

Pemodelan Simulasi Berbasis Fuzzy Controller Terhadap Perilaku Yaw Rate dengan Pengendalian Sudut Steer Roda Belakang (4WS)

I D.G Ary Subagia

Dosen Fakultas Teknik , Jurusan Teknik Mesin - Universitas Udayana

Wajan Berata

Dosen Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin – Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Abstrak

Sistem kemudi 4WS (*Four Wheel Steering System*) adalah pengembangan dari sistem chassis dengan tujuan untuk meningkatkan kualitas pengendalian dan peningkatan keamanan, kenyamanan, dan stabilitas kendaraan dengan meningkatnya kecepatan kendaran. Yaw-rate yang timbul pada saat kendaraan bergerak karena perilaku dari karakteristik ban memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap hilangnya kualitas pengendalian dan kestabilan kendaraan. Sebagai upaya pengendalian dari perilaku yang terjadi pada kendaraan akibat yaw-rate pada sistem chassis diberikan pengendalian berupa gerakan roda belakang yang mampu bergerak belok berlawanan ataupun searah dengan gerak belok roda depan dengan mempergunakan metode pengendalian sudut side-slip dan menerapkan actuator penggerak motor DC sehingga kendali sudut yaw yang terjadi dapat selalu dikontrol agar mendekati yaw-rate netral dari kendaraan. Aplikasi metode tersebut dilakukan dengan pemodelan simulasi mempergunakan fuzzy controller dari Mat-Lab 6.5. Sebagai hasil dari pemodelan simulasi didapatkan bahwa dengan memberikan sudut belok pada roda belakang memberikan pengaruh yang cukup signifikan dalam mengendalikan perilaku yaw-rate yang terjadi sehingga diperoleh kestabilan kendaraan yang baik.

Kata kunci: stabilitas kendaraan, sudut belok roda depan, sudut belok roda belakang, *fuzzy logic*, *yawing*.

Abstract

Four Wheels Steering System drives (4ws) are increase ones quality of chassis system as propose improve the handling quality and increase the safety, comfortable, and stability control at the highest of vehicle speed. At the time of vehicle move yaw-rate will arise out because caused by tire characteristic and it is give effect to loss of handling quality and stability of vehicle. As control the effort of vehicle performance cause by yaw-rate effect on chassis system that it is use turn the rear wheel of vehicle, which capable to make an opposite direction or same direction with front wheel steering. The controlling of rear wheel turn on 4WS system is used side-slip control method and DC motor of position angle actuator so real yaw-rate will always neutral position of yaw. In this research is applicative the simulation modeling that conducted by utilize the fuzzy controller from Mat-Lab 6.5. As the result of the modeling simulation turn direction rear wheel give a most advance and effect to vehicle in handling the stability and yaw rate effort, so vehicle always stable when turn effort.

Keywords: vehicle stability, front wheel angle, rear wheel angle, fuzzy logic, yawing.

1. Pendahuluan

Stabilitas menjadi kebutuhan pokok dalam pengendalian kendaraan. Bertitik tolak dari fenomena dasar dan fenomena modern yang berkembang, Sutantra 1984 menyatakan bahwa terdapat hubungan erat antara manusia – kendaraan dan lingkungan. Berkaitan dengan hal tersebut, terdapat dua permasalahan pokok: pertama, memelihara agar kendaraan tetap berada pada kedudukan atau lintasan geraknya. Kedua, kestabilan arah

Catatan : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Februari 2005. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 7 Nomor 1 April 2005.

gerak kendaraan terhadap pengaruh dari dalam maupun dari luar (parameter disain dan parameter gerak). Dalam dinamika kendaraan terkait dengan fenomena di atas, gerak belok menjadi gerakan yang paling kritis, hal ini disebabkan karena pada kondisi kendaraan berbelok, kestabilan kendaraan menjadi berkurang, disebabkan oleh adanya perilaku skid dari ban, baik sebagian maupun keseluruhan karena tidak mampu menahan gaya sentrifugal. Disamping itu pula pada kondisi berbelok di pusat bodi kendaraan terjadi penyim-

pangan arah gaya akibat gaya-sentrifugal dan momen inersia bodi yang mengakibatkan terjadinya momen yawing. Momen yawing yang terjadi mengakibatkan kendaraan kehilangan kestabilan dan terkadang sulit dikendalikan (*Confusing phenomena*). Berkaitan dengan perilaku kendaraan tersebut di atas, untuk dapat mengendalikan perilaku yaw yang terjadi disamping telah dilakukan dengan pengendalian mempergunakan kontrol traksi, pengendalian sistem pengereman (semi-ABS maupun Multi-ABS), dilakukan pula pengendalian dengan mempergunakan steering aktif, yaitu menggerakkan roda belakang untuk dapat bergerak belok baik searah maupun berlawanan arah dengan arah belok dari roda depan. Kemampuan belok dari roda belakang adalah ditentukan oleh faktor kecepatan, dimana pada kecepatan rendah sudut belok roda belakang (rear wheel angle) berlawanan arah dengan roda depan, sebaliknya pada kecepatan tinggi sudut belok roda belakang searah dengan roda depan.

Tujuan pengendalian sudut belok roda belakang adalah untuk mengendalikan perilaku yaw-rate yang terjadi pada saat kendaraan berbelok, sehingga kendaraan tetap stabil pada lintasan beloknya.

Pengendalian dilakukan dengan mempergunakan pemodelan simulasi berbasis fuzzy-controller dengan program komputer MatLab, dengan mengaplikasikan penggerak model aktuator menggunakan motor DC kendali posisi.

Pengembangan teknologi sistem kemudi 4WS telah banyak dilakukan, diantaranya dilakukan oleh; Kihong Park, AVEC (2001) yang mengembangkan konsep pengendalian dengan parameter yaw-rate dan sudut side-slip sebagai parameter pengendali stabilitas kendaraan. Penelitian menunjukkan bahwa yaw-rate dan side-slip angle merupakan parameter penting dalam pengendalian stabilitas arah kendaraan.

Motok Shino [2] dan kawan dari University of Tokyo, FISITA (2002) telah mengembangkan konsep pengendalian stabilitas arah kendaraan terintegrasi dengan *Direct Yaw Moment Control* (DYC), dan sudut belok roda depan dan belakang sebagai parameter pengendali.

T. Kohata, M.Abe, N. Ukai 1992, penelitiannya berjudul "*Electronic Control Four Wheel Steering System*", Karakteristik gerak belok roda belakang dinyatakan bahwa sudut belok, kecepatan belok dan kecepatan kendaraan merupakan parameter pokok.

A. Setiawan dan Sutantra (1989) merancang system kemudi 4 roda dengan penggerak murni mekanis yang diaplikasikan pada kendaraan Charade CX 1988. Hasil yang didapat adalah belokan roda belakang sebesar 0.30 dari belokan

roda depan. Karakteristik sistem menunjukkan arah belok roda belakang pada kecepatan tinggi searah roda depan dan pada kecepatan rendah berlawanan arah dengan roda depan. Disamping itu, pada kecepatan rendah radius belok yang dicapai lebih pendek dan stabilitas arah kendaraan meningkat pada saat kecepatan tinggi.

Wahyu Dwiono dan Sutantra (1992) mengembangkan system kemudi 4WS penggerak *Electronik-Mekanis* dengan link Corriolis pada Fiat UNO-70 SL. Dari studi ini didapat gerak belok roda belakang (δ_r) dipengaruhi oleh kecepatan dan sudut belok roda depan (δ_f).

Sutantra dan kawan-kawan mengembangkan sistim kemudi 4WS dengan multi kontrol parameter untuk meningkatkan kemampuan: ketajaman belok, stabilitas arah belok pada kecepatan tinggi dan mempermudah gerakan parker, dengan judul "Rancang Bangun Sistem Kemudi 4 Roda (4WS) Multi Parameter untuk Meningkatkan Stabilitas, Kemampuan Parkir dan Belok Kendaraan". Hasil penelitian menunjukkan bahwa kebutuhan sudut belok roda belakang merupakan fungsi kecepatan dan sudut belok roda depan (δ_f).

Yunarko T (1999) dalam tesis "Pengaruh parameter desain terhadap kebutuhan sudut belok roda belakang pada sistem kemudi empat roda untuk kecepatan tinggi" menyimpulkan sudut belok roda belakang (δ_r) besarnya tergantung pada sudut belok roda depan (δ_f) dan parameter dinamik ban (α_f , α_r , δ_f , F , R_{nyata}), yang mengasikkan sudut belok roda belakang dengan ban radial-ply lebih kecil dibandingkan dengan sudut belok roda belakang dengan ban bias-ply.

Sutantra, Yusuf Kaelani, dalam pengendalian sistem 4 roda (4WS) mengembangkan 4 metode control dinamik yang meliputi; *Metode sudut berimbang*, *Metode tanpa side slip*, *Metode radius Ackerman*, dan *Metode side-slip terkendali*. Dari hasil pengendalian didapatkan metode side-slip terkendali merupakan metode yang paling efektif untuk pengendalian system 4WS, yang dirumuskan sebagai berikut:

Untuk δ_r berlawanan arah δ_f :

$$|\alpha_r| \leq \delta_r \leq \left| 90^\circ - \alpha_r - \arctan \left[\frac{a}{b} \tan(90^\circ - \delta_f + \alpha_f) \right] \right|$$

Untuk δ_r searah dengan δ_f :

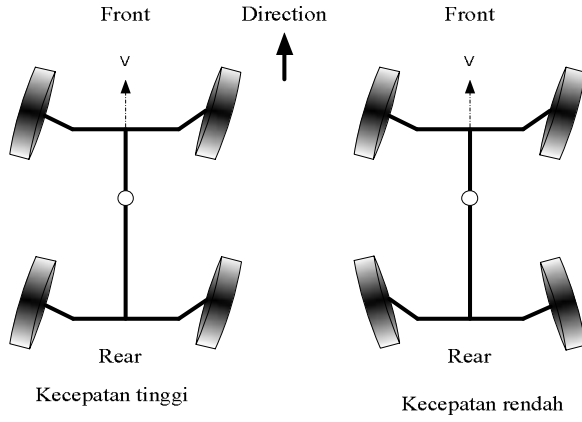
$$\left| \arctan \left[\frac{a}{b} \tan(90^\circ - \delta_f + \alpha_f) \right] + \alpha_r - 90^\circ \right| \leq \delta_r \leq |\alpha_r|$$

2. Model dan Matematika Kendaraan

2.1 Model Kendaraan

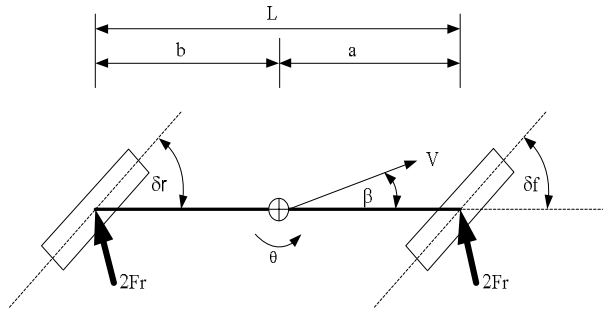
Peningkatan kualitas kendali kendaraan dengan sistim 4WS dapat dilakukan, baik secara

mekanis, maupun secara elektrik. Mekanisme gerak roda depan dan roda belakang pada kecepatan rendah dan kecepatan tinggi ditunjukkan seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Skematik Sudut Belok Roda Depan dan Roda Belakang pada Kecepatan Rendah dan Tinggi.

Pemodelan kendaraan dalam simulasi yang dilakukan adalah mempergunakan model sepeda (dua derajat kebebasan) seperti gambar 2. Analisa model dilakukan dengan mengasumsikan model adalah rigid bodi, dan meniadakan perilaku *pitching*, *rolling*, dinamik suspensi dan aerodinamik. Disamping itu pula model hanya dipengaruhi oleh gaya-gaya yang bekerja pada ban depan (F_f) dan ban belakang (F_r).



Gambar 2. Skematik Model 4WS

2.2 Matematika Model Kendaraan

Berdasarkan pada gambar 2 ditunjukkan persamaan gerak sistem sebagai berikut:

$$mV(\theta + \beta) = 2F_r + 2F_f \quad (1)$$

$$I_z \dot{\theta} = 2F_f \cdot a - 2F_r \cdot b \quad (2)$$

dimana ;

$$F_f = -C_f \left(\beta + \frac{l_f}{V} \theta - \delta_f \right)$$

$$F_r = -C_r \left(\beta - \frac{l_r}{V} \theta - \delta_r \right)$$

Pada model skala penuh (model dengan empat roda) persamaan gerak yang terjadi ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut :

Lateral motion

$$mV(\theta + \beta) = F_{rl} + F_{rr} + F_{fl} + F_{fr} \quad (3)$$

Yaw motion ;

$$I_z \dot{\theta} = I_f (F_{yfl} + F_{yfr}) - I_r (F_{yrl} + F_{yrr}) + M \quad (4)$$

Dimana;

$$M = \frac{d}{2} (F_{xrl} - F_{xrr})$$

Disamping gaya – gaya yang bekerja perilaku belok kendaraan juga dipengaruhi oleh beberapa parameter disain dan parameter dinamik yang ditunjukkan dalam persamaan sebagai berikut;

$$\text{Kekakuan ban; } C_\alpha = \frac{\partial F_y}{\partial \alpha} \quad (5)$$

Sudut slip ban untuk jenis ban:

Ban bias play baru dan gundul

$$\alpha_{bg} = \frac{C_{bb} \cdot C_{bp} \cdot C_{bx}}{C_{bg} \cdot C_{bs} \cdot C_{bo}} [0,052817(F_{y\alpha})^{0,90635} - 0,004633(F_z)] \quad (6)$$

$$\alpha_{bg} = \frac{C_{bb} \cdot C_{bp}}{C_{bg} \cdot C_{bs}} [0,052817(F_{y\alpha})^{0,90635} - 0,004633(F_z)] \quad (7)$$

Ban radial ply baru dan gundul:

$$\alpha_{rg} = \frac{C_{rb} \cdot C_{rp} \cdot C_{rx}}{C_{rg} \cdot C_{rs} \cdot C_{ro}} [0,087935(F_{y\alpha})^{0,79008} - 0,005277(F_z)] \quad (8)$$

$$\alpha_{rg} = \frac{C_{rb} \cdot C_{rp}}{C_{rg} \cdot C_{rs}} [0,087935(F_{y\alpha})^{0,79008} - 0,005277(F_z)] \quad (9)$$

dimana;

$$C_{bp} = 26.4 + 4.32(P) - 0.0674(P)^2$$

$$C_{bs} = 26.4 + 4.32(PS) - 0.0674(PS)^2$$

$$C_{rp} = 33.5 + 5.30(P) - 0.0916(P)^2$$

$$C_{rs} = 33.5 + 5.30(PS) - 0.0916(PS)^2$$

$$C_{bb} = 0.003650(F_{yi})^{1.194080}$$

$$C_{bg} = 0.003085(F_{yi})^{1.199158}$$

$$C_{rb} = 0.00301003(F_{yi})^{1.207861}$$

$$C_{rg} = 0.0023636(F_{yi})^{1.22203}$$

$$C_{rx} = \left[\frac{F_{yi} + 0.107927(F_{xi})}{161.1398} \right]^{0.474998}$$

$$C_{ro} = \left[\frac{F_{yi} + 0.107927(F_{xi})}{161.1398} \right]^{0.474998}$$

Pada kondisi dimana $F_z = 0$, sehingga sudut slip roda depan dan roda belakang ditunjukkan sebagai berikut:

$$\alpha_f = \frac{\alpha_{f2} + \alpha_{f3}}{2} \quad (10)$$

$$\alpha_r = \frac{\alpha_{r1} + \alpha_{r4}}{2} \quad (11)$$

Centrifugal force.

$$F_{cgy} = \frac{W_s}{g} \cdot A_{cy}, \quad F_{cgx} = \frac{W_s}{g} \cdot A_{cx} \quad (12)$$

Yaw Rate netral: $\dot{\theta}_{netral} = \frac{V}{L}(\dot{\delta}_f - \dot{\alpha}_f - \dot{\alpha}_r) \cdot 57,29$ (13)

Yaw Rate Real:

$\dot{\theta}_{act} = \frac{V \cdot R_n}{(a+b) \cdot 57,92} = \dot{\theta}_a + \frac{V \cdot (\alpha_f - \alpha_r)}{(a+b) \cdot 57,92}$ (14)

Radius belok :

$R_{netral} = \frac{(a+b)}{\delta_f - \alpha_f - \alpha_r} \cdot 57,29 = R_{ack}$ (15)

Radius belok nyata 4WS:

$R_{n-4} = \frac{(a+b)}{\delta_f + \delta_r - \alpha_f + \alpha_r} \cdot 57,29$ (16)

Sudut steer arah berlawanan

$\delta_r \leq \{90^\circ - \alpha_r - \arctan[\frac{a}{b} \tan(90^\circ - \delta_f + \alpha_f)]\}$ (17)

Sudut steer roda searah

$\delta_r \geq \{\arctan[\frac{a}{b} \tan(90^\circ - \delta_f + \alpha_f)] + \alpha_r - 90^\circ\}$ (18)

2.3 Karakteristik Motor DC Kendali Posisi

Karakteristik motor DC secara natural adalah ditentukan oleh hubungan antara torsi (T_m) dan arus (I_m). Hubungan ini ditunjukkan sebagai persamaan matematik sebagai berikut:

$T_m = K_t I_m$ (19)

$E_m = K_v \omega_m$ (20)

Karakteristik torsi yang dihasilkan dari motor elektrik dengan input tegangan dapat diekspresikan dalam persamaan sebagai berikut:

$T_m(s) = \frac{(K_t/R_m)}{1 + (L_m/R_m)s} \cdot U_m$ (21)

dimana: T_m menyatakan torsi motor, K_t = konstanta koefisien torsi motor, R_m = resistance motor, L_m adalah inductance, u_m adalah input tegangan.

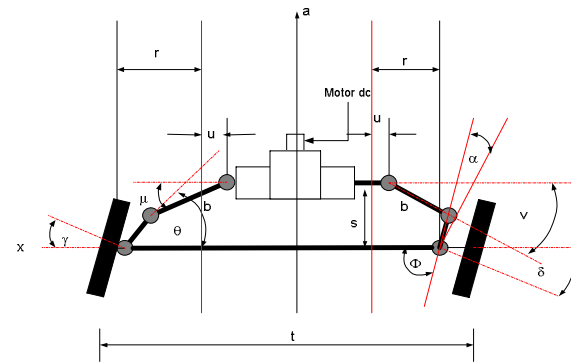
Transfer-function dari motor DC kendali posisi ditunjukkan sebagai berikut:

$\theta = \frac{\frac{c}{h} \theta_d - \frac{1}{(GKh/R_o R_s)} T_c}{\frac{J}{(GKh/R_o R_s)} D^2 + \frac{B + \frac{K^2}{(R_o R_s)}}{(GKh/R_o R_s)} D + 1}$ (22)

2.4 Model Aktuator

Model Aktuator sistem kemudi 4WS sebagai penggerak roda belakang mempergunakan mekanisme rack and pinion (gambar 3), yang digerakkan dengan motor DC kendali sudut (posisi). Dari posisi mekanisme dari rack and pinion diperoleh harga

sudut belok yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut;



Gambar 3. Kinematik Gerak Roda Belakang pada Sistem 4ws dengan Motor DC Kendali Sudut

Pada posisi sebelah kiri ;

$a \cos \theta + b \cos \mu = r + u$ (23)

$a \sin \theta = b \sin \mu = s$

Pada posisi sebelah kanan

$a \cos \phi + b \cos v = r - u$ (24)

$a \sin \phi = b \sin v = s$

dimana ; μ = sudut tie rod.

Dengan mengeliminasi μ pada persamaan diatas, maka didapatkan untuk kedua sisi dalam bentuk persegi adalah;

$b^2 = (r + u - a \cos \theta)^2 + (s - a \sin \theta)^2$

Maka persamaan diatas menjadi;

$P \cos \theta + Q \sin \theta + R = 0$

dimana;

$P = 2a(u + r)$

$Q = 2as$

$R = b^2 - a^2 - r^2 - s^2 - u^2 - 2ru$

Besar sudut belok dari roda (γ) dan (ω) dapat dihitung dengan persamaan:

$\tan \gamma = \frac{q - y}{x - p/2}$ $\tan \delta = \frac{q - y}{x + p/2}$

dimana;

$(x - p/2) \tan \gamma = (x - p/2) \tan \delta$

Maka untuk harga (x) menjadi;

$x = \frac{P}{2} \left(\frac{\tan \gamma + \tan \delta}{\tan \gamma - \tan \delta} \right)$ (25)

Kemudian dengan mensubstitusi persamaan harga (x) kepersamaan harga $\tan \gamma$, dan $\tan \delta$ maka didapat harga (y) menjadi ;

$y = \frac{P}{2} \left(\frac{\tan \gamma \cdot \tan \delta}{\tan \gamma - \tan \delta} \right)$ (26)

3. Simulasi Model

3.1 Target Pengendalian

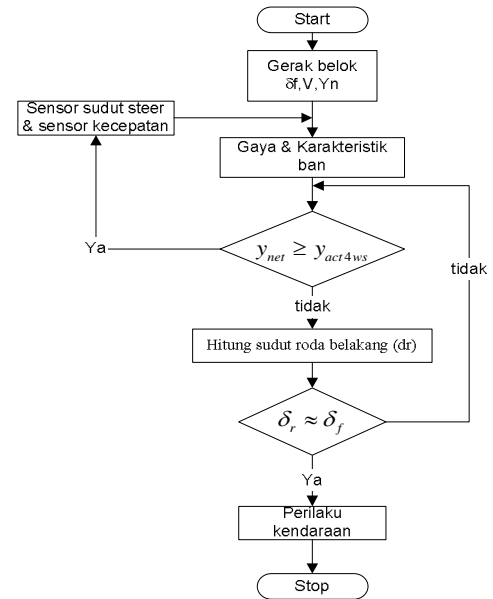
Kecepatan	Belok Kiri	Belok Kanan
Tinggi		
Rendah		

Gambar 4. Rule Perilaku Gerak Kendaraan

Dalam upaya untuk meningkatkan kualitas pengendalian dan kestabilan dari kendaraan saat berbelok di jalan, kondisi kritis dari kendaraan yaitu yawing-rate dikontrol terhadap yaw-rate netral kendaraan dengan memberikan gerakan belok pada roda belakang berlawanan arah untuk kecepatan rendah, dan searah pada kecepatan tinggi. Sudut belok roda depan dan variasi kecepatan dipergunakan sebagai input kontrol sehingga diperoleh respon aktual secara pendekatan terhadap perilaku kendaraan saat bergerak belok. Target dari perilaku gerak kendaraan digambarkan seperti terlihat pada gambar 4.

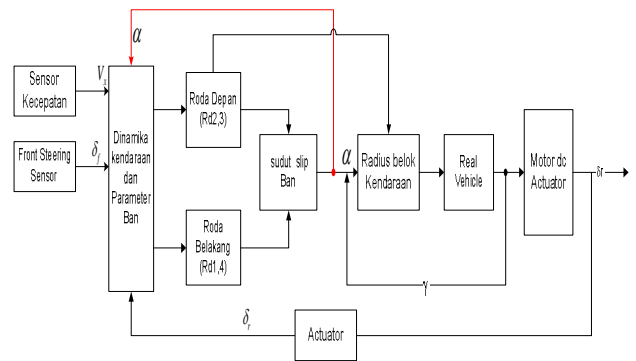
3.2 Simulasi Model Kendaraan

Pengendalian perilaku dari gaya yawing yang terjadi pada kendaraan saat berbelok dengan variabel kecepatan dan sudut belok roda depan mengikuti diagram alir (*flow-chart*) model simulasi yang ditunjukkan pada gambar 5 berikut:



Gambar 5: Diagram Alir Simulasi Logic 4WS

Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan Soft-ware Mat-Lab versi 6.5 dalam blok diagram ditunjukkan seperti pada gambar 6.



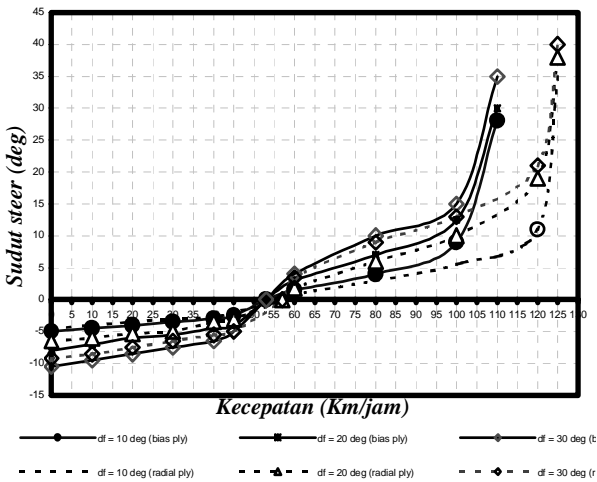
Gambar 6. Blok Diagram Model Simulasi

4. Hasil dan Diskusi

Tabel 1. Rata-Rata Sudut Belok Roda Belakang

Sudut belok	Kecepatan (km/jam)									
	0	10	20	30	45	60	80	110	120	
Ban radial Ply										
10°	-4.5	-4	-3.5	-3	-2	0.8	3	11	35	
20°	-6.5	-6	-5.3	-5	-3	1.8	6	19	38	
30°	-9.2	-8.5	-7.5	-6.5	-5	3.5	9	21	40	
Ban bias Ply										
10°	-5	-4.5	-4	-3.5	-2.5	1.5	4	14	28	
20°	-8	-7	-6	-5.5	-4	3	7	20	30	
30°	-10.8	-9.5	-8.5	-7.5	-5	4	10	25	35	

**SUDUT STEER SISTEM KEMUDI 4WS
Ban Bias-Ply dan Ban Radial**

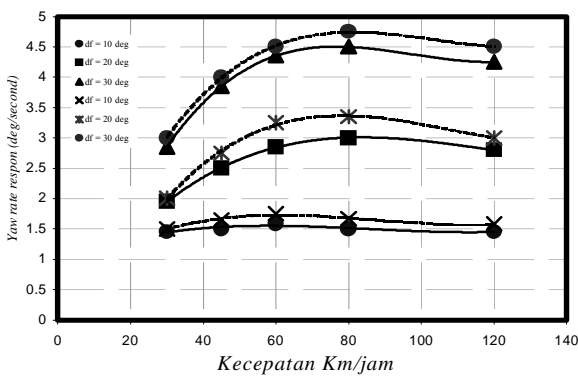


Gambar 7: Grafik Sudut Belok Ban Bias-Ply vs Ban Radial-Ply
Tabel 2. *Yaw-Rate* Nyata Terhadap *Yaw-Rate* Netral

Kecepatan (km/jam)	Sudut Belok (deg)					
	Yaw rate nyata			Yaw rate netral		
10	1.45	1.95	2.85	1.5	2	3
30	1.5	2.5	3.85	1.65	2.75	4
60	1.58	2.85	4.35	1.75	3.25	4.5
80	1.5	3	4.5	1.67	3.35	4.75
120	1.45	2.8	4.25	1.58	3	4.5

**KARAKTERISTIK YAW-RATE SISTEM
KEMUDI 4WS**

(*Yaw-rate* nyata dan *Yaw-rate* netral vs kecepatan)



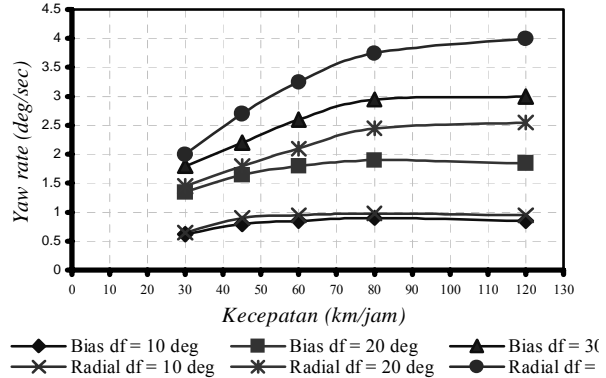
Gambar 8. Grafik Perilaku *Yaw-Rate* Nyata Vs *Yaw-Rate* Netral

Tabel 3. Rata-rata *Yaw-Rate* Ban Bias-Ply dan Ban Radial-Ply

Kecepatan	Yaw-rate rata-rata (deg/sec)					
	Sudut steer					
	10	20	30	10	20	30
30	0.62	1.35	1.8	0.65	1.45	2
45	0.8	1.65	2.2	0.9	1.8	2.7
60	0.85	1.8	2.6	0.95	2.1	3.25
80	0.9	1.9	2.95	0.98	2.45	3.75

**KARAKTERISTIK YAW RATE SISTEM
KEMUDI 4WS**

(Ban radial ply dan ban bias ply)
df = 10 deg, 20 deg, 30 deg, P = 30 Psi

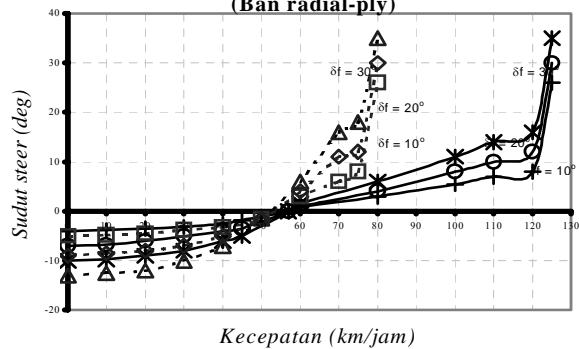


Gambar 9. Grafik Karakteristik *Yaw-Rate* vs Sudut Belok
Tabel 4: Data Perilaku Ban Terhadap *Yaw-Rate*

Sudut belok	Kecepatan (km/jam) dengan motor DC kendali sudut								
	0	10	20	30	40	45	60	80	120
10deg	-4	-3.8	-3.5	-3.2	-2.5	-1.75	0.8	3	26
20deg	-7	-6.8	-6	-5	-4	-3.5	1	4	30
30deg	-10	-9.7	-9	-8	-6	-5	1.5	6	35

Sudut belok	Kecepatan (km/jam) Mekanis murni								
	0	10	20	30	40	50	70	75	80
10deg	-5	-4.8	-4.5	-3.75	-3.25	-1.5	6	8	26
20deg	-9	-8.5	-8	-7	-5	-1.5	11	12	30
30deg	-13	-12.5	-12	-10	-7	-1.5	16	18	35

**KOMPARASI SUDUT BELOK SISTEM
KEMUDI 4WS
(Ban radial-ply)**

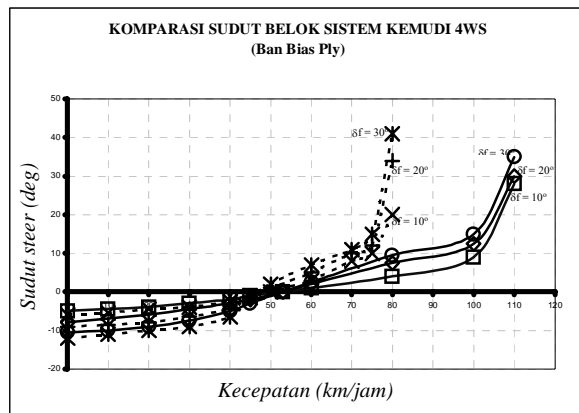


Gambar 10. Grafik Komparasi Kebutuhan Sudut Steer Ban Radial Ply

Tabel 5: Komparasi Sudut Belok Ban Bias-Ply

Sudut belok	Kecepatan (km/jam)									
	0	10	20	30	40	45	60	80	100	110
10deg	-5	-4.5	-4	-3	-2	-1	1	4	9	28
20deg	-8	-7	-6	-4.5	-3	-2	2	7.5	13	30
30deg	-11	-10	-9	-7.5	-5	-3	2.5	9.5	15	35

	0	10	20	30	40	45	60	70	75	80
10deg	-6	-5.5	-4.5	-4	-2.5	-1	3	8	10	20
20deg	-9	-8.5	-8	-6.5	-4.5	-1.2	5	10	12	34
30deg	-12	-11	-10	-9	-6.5	-1.5	7	11	15	41



Gambar 11: Grafik Komparasi Sudut Belok Ban Bias-Ply

Hasil simulasi dengan melakukan tabulasi data didapatkan bahwa kebutuhan sudut belok antara ban radial-ply dan bias-ply untuk tekanan ban $P_s = 35$ Psi, dan pada variasi kecepatan ($V = 30, 45, 80, 120$) km/jam untuk sudut belok roda depan sebagai input control $\delta_f = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$, pada tabel 1 dan gambar 7, diperoleh bahwa kebutuhan sudut belok dari ban bias-ply lebih besar dari kebutuhan sudut belok dari ban radial dimana pada ban bias untuk kecepatan $V = 50$ km/jam (kecepatan tinggi) sudut belok ban depan $\delta_f = 10^\circ$, untuk ban radial $\delta_r = 0,8^\circ$, dan ban bias ply $\delta_r = 1,5^\circ$. Kondisi ini disebabkan oleh adanya faktor defleksi dari ban radial C_a radial lebih kecil dari ban bias ply.

Dari perilaku kebutuhan sudut steer untuk masing-masing jenis ban pada kondisi belok dimana yaw rate yang terjadi untuk ban bias dan ban radial diperoleh perilaku yaw-rate yang terjadi dengan pengontrol lebih kecil dari pada yaw-rate netral kendaraan seperti ditunjukkan pada tabel 2 dan gambar 8.

Perilaku yaw-rate yang terjadi untuk masing-masing variasi dari ban bias-ply dan ban radial-ply menunjukkan bahwa pada ban radial-ply lebih besar dari pada ban bias-ply, untuk variasi input yang sama Hal ini dapat dilihat pada tabel 3 dan gambar 9

Dengan melakukan komparasi antara sistem tanpa pengendalian sudut side-slip dengan sistem side-slip terkendali, diperoleh bahwa kebutuhan sudut belok roda belakang dengan variasi input yang sama, seperti ditunjukkan pada tabel 4 dan 5 serta gambar 10 dan 11, dihasilkan untuk ban radial-ply mempergunakan side-slip terkendali dan motor penggerak DC pengatur posisi, lebih besar yaitu pada kecepatan antara 55 km/jam hingga 60 km/jam, sedangkan tanpa kontrol side-slip terken-

dali, didapatkan kebutuhan sudut belok untuk berubah arah dari kondisi berlawanan ke kondisi searah dengan roda depan adalah berkisar pada kecepatan antara 50 km/jam hingga 55 km/jam. Sedangkan untuk kondisi ban bias-ply dengan variasi yang sama dan penggerak yang sama, pada sistem kontrol dengan side-slip terkendali didapat kebutuhan belok dari roda belakang untuk berubah arah dari kondisi kecepatan rendah ke kecepatan tinggi adalah pada kecepatan berkisar antara 50 km/jam hingga 55 km/jam, dan 47 km/jam hingga 50 km/jam tanpa kontrol side-slip terkendali.

Selanjutnya kebutuhan maksimum yang dicapai antara sistem terkendali side-slip dan tanpa terkendali side-slip, serta dengan motor DC pengatur posisi untuk kemampuan maksimum dari sistem dalam mempertahankan kestabilan kendaraan adalah dicapai lebih panjang yaitu hingga pada kecepatan antara 110 km/jam sampai 120 km/jam, dan sebaliknya tanpa pengontrolan, roda belakang hanya mampu untuk mengontrol belokan hingga pada kecepatan 70 km/jam hingga 80 km/jam.

5. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan hasil diskusi yang dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan melakukan pengendalian mempergunakan metode side-slip terkendali dan penggerak aktuator motor DC pengatur posisi pada system, memberikan respon yang relatif lebih baik dibandingkan dengan tanpa pengendalian.
2. Ditinjau dari konstruksi ban antara ban radial dan ban bias-ply diperoleh bahwa ban radial lebih baik dalam pengendalian sudut belok yang dihasilkan, hal ini dipengaruhi oleh faktor kekakuan ban, dan kebutuhan sudut belok ban radial lebih kecil yang disebabkan pada ban bias defleksi yang terjadi adalah sangat kecil. Pada kondisi gerak belok dari kendaraan ban radial lebih mampu mengendalikan gaya yaw yang terjadi dibandingkan dengan ban bias-ply.
3. Orientasi kebutuhan sudut belok dipengaruhi oleh kecepatan kendaraan dan sudut belok roda depan, dimana semakin tinggi kecepatan dan semakin besar sudut belok roda depan yang diberikan, kebutuhan sudut belok roda belakang semakin besar.
4. Side-slip sebagai salah satu metode pengendalian kestabilan kendaraan saat bergerak belok sangat efektif dipergunakan untuk mengendalikan dan menjaga stabilitas kendaraan. Dari hasil simulasi yang didapatkan dengan perilaku yaw rate yang terjadi pada saat kendaraan berbelok di jalan datar, titik pusat kendaraan

yang condong ke depan memberikan perilaku kendaraan *oversteer*, dan sebaliknya titik pusat massa kendaraan yang condong kebelakang memberikan perilaku kendaraan cenderung *understeer*.

Daftar Pustaka

1. P. Raksincharoensak, Hiroshi Mouri, Masao Nagai, *Vehicle Lane – Keeping Control by Four – Wheel – Steering System*, Proceeding, 6th Int. Symp. on Advanced Vehicle Control (AVEC – 2002), Hiroshima, Japan, Sept. 9–13, 2002.
2. T.Kohata, M.Abe, N. Ukai, *Electronic Control Four Wheel Steering System*, Proceeding of AVEC-Yokohama, Japan. 1992, pp.264-269.
3. Akira Higuchi, Yasushi Saito, Toyota Motor Corporation, *Optimal Control of Four Wheel Steering Vehicle*, Proceeding of AVEC 92, Japan, 1992 (9), Nr. 923043.
4. Shinya Nohtomi, Yoshihiro Shimada, Shini-chiro Horiuchi and Naohiro Yuhara, *Multicriteria Design of Adaptive Front and Rear Wheel Steering Control System with Special Emphasis on Yaw Rate Response*, Int. Pasific Conference on Automotive Engineering (IPC – 9), Bali, Indonesia, Nov. 16 – 21, 1997.
5. Ronald K Jurgen, *Automotive Electronic Handbook*, McGraw-Hill, Inc, New York. 1995.
6. Setiawan Ananto, *Modifikasi Sistem Kemudi 4 Roda Dahiatsu Charade CX-88*, Tugas Akhir S-1, Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya, 1990.
7. W. Diyono, Sutantra, *Rancang Bangun Sistem Kemudi 4 Roda Electric-Mekanis (M-ITS-4WS-II)*, Laporan Proyek Penelitian, Jurusan Teknik Mesin ITS, 1994, Surabaya.
8. I.N.Sutantra, Yusuf Kaelani, *Dinamic Characteristics of Multi Function Four Wheel Steering System*, FISITA World Automotive Congress, Seoul, Korea, June, 2000, F2000G344.
9. Yunarko.T, *Pengaruh Parameter Disain Terhadap Kebutuhan Sudut Belok Roda Belakang pada Sistim Kemudi Empat Roda untuk Kecepatan Tinggi*, Thesis S-2, Prog. Studi Teknik Mesin, ITS – Surabaya, 1999.
10. J.Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley & Son, New York, 1978.
11. CROUSE, ANGLIN, *Automotive Mechanics*, Tenth Edition, Mc. Graw Hill, NewYork, 1993.
12. Lee A.Y, *Perfomance of Four Wheel Steering Vehicle In Line Change Maneuver*, SAE 950316, Feb.1995.
13. Shuichi Kosuge, Kenji Kato, Naoki Hara, Nippodenso Co., Ltd, *Automotive Yaw Rate Sensor*, Proceeding of AVEC 92, Japan, 1992 (9), Nr. 923030.
14. Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall International, Inc. 1997.
15. Sutantra, *Teknologi Otomotif-Teori dan Aplikasinya*, Guna Widya, Surabaya. 2001.