalan aspal kering dan basah berada pada $\mu(\lambda)$ koefisien gesek roda terhadap aspal. Pada kondisi aspal basah, koefisien gesek paling tinggi adalah ketika slip berada pada nilai 0,2 di mana koefisien gesek menunjukkan nilai 0,8. Apabila dibandingkan dengan simulasi kondisi aspal kering, koefisien gesek pada aspal basah lebih rendah.

Pada saat kondisi aspal basah, sistem akan diberikan masukan kecepatan 15 m/s (54 km/jam) dengan *set point* jarak untuk pengereman 17,5 meter.

Hasil Uji Slip

Hasil pengujian terhadap slip ditunjukkan pada Gambar 13. Grafik dengan garis putus-putus dengan tanda (- -) merupakan *slip* dari kontroler ANFIS sedangkan garis putus dengan tanda (: :) merupakan *slip* dari genetic-fuzzy.

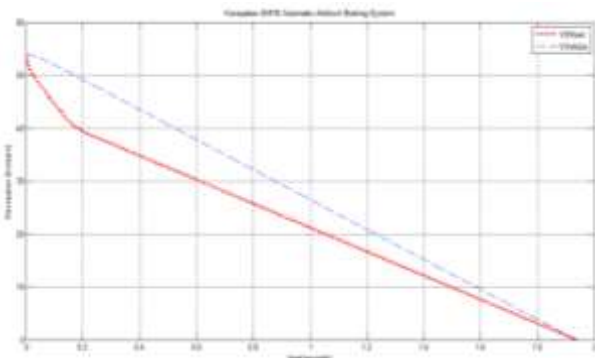


Gambar 13. Perbandingan Slip

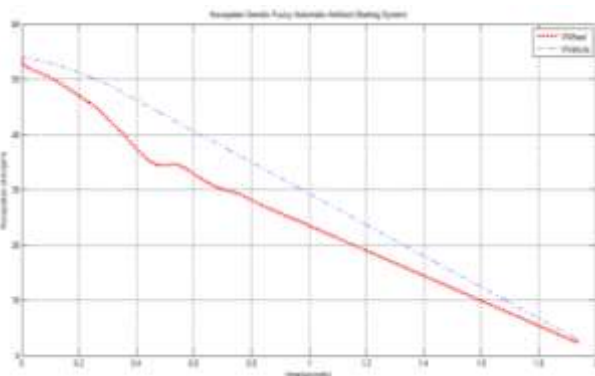
Nilai slip tertinggi dari ANFIS *automatic-antilock braking system* adalah 0,2003. Nilai ini merupakan titik overshoot tertinggi dari ANFIS *automatic-antilock braking system*, sedangkan untuk genetic-fuzzy memiliki overshoot tertinggi 0,2197.

Hasil Uji Kecepatan Angular

Hasil pengujian untuk kecepatan angular dari masing-masing kontroler seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14 dan 15.



Gambar 14. Kecepatan Angular dari Kontroler ANFIS

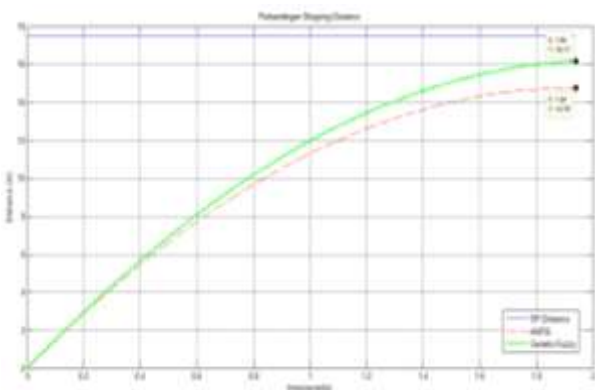


Gambar 15. Kecepatan Angular dari kontroler Genetic-Fuzzy

Pada detik ke 1,940 s kecepatan roda dan bodi kendaraan dari kontroler ANFIS telah mencapai 0 km/jam sedangkan *genetic-fuzzy* masih menyisakan kecepatan bodi kendaraan menunjukkan 2,844 km/jam dan kecepatan roda 2,283 km/jam.

Hasil Uji Jarak Pengereman

Hasil pengujian terhadap jarak pengereman seperti ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Perbandingan Braking Distance dari kontroler ANFIS dan Genetic-Fuzzy

Grafik dengan garis putus-putus (- -) merupakan jarak berhenti dari kontroler ANFIS sedangkan garis dengan tanda titik dua putus-putus (: :) merupakan jarak berhenti dari kontroler *genetic-fuzzy*. Pada detik ke 1,944 s kontroler ANFIS menempuh jarak 14,76 m sedangkan kontroler *genetic-fuzzy* 16,17 m.

4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis ANFIS *automatic – antilock braking system* berhasil memperbaiki dan mencapai stopping distance yang paling pendek serta nilai *integral absolute error* (IAE) dari slip yang paling kecil jika dibandingkan dengan *Genetic-Fuzzy*. Pada simulasi kondisi aspal kering kontroler ANFIS berhasil mencapai jarak berhenti pada jarak 12,46 m dengan nilai IAE 0,02771, dan kecepatan akhir 0 rad/s pada waktu 1,597 s sedangkan *Genetic-Fuzzy* mencapai jarak berhenti pada jarak 14,02 m dengan nilai IAE 0,06582 dan belum berhenti pada waktu 1,597 s. Pada simulasi kondisi aspal basah kontroler ANFIS berhasil mencapai jarak berhenti pada jarak 14,76 m dengan nilai IAE 0,01488, dan kecepatan akhir 0 rad/s pada waktu 1,940 s sedangkan *Genetic-Fuzzy* mencapai jarak berhenti pada jarak 16,17 m dengan nilai IAE 0,05087 dan belum berhenti pada waktu 1,940 s.

Referensi

Journal :

- [1]. Ahmaliansyah, Rezki, “*Desain Kontroler Fuzzy Pada Model Automatic Braking System Dengan Antilock*”, Laporan Tugas Akhir-S1, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Indonesia, 2013.
- [2]. Lin, C.M., dan Hsu, C.F., “*Self-Learning Fuzzy Sliding-Mode Control for Antilock Braking Systems*”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.11, no.2, Maret 2003.
- [3]. M. Oudghiri, M. Chadli. A. El Hajjaji, *Robust Fuzzy Sliding Mode Control for Antilock Braking System*, France, 2007.

Textbooks :

- [4]. Kusumadewi, Sri, dan Sri Hartati, *Neuro-Fuzzy Integrasi Sistem Fuzzy & Jaringan Syaraf Tiruan Edisi 2*, Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta.
- [5]. Jang, J-S, dkk., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall International, Inc., 1997.
- [6]. Kuswadi, Son., *Kendali Cerdas Teori dan Aplikasi Praktisnya*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2007.

Proceedings :

- [7]. Kennedy, J. & Eberhart, R. C., “*Particle Swarm Optimization*,” Proc. IEEE Int'l Conf. on Neural Networks, vol. IV, pp. 1942-1948, 1995.