

DESAIN KONTROLER PID ADAPTIF PADA MODEL AUTOMATIC-ANTILOCK BRAKING SYSTEM

Bagus Okto Tetuko Prasetyawan^{*)}, Aris Triwiyatno, and Wahyudi

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

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

Abstrak

Banyak kecelakaan yang terjadi berawal dari kesalahan manusia, diantaranya adalah terlambat melakukan pengereman dan kepanikan dalam menekan pedal rem. Untuk itu perlu adanya sistem yang digunakan untuk pengaman saat melakukan pengereman. Automatic Antilock Braking System adalah sebuah keamanan untuk sistem pengereman pada kendaraan. Sistem ini mengatur rem agar tidak membuat roda terkunci. Jika roda pada kendaraan terkunci maka akan terjadi slip yang diakibatkan karena perbedaan kecepatan roda dan kecepatan kendaraan. Pada penelitian ini dibuat sebuah desain kontroler pada model Automatic Antilock Braking System. Variabel yang dikontrol adalah slip, dan torsi rem sebagai variabel yang dimanipulasi. Kontroler yang didesain adalah kontroler PID Adaptif. Desain kontroler tersebut akan dilihat respon sistemnya dan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Pada simulasi kondisi jalan aspal kering, PID adaptif Automatic-Antilock Braking System dengan kecepatan 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s menghasilkan slip yang lebih mendekati set point dengan masing-masing IAE 0,0328, 0,0332, dan 0,336.

Kata kunci: Automatic-Antilock Braking System, Slip, PID Adaptif

Abstract

Most accidents occur due to human error, such as late braking and panic when we brake the vehicle. So we need a system that is used for safety when braking. Automatic Antilock Braking System is a safety braking system on the vehicle. This system controls the brakes to avoid locked wheel condition. If the locked wheels on the vehicle happen, there will be slip because of differences between wheel speed and vehicle speed. In this study, a controller design on automatic models of antilock braking system. Controlled variable is slip and brake torque as manipulated variables. The controller is designed with PID Adaptive controller. The controller design will be compared the system responses with previous research. In dry asphalt, adaptive PID Automatic-Antilock Braking System with 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s get the nearest slip with IAE 0.0328, 0.0332, and 0.336.

Keywords: Antilock Braking System, Slip, Adaptive PID

1. Pendahuluan

Kendaraan bermotor merupakan alat transportasi dan kebutuhan primer bagi masyarakat. Hal tersebut berimbas pada meningkatnya jumlah kendaraan di Indonesia. Meningkatnya jumlah kendaraan bermotor dari tahun 2010 sampai 2014 telah dipublikasikan oleh Badan Pusat Statistik [1]. Ketika perkembangan jumlah alat transportasi yang meningkat signifikan setiap tahunnya, meningkat pula angka kecelakaan setiap tahunnya. Indonesia merupakan negara yang memiliki jumlah angka kecelakaan terbanyak di Asia menurut *The Global Report on Road Safety* yang dirilis oleh WHO [2]. Data yang lebih spesifik juga telah dirilis oleh Badan Pusat Statistik tentang jumlah kecelakaan kendaraan bermotor di Indonesia sejak tahun 2010 hingga tahun 2014 [3]. Dalam data tersebut

pada tahun 2014 jumlah korban kecelakaan mencapai 95.906 orang, Serta kerugian materi sebanyak 250.021 juta rupiah. Jika membahas mengenai akar permasalahan dari angka kecelakaan tersebut, maka kembali lagi pada manusia itu sendiri. Karena menurut sumber dari Mabes Polri [4] menyebutkan bahwa kecelakaan sepanjang tahun 2012, 65,67% disebabkan oleh faktor manusia. Manusia mempunyai respon yang sedikit lambat. Manusia punya waktu untuk berpikir ketika akan melakukan pengereman [5]. Permasalahan inilah yang diambil sebagai latar belakang untuk membuat sebuah sistem pengaman pada kendaraan berupa *Automatic-Antilock Braking System*. Sistem ini bekerja untuk mempertahankan slip yang terjadi, sehingga kendaraan tetap dapat terkontrol dan jarak pengereman semakin efektif. *Automatic-Antilock Braking System* secara umum adalah sistem kontrol umpan balik

yang memodulasi tekanan rem dalam merespon perlambatan terukur dari tiap roda, untuk mencegah roda terkunci seluruhnya [6]. Dalam manufer pengereman mendadak atau *emergency Automatic-Antilock Braking System* mampu menjaga kestabilan *steer* dan jarak pengereman [7]. Kondisi panik (*emergency*) yang dialami pengemudi mengakibatkan tekanan yang berlebihan pada pedal rem. Hal inilah yang mengakibatkan slip pada roda kendaraan, slip menambah jarak pengereman dan *steer* akan sulit dikendalikan (*lost steerability*) [8]. Beberapa penelitian mengenai sistem keamanan pada pengereman telah banyak dilakukan antara lain Ahmaliansyah, R., dkk [9], dengan penelitian yang sama mengenai sistem pengereman menggunakan kontroler *fuzzy* untuk *Automatic Braking System*. Ganda., A. S., dkk [10], dengan penelitian yang sama juga menggunakan kontroler *fuzzy* untuk *Automatic Braking System* dengan *antilock* dengan fungsi keanggotaan (*membership function*) *fuzzy* dioptimasi menggunakan algoritma genetik / *genetic algorithm* (GA). Ariyadi., K. N., [11] dengan penelitian yang sama mengenai sistem pengereman otomatis menggunakan kontroler *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS). Berdasarkan penelitian sebelumnya maka pada penelitian ini akan digunakan kontroler PID Adaptif dengan menggunakan metode PID Dahlin untuk melakukan tuning parameter kontrol Proporsional, Integral, dan Derivatif.

2. Metode

2.1. Automatic-antilock braking system

Perancangan blok dinamika *Automatic-Antilock Braking System* yaitu perancangan blok dinamika gerak kendaraan, blok dinamika gerak roda.

2.1.1. Model matematika Gerak Kendaraan

Model dinamika *Antilock Braking System* adalah hasil dari hukum Newton yang diaplikasikan pada kendaraan dan roda [12]. Gaya total yang dialami kendaraan selama proses pengereman berlangsung, ekuivalen dengan percepatan kendaraan dikalikan massa total kendaraan, didefinisikan oleh persamaan (1).

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

Didefinisikan bahwa \dot{v}_v adalah perlambatan dari kendaraan (m/s^2), M_v adalah massa dari kendaraan (kg), $F_v(t)$ adalah gaya aerodinamis yang dilawan oleh mobil (N), dan $F_\theta(\theta)$ adalah gaya beban dari kemiringan dengan permukaan jalan (N) dengan kendaraan yang bergerak naik.

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

Gaya lawan angin berasal dari perkalian konstanta B_v dan kecepatan linear body kendaraan V_v (m/s). Gaya lawan

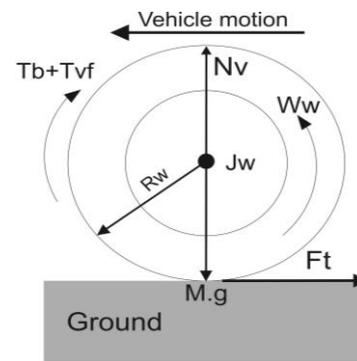
angin tercipta karena tabrakan antara angin dan kendaraan, dalam hal ini adalah mobil. $F_t(t)$ adalah gaya traksi dan $F_\theta(\theta)$ adalah gaya dari kendaraan yang merupakan hasil dari pergerakan vertikal gradien di jalan yang mengakibatkan

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

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

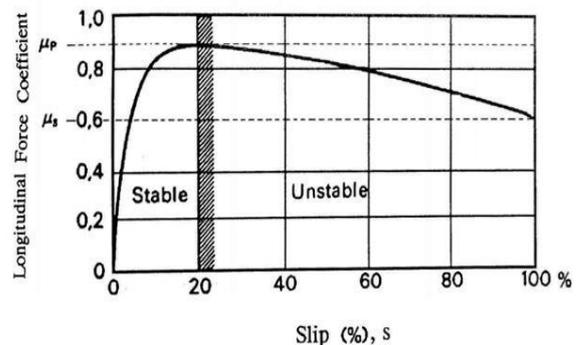
$$F_t(t) = \mu(\lambda) N_v(\theta) \quad (4)$$

$\mu(\lambda)$ adalah koefisien gesek roda dengan jalan $N_v(\theta)$ adalah gaya normal vertikal dengan pusat gravitasi (N). Gambar 1 menunjukkan gaya-gaya yang terjadi pada pergerakan roda saat pengereman.



Gambar 1. Pergerakan roda.

Besar gaya traksi dipengaruhi oleh $\mu(\lambda)$, dan $\mu(\lambda)$ berubah berdasarkan slip yang dialami oleh roda. Gambar 2. adalah grafik perubahan $\mu(\lambda)$ terhadap slip.



Gambar 2. grafik perubahan $\mu(\lambda)$ terhadap slip.

Gambar 2 menjelaskan nilai tertinggi koefisien gesek terjadi ketika nilai slip 20%, pada *Automatic-Antilock Braking System* nilai slip sebesar 20% atau 0,2 digunakan sebagai *setpoint* sistem. Model ini diasumsikan bahwa kendaraan (mobil) mempunyai 4 roda dan berat dari keberadaan didistribusikan merata disetiap roda. Gaya yang diterima masing- masing roda adalah:

$$N_v(\theta) = \frac{M_v g}{4} \cos(\theta) \quad (3)$$

Karena w_v adalah kecepatan sudut, maka dapat dirumuskan kecepatan sudut kendaraan, diperoleh dari persamaan:

$$w_v = \frac{V_v(t)}{R_w} \quad (4)$$

2.1.2. Model matematika dinamika gerak roda

Persamaan dinamik roda kendaraan diperoleh dari keseluruhan gaya torsi rotasi yang terjadi di roda, sehingga diperoleh Persamaan (5) :

$$\dot{\omega}_w(t) = \frac{1}{J_w} [-T_b(t) + F_w(t) + T_t(t)] \quad (5)$$

$\dot{\omega}_w(t)$ adalah percepatan sudut dari roda (rad/s), J_w adalah inersia rotasi dari roda (kg m), $F_w(t)$ adalah gaya dorong angin pada roda (N), $T_b(t)$ adalah torsi pengereman (Nm), $T_t(t)$ adalah torsi yang dihasilkan karena slip antara roda dan jalan (Nm). *Tire torque* yang dialami keempat roda diperoleh dari persamaan:

$$T_t(t) = R_w F_t(t) \quad (6)$$

$F_t(t)$ adalah gaya traksi (N), R_w adalah jari-jari roda (m). Pengontrolan *Automatic-Antilock Braking System* adalah menjaga nilai maksimal pada perubahan slip. Torsi pengereman dirumuskan dari persamaan:

$$T_b(t) = u T b_{ref} \quad (7)$$

u adalah gain keluaran dari kontroler, $T b_{ref}$ adalah Torsi pengereman referensi (Nm)

$$T b_{ref} = 2\mu_f N_v r_{eff} \quad (8)$$

μ_f adalah koefisien gesek pada piringan rem, $N_v(\theta)$ adalah gaya normal vertikal dengan pusat gravitasi (N). r_{eff} adalah jari-jari efektif piringan rem (m). Nilai slip diperoleh dari persamaan:

$$\lambda(t) = \frac{\omega_v(t) - \omega_w(t)}{\omega_v(t)} \quad (9)$$

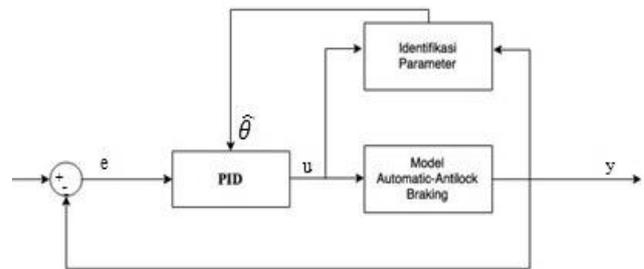
$\lambda(t)$ adalah Rasio Slip pada roda, $\omega_v(t)$ = kecepatan angular bodi kendaraan (rad/s), $\omega_w(t)$ = kecepatan angular roda kendaraan (rad/s). Tabel 1 merupakan nilai parameter pada persamaan (1) - (9).

Tabel 1. Parameter *Automatic-Antilock Braking System* [12]

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
M_v	1368	Kg	Massa bodi kendaraan
R_w	0,330	m	Jari-jari roda kendaraan
J_w	1,13	Nms 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 bumi
D_s	0,2	-	Nilai Slip yang diinginkan
μ_f	0,45	-	Koefisien gesek pada piringan rem
r_{eff}	0,15	m	Jari-jari efektif piringan rem

2.2. Perancangan kontroler PID Adaptif

Kontroler PID Adaptif yang dirancang oleh penulis merupakan kontroler yang dapat melakukan tuning parameter kontrol proporsional, integral, dan derivatif secara otomatis berdasarkan identifikasi parameter pada model *Automatic-Antilock Braking System*. Pada perancangan kontroler PID Adaptif ini digunakan metode PID Dahlin [13]. Gambar 3 merupakan blok diagram PID Adaptif pada perancangan ini.



Gambar 3. Blok diagram PID Adaptif.

2.2.1. Identifikasi Parameter dengan Recursive Least Square

Inti dari metode ini adalah bahwa kecocokan antara model dengan sistem yang akan diidentifikasi diperoleh dengan meminimumkan selisih kuadrat antara keluaran model dengan keluaran sistem yang diidentifikasi seperti pada persamaan (10).

$$J(\theta) = \sum_{i=0}^k e^2(i) = \sum_{i=0}^k [y(k) - \hat{y}(k)]^2 \quad (10)$$

Skema identifikasi dengan metode *Least Square* terdapat model identifikasi yang digunakan untuk mengestimasi parameter pada proses. Model identifikasi tersebut dinyatakan pada persamaan (11).

$$\hat{G}(Z) = \frac{\hat{B}(z^{-1})}{\hat{A}(z^{-1})} = \frac{\hat{b}_1 z^{-1} + \hat{b}_2 z^{-2} + \dots + \hat{b}_m z^{-m}}{1 + \hat{a}_1 z^{-1} + \hat{a}_2 z^{-2} + \dots + \hat{a}_n z^{-n}} \quad (11)$$

Error merupakan persamaan kesalahan prediksi, yaitu dihitung berdasarkan selisih antara keluaran proses dengan keluaran model identifikasi. Dirumuskan seperti persamaan (12).

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (12)$$

Keluaran ($y(k)$) dihitung berdasarkan perkalian antara vektor regresi dan vektor estimasi seperti pada persamaan (13).

$$y(k) = \varphi^T(k) \theta(k-1) \quad (13)$$

dengan vektor regresi

$$\varphi^T(k-1) = [-y(k-1) \dots -y(k-n) \ u(k+m-n) \dots u(k-n)] \quad (14)$$

dan vektor estimasi

$$\theta^T(k) = [a_1 \dots a_n \ b_0 \dots b_m] \quad (15)$$

Dengan menggunakan metode *Recursive Least Square*, parameter θ diestimasi dengan menggunakan persamaan (16).

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)\varepsilon(k) \quad (16)$$

$$\varepsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (17)$$

$$K(k) = \frac{C(k-1)\varphi(k)}{1+\varphi^T(k)C(k-1)\varphi(k)} \quad (18)$$

$$C(k) = C(k-1) - \frac{C(k-1)\varphi(k)\varphi^T(k)C(k-1)}{(1+\varphi^T(k)C(k-1)\varphi(k))} \quad (19)$$

2.2.2. Tuning Parameter PID dengan Metode PID Dahlin

Pada perancangan sistem ini parameter PID dapat melakukan tuning secara otomatis berdasarkan vektor estimasi [14] pada persamaan (22), (23), dan (24). Perubahan pada nilai vektor estimasi menyebabkan perubahan pada parameter PID [15]. Persamaan kontroler PID yang digunakan adalah seperti pada persamaan (20).

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (20)$$

Adapun untuk melakukan tuning tersebut digunakan persamaan

$$K_p = \frac{-(a_1+a_2)Q}{b_1} \quad (21)$$

$$T_d = \frac{T_0 a_2 Q}{K_p b_1} \quad (22)$$

$$T_i = \frac{-T_0}{\frac{1}{a_1+a_2} + 1 + \frac{T_d}{T_0}} \quad (23)$$

T_0 adalah waktu sampel, T_d adalah waktu turunan, dan T_i adalah waktu integral. Variabel Q pada persamaan (21) dan (22) didefinisikan

$$Q = 1 - e^{-\frac{T_0}{B}} \quad (25)$$

Parameter a_1 , a_2 , dan b_1 merupakan nilai dari vektor estimasi pada persamaan (20) hasil estimasi pada model *Automatic-Antilock Braking System*.

3. Hasil dan Analisa

Pengujian dilakukan dengan simulasi Matlab kondisi jalan aspal kering dan basah, serta beberapa variasi kecepatan. Pengujian bertujuan untuk mengetahui performa kontroler

yang telah dirancang. Pengujian dilakukan dengan membandingkan dengan hasil dari penelitian sebelumnya *Genetic-fuzzy Automatic-Antilock Braking System* [7]. Hasil-hasil yang diuji yaitu perbandingan slip, perbandingan kecepatan sudut, dan jarak berhenti.

3.1. Simulasi Jalan Kondisi Aspal Kering

Pada bagian ini dituliskan hasil simulasi dan analisis kondisi aspal kering berdasarkan variasi kecepatan yaitu kecepatan 11m/s, 15m/s, dan 19m/s. Hasil simulasi disajikan dalam bentuk gambar grafik dan tabel. Gambar disajikan untuk melihat hasil simulasi pada kecepatan 11 m/s. Tabel digunakan untuk melihat hasil simulasi pada kecepatan 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s.

3.1.1. Perbandingan Slip

Perbandingan Slip dengan kecepatan 11 m/s pada aspal kering ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. Perbandingan slip kecepatan 11 m/s.

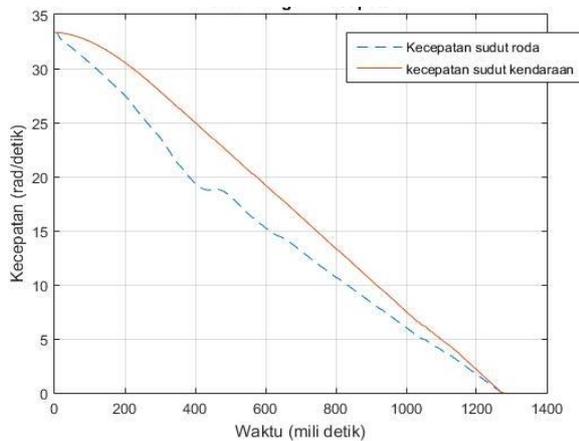
Gambar 4 menunjukkan bahwa PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* merupakan yang paling mendekati *setpoint* (0,2) jika dibandingkan dengan *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System*. Pada PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System*, slip saat terakhir naik menjadi 1, hal ini disebabkan kendaraan sudah dalam keadaan berhenti. Pada saat yang sama slip *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* belum menunjukkan nilai 1, hal tersebut menunjukkan bahwa *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* belum berhenti. Berdasarkan nilai *error* slip yang didapatkan dapat dihitung Integral Absolute Error (IAE). IAE untuk PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* pada kondisi ini memiliki nilai 0,0328, sedangkan *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* memiliki nilai IAE sebesar 0,09878. IAE pada variasi kecepatan lain disajikan dalam Tabel 2. Tabel 2 menunjukkan bahwa PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* memiliki nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* pada kecepatan 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s

Tabel 2. Nilai IAE pada simulasi aspal kering

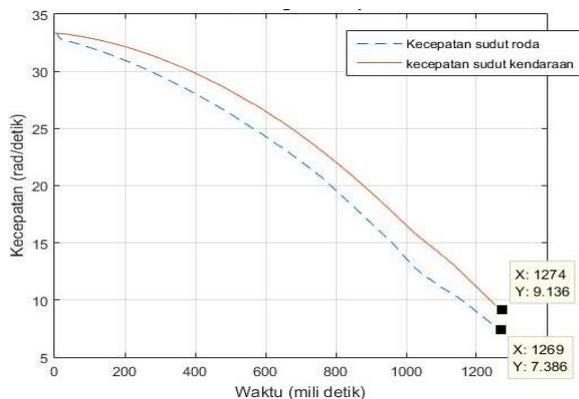
Kecepatan	IAE PID Adaptif Automatic-Antilock Braking System	IAE Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System
11 m/s	0,0328	0,09878
15 m/s	0,0332	0,09684
19 m/s	0,0335	0,1442

3.1.2. Perbandingan Kecepatan Sudut

Pengujian kecepatan sudut kendaraan dan kecepatan sudut roda ini digunakan untuk melihat nilai kecepatan sudut terhadap waktu. Hal tersebut perlu diperhatikan karena perbedaan kecepatan sudut roda dan kecepatan sudut kendaraan akan menimbulkan slip. Gambar 5 dan Gambar 6 merupakan grafik kecepatan sudut kendaraan dan roda PID Adaptif Automatic-Antilock Braking System dan Genetic-fuzzy Automatic-Antilock Braking System.



Gambar 5. Perbandingan kecepatan sudut kendaraan dan kecepatan sudut roda PID Adaptif Automatic-Antilock Braking System.



Gambar 6. Perbandingan kecepatan sudut kendaraan dan kecepatan sudut roda pada Genetic-fuzzy Automatic-Antilock Braking System.

Pada Gambar 5 dan Gambar 6 merupakan perbandingan kecepatan sudut kendaraan dan kecepatan sudut roda pada simulasi menggunakan kecepatan saat pengereman sebesar

11 m/s. PID Adaptif Automatic-Antilock Braking System pada waktu 1,264 detik nilai kecepatan sudut kendaraan dan kecepatan sudut roda telah menunjukkan angka 0 yang berarti bahwa sistem telah berhenti. Pada Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System belum menunjukkan angka 0 pada waktu yang sama, hal tersebut menunjukkan bahwa sistem belum berhenti. Hasil simulasi perbandingan kecepatan sudut dengan variasi kecepatan saat pengereman yaitu 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s disajikan pada Tabel 3.

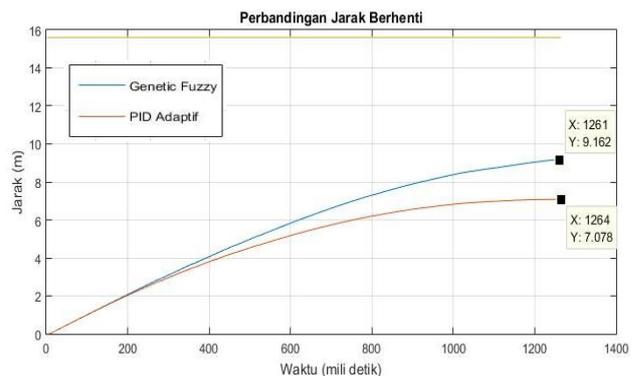
Tabel 3. Perbandingan kecepatan sudut simulasi aspal kering.

Kecepatan	Waktu (detik)	Kondisi PID Adaptif Automatic-Antilock Braking System	Kondisi Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System
11 m/s	1,264	$\omega_v = 0$ rad/s $\omega_w = 0$ rad/s	$\omega_v = 9,136$ rad/s $\omega_w = 7,386$ rad/s
15 m/s	1,739	$\omega_v = 0$ rad/s $\omega_w = 0$ rad/s	$\omega_v = 6,481$ rad/s $\omega_w = 5,205$ rad/s
19 m/s	2,556	$\omega_v = 0$ rad/s $\omega_w = 0$ rad/s	$\omega_v = 7,46$ rad/s $\omega_w = 6,487$ rad/s

Berdasarkan Tabel 3 dapat dilihat bahwa pada waktu yang sama PID Adaptif Automatic-Antilock Braking System telah berhenti atau tidak menyisakan kecepatan sudut kendaraan dan kecepatan sudut roda.

3.1.3. Jarak yang Ditempuh saat Pengereman

Gambar 7 merupakan perbandingan jarak berhenti PID Adaptif Automatic-Antilock Braking System dan Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System.



Gambar 7. Perbandingan jarak berhenti dengan kecepatan 11 m/s.

Pada Gambar 7 terlihat bahwa PID Adaptif Automatic-Antilock Braking System memiliki jarak berhenti yang lebih pendek dengan jarak berhentinya yaitu 7,078 meter, sedangkan Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System memiliki jarak berhenti yaitu 9,162 meter. Tabel 4 menyajikan hasil jarak berhenti simulasi aspal kering pada variasi kecepatan 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s saat pengereman.

Tabel 4. Nilai Jarak berhenti pada simulasi aspal kering.

Kecepatan	Jarak berhenti PID Adaptif Automatic-Antilock Braking System (m)	Jarak berhenti Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System (m)
11 m/s	7,078	9,162
15 m/s	12,61	15,4
19 m/s	19,79	23,32

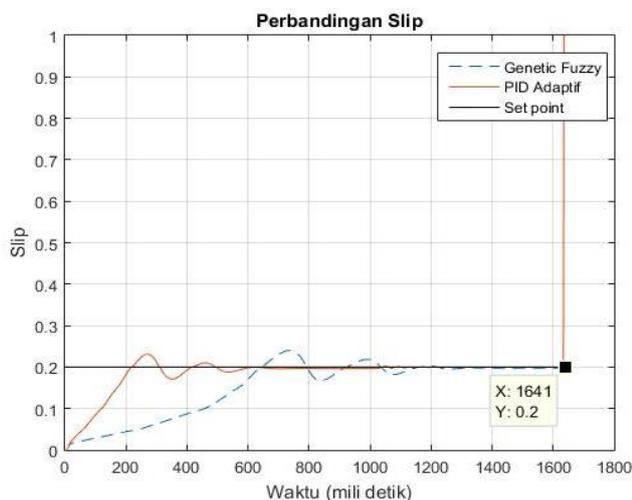
Tabel 4 menunjukkan bahwa PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* memiliki jarak berhenti yang lebih pendek pada simulasi aspal kering.

3.2. Simulasi Jalan Kondisi Aspal Basah

Pada bagian ini dituliskan hasil simulasi dan analisis kondisi aspal basah berdasarkan variasi kecepatan yaitu kecepatan 11m/s, 15m/s, dan 19m/s. Hasil simulasi disajikan dalam bentuk gambar grafik dan tabel. Gambar disajikan untuk melihat hasil simulasi pada kecepatan 11 m/s. Tabel digunakan untuk melihat hasil simulasi pada kecepatan 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s

3.2.1. Perbandingan Slip

Perbandingan Slip dengan kecepatan 11 m/s pada aspal basah ditunjukkan Gambar 8.



Gambar 8. Perbandingan slip.

Gambar 8 menunjukkan bahwa PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* merupakan yang paling mendekati *setpoint* (0,2) jika dibandingkan dengan *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System*. Pada PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System*, slip saat terakhir naik menjadi 1, hal ini disebabkan kendaraan sudah dalam keadaan berhenti. Pada saat yang sama slip *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* belum menunjukkan nilai 1, hal tersebut menunjukkan bahwa *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* belum

berhenti. Berdasarkan nilai *error slip* yang didapatkan dapat dihitung IAE sesuai persamaan (2.42). IAE untuk PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* pada kondisi ini memiliki nilai 0,02864, sedangkan *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* memiliki nilai IAE sebesar 0,08265. IAE pada variasi kecepatan lain disajikan dalam Tabel 5.

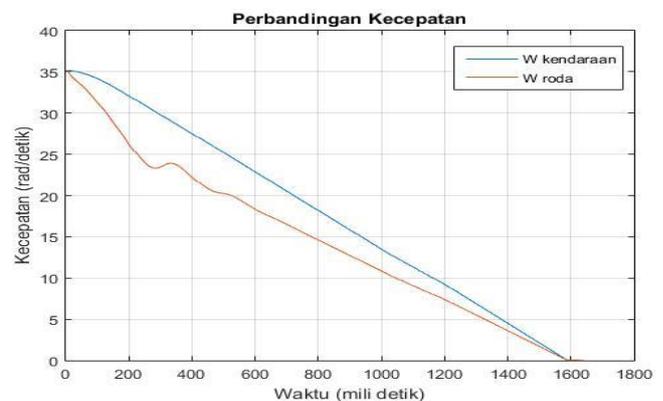
Tabel 5. Nilai IAE pada simulasi aspal basah.

Kecepatan	IAE PID Adaptif Automatic-Antilock Braking System	IAE Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System
11 m/s	0,02864	0,08265
15 m/s	0,0288	0,0894
19 m/s	0,261	0,1712

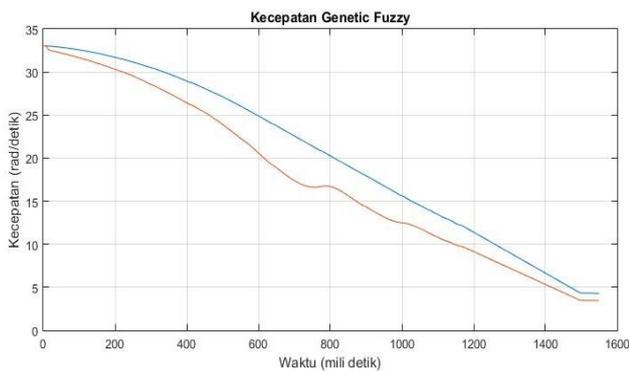
Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai IAE PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* pada kecepatan pengereman 11 m/s dan 15 m/s kondisi aspal basah memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai IAE *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System*. Pada kecepatan pengereman 19 m/s nilai IAE *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* yang lebih kecil.

3.2.2. Perbandingan Kecepatan sudut

Gambar 9 dan Gambar 10 merupakan grafik kecepatan sudut kendaraan dan roda PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* dan *Genetic-fuzzy Automatic-Antilock Braking System*.



Gambar 9. Perbandingan kecepatan PID Adaptif.



Gambar 10. Perbandingan kecepatan Genetic Fuzzy.

Pada Gambar 9 dan Gambar 10 merupakan perbandingan kecepatan sudut kendaraan dan kecepatan sudut roda pada simulasi menggunakan kecepatan saat pengereman sebesar 11 m/s. PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* pada waktu 1,549 detik nilai kecepatan sudut kendaraan dan kecepatan sudut roda telah menunjukkan angka 0. Hasil simulasi perbandingan kecepatan sudut dengan variasi kecepatan saat pengereman yaitu 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s disajikan pada Tabel 6.

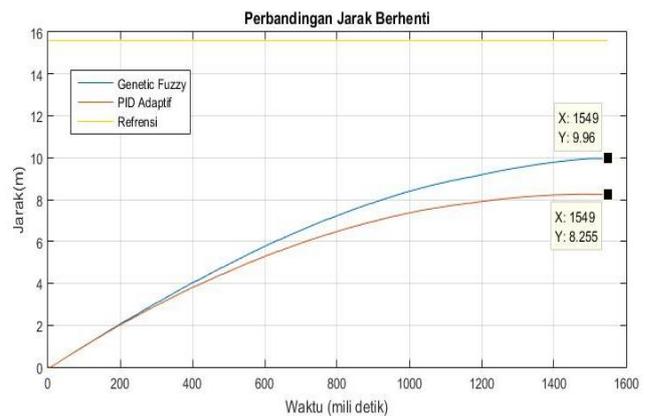
Tabel 6. Perbandingan kecepatan sudut simulasi aspal kering.

Kecepatan	Waktu (detik)	Kondisi PID Adaptif <i>Automatic-Antilock Braking System</i>	Kondisi <i>Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System</i>
11 m/s	1,549	$\omega_v = 0$ rad/s $\omega_w = 0$ rad/s	$\omega_v = 4,271$ rad/s $\omega_w = 3,427$ rad/s
15 m/s	2,086	$\omega_v = 0$ rad/s $\omega_w = 0$ rad/s	$\omega_v = 3,364$ rad/s $\omega_w = 3,983$ rad/s
19 m/s	2,900	$\omega_v = 9,4$ rad/s $\omega_w = 0$ rad/s	$\omega_v = 0$ rad/s $\omega_w = 0$ rad/s

Berdasarkan Tabel 6 dapat dilihat bahwa pada kecepatan saat pengereman 11 m/s dan 15 m/s ketika waktu yang sama PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* telah berhenti atau tidak menyisakan kecepatan sudut kendaraan dan kecepatan sudut roda. Pada kecepatan 19 m/s ketika waktu yang sama *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* telah berhenti, sedangkan PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* menyisakan kecepatan kendaraan.

3.2.3. Jarak yang ditempuh saat pengereman

Gambar 11 menunjukkan perbandingan jarak berhenti yang dihasilkan pada aspal basah dengan kecepatan 11 m/s.



Gambar 11. Perbandingan jarak berhenti

Pada Gambar 11 terlihat bahwa PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* memiliki jarak berhenti yang lebih pendek dengan jarak berhentinya yaitu 8,255 meter, sedangkan *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* memiliki jarak berhenti yaitu 9,96 meter. Tabel 7 menyajikan hasil jarak berhenti simulasi aspal kering pada variasi kecepatan 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s saat pengereman.

Tabel 7. Jarak berhenti pada simulasi aspal basah.

Kecepatan	Jarak berhenti PID Adaptif <i>Automatic-Antilock Braking System</i> (m)	Jarak berhenti <i>Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System</i> (m)
11 m/s	8,255	9,96
15 m/s	17,36	15,18
19 m/s	25,39	27

Tabel 7 menunjukkan bahwa PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* memiliki jarak berhenti yang lebih pendek pada simulasi aspal kering.

4. Kesimpulan

Pada simulasi kondisi jalan aspal kering, PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* dengan kecepatan 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s menghasilkan slip yang lebih mendekati refrensi. Pada simulasi kondisi jalan aspal basah, PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* dengan kecepatan 11 m/s dan 15 m/s, menghasilkan slip yang lebih mendekati refrensi, sedangkan pada simulasi aspal basah dengan kecepatan 19 m/s *Genetic-fuzzy Automatic-Antilock Braking System* menghasilkan slip yang lebih mendekati nilai refrensi. Pengujian perbandingan kecepatan sudut kendaraan dan kecepatan sudut roda pada aspal kering pada waktu yang sama pada kecepatan saat pengereman 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* telah berhenti, sedangkan *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* masih menyisakan kecepatan. Pengujian perbandingan kecepatan sudut kendaraan dan kecepatan sudut roda pada aspal basah pada waktu yang sama pada

kecepatan saat pengereman 11 m/s, 15 m/s PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* telah berhenti, sedangkan pada kecepatan 19 m/s pada waktu yang sama *Genetic-Fuzzy Automatic-Antilock Braking System* lebih dulu berhenti Pada simulasi aspal kering dan aspal basah dengan kecepatan 11 m/s, 15 m/s, dan 19 m/s PID Adaptif *Automatic-Antilock Braking System* memiliki jarak berhenti lebih pendek dibandingkan *Genetic-fuzzy Automatic-Antilock Braking System*.

Referensi

- [1]. Badan Pusat Statistik, "Perkembangan Jumlah Kendaraan Bermotor di Indonesia." http://www.bps.go.id/tab_sub/view.php?tabel=1&id_subyek=17¬ab=12, diakses 30 Agustus 2016.
- [2]. http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/ diakses 30 Agustus 2016.
- [3]. Badan Pusat Statistik, "Jumlah Kecelakaan kendaraan Bermotor di Indonesia." http://www.bps.go.id/tab_sub/view.php?tabel=1&id_subyek=17¬ab=12, diakses 30 Agustus 2016.
- [4]. --, "Faktor penyebab Kecelakaan tahun 2012," <http://jalanberkarisma.wordpress.com/>, Juli 2016.
- [5]. --, http://www.racemath.info/motionandenergy/stop_distance.htm, copyright dari Cranfield University, Juli 2016.
- [6]. C. E. Beal, "Application of model Predictive control to Vehicle Dynamics for Active Safety and Stability," *Dr. Desertation Stanford Univ.*, 2011.
- [7]. Y. D. K., "Model Based Wheel Slip Control via Constrained Optimal Algorithm," *Master Thesis, Sch. Electr. Comput. Eng. RMIT Univ.*, 2006.
- [8]. M. Oudghiri, M. Chadli, and A. El Hajjaji, "Robust Fuzzy Sliding Mode Control for Antilock Braking System," *Int. J. Sci. Tech. Autom. Control*, vol. 1, no. June 2007, pp. 13–28, 2007.
- [9]. Ahmaliansyah, R., "Desain Kontroler Fuzzy pada Model Automatic-Braking System dengan Antilock", Penelitian S-1, Universitas Diponegoro, 2013.
- [10]. S. G., Andreas, "Desain Kontroler Genetic-Fuzzy Pada Model Automatic-Antilock Braking System", Laporan Tugas Akhir-S1, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Indonesia, 2015
- [11]. A. N., Kurniawan, "Desain Sistem Kontrol Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) Pada Model Automatic-Antilock Braking System". Laporan Tugas Akhir-S1, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, 2015.
- [12]. Layne, J. R., K. M. Passino, and S. Yurkovich, "Fuzzy learning control for antiskid braking system", *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol.1, pp. 122-129, June 1993
- [13]. Bobal, V. dkk. 2005, *Digital Self-tuning Controllers*, Czech Republic, University of Pardubice, Penerbit Springer.
- [14]. E. Engineering, "IDENTIFICATION AND DAHLIN ' S CONTROL FOR NONLINEAR DISCRETE TIME OUTPUT FEEDBACK SYSTEMS," vol. 57, no. 6, pp. 329–337, 2006.
- [15]. Åstrom, Karl Johan., Bjorn Wittenmark, "Adaptive Control, 2nd ed", USA: Addison – Wesley Publishing Company, Inc., 1995.