# Analisa Sudut Belok Roda Belakang Sebagai Fungsi Sudut Belok Roda Depan dan Kecepatan pada Kendaraan Mini 4WS

**Yunarko Triwinarno**
Dosen Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin - Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

**Taufiq Hidayatullah**
Mahasiswa Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin - Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

## Abstrak

Pada mobil bersistem 2 Wheel Steering, kendali arah tertumpu pada sudut belok roda depan ($\delta_f$). Karena sifat ban dan pengaruh parameter dinamis kendaraan, timbul sudut slip saat mobil bergerak belok. Bila mobil tersebut bergerak belok pada kecepatan tinggi, sudut slip dapat mengakibatkan gerakan kendaraan tidak stabil (oversteer, understeer). Cara untuk mengatasi keadaan ini adalah membatasi kecepatan kendaraan. Dari dua macam keadaan tidak stabil di atas, oversteeringlah yang harus dihindari pengendara saat kecepatan mobil tinggi. Oversteer lebih berbahaya dibandingkan understeer, karena menyebabkan arah belok kendaraan tidak menentu. Cara lain untuk mengatasi oversteer ini adalah menggunakan sistem 4 wheel steering (4WS). Dengan mengontrol sudut belok roda belakang ($\delta_r$), oversteer dapat dihindari. Keuntungan 4WS lainnya adalah dapat menghasilkan manuver kendaraan yang baik pada kecepatan rendah. Analisa yang dibuat ini diharapkan dapat menghasilkan perumusan $\delta_r$ sebagai fungsi dari $\delta_f$ dan juga V, yang membuat kendaraan berputar stabil pada kecepatan tinggi dan memiliki radius putar yang kecil pada kecepatan rendah. Dengan kombinasi metoda Tanpa Side Slip dan skid kritis, dihasilkan sudut belok roda belakang yang tidak menghasilkan skid saat kendaraan berbelok serta radius putar kendaraan yang kecil, baik pada kecepatan rendah maupun kecepatan tinggi. Akhirnya dapat diperoleh konstruksi dari kendaraan yang lebih stabil.

Kata kunci: dua *wheel steering*, sudut belok roda depan, sudut belok roda belakang, *oversteer*, *understeer*, empat *wheel steering*

## *Abstract*

*On 2 Wheel Steering system vehicles, the direction steer is controlled by front wheel steer angle ($\delta_f$). Because characteristic of tire and dynamic parameter influence of vehicle, emerge the slip angle when the vehicle make a turn. If the vehicle turn at high speed the slip angle can result unstable vehicle movement (oversteer, understeer). The way to overcome this circumstance is to make limit speed of the vehicle. From two kinds of unstable circumstance above, the driver must avoid oversteer at high speed. Oversteer more risky rather than understeer, because it cause uncertain turning direction. The other ways to overcome this oversteer, by using four wheels steering system (4WS). By controlling the rear wheel angle ($\delta_r$), oversteer can be avoided. The other advantage of 4WS is, it create good maneuver at low-speed. This analysis is expected that can produce the formulation of $\delta_r$ as the function of $\delta_f$ and speed, which can make stability of turning at high-speed and short radius of turning at low speed. By combining No Side Slip method and critical skid, the rear wheel angle create no skid and short radius turn at low-speed or at high-speed.*

*Keywords*: *two wheels steering, front wheel steer angle, rear wheel steer angle, oversteer, understeer, four wheels steering.*

## 1. Pendahuluan

Pada saat ini kepadatan lalu lintas khususnya di kota-kota besar sudah menjadi masalah besar bagi penduduknya. Selain sering terjadinya kemacetan, asap-asap kendaraan juga terus menambah polusi udara yang sudah tinggi. Khusus untuk masalah kemacetan, ini merupakan masalah yang paling tidak disenangi bagi pengendara mobil. Ditambah lagi dengan makin terbatasnya lahan parkir, sehingga menambah kesulitan bagi pengendara mobil untuk beraktifitas. Untuk itu diperlukan suatu solusi yang efektif guna mengatasi persoalan diatas.

Salah satu pemecahannya adalah diperlukan suatu kendaraan yang lincah, kecil, bebas polusi dan penggunaan energi yang efisien. Pada saat ini, para pabrikan mobil di dunia berlomba-lomba

**Catatan:** Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juli 2005. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 7 Nomor 2 Oktober 2005.

menciptakan kendaraan yang berkemampuan seperti yang disebutkan di atas. Meskipun ukuran dari kendaraan kecil namun masih diyakini kurang mampu untuk bermanuver di jalan yang sempit atau *track* yang kecil dan berliku-liku. Untuk mengatasi hal tersebut bila parameter desain dari kendaraan tetap maka kendaraan tersebut harus memiliki sistem kemudi 4 roda. Maka dari sini penulis mendapatkan ide untuk membahas *4 wheel steering (4WS)*/sistem kemudi 4 roda yang diterapkan pada rancangan kendaraan mini (Gambar 1), dengan menganalisa sudut belok roda belakang ($\delta_r$) terhadap sudut belok roda depan ($\delta_f$) dengan pengaruh kecepatan kendaraan dan sudut kemiringan jalan.

**Gambar 1. Rancangan Mobil Mini 4WS**

## 2. Metodologi

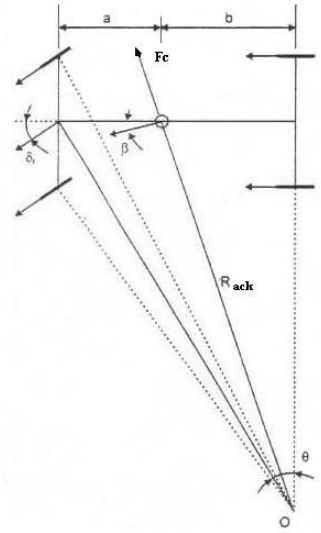
### 2.1 Analisa 2WS

Awal untuk menganalisa sistem 4WS, dimulai dengan menggunakan analisa 2WS dalam kondisi Ackerman.

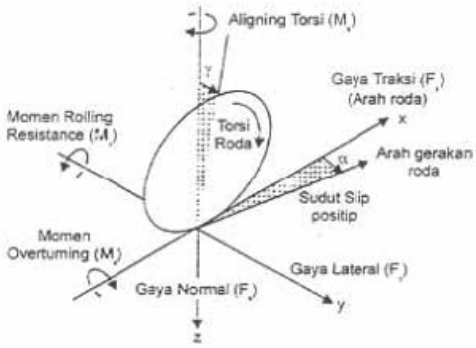
Kondisi Ackerman (Ideal) dari kendaraan yang berbelok adalah kondisi dimana semua roda dari kendaraan tidak mengalami slip. Ini berarti arah roda sejajar dengan garis yang tegak lurus terhadap radius putar roda tersebut.

Dari kondisi ackerman ini, langkah selanjutnya adalah mencari besar gaya-gaya yang terjadi pada ban.

Ada tiga gaya yang bekerja pada ban yaitu gaya normal atau vertical ($F_Z$), gaya longitudinal ($F_X$) dan gaya samping ($F_y$). Gaya normal diakibatkan oleh gaya berat kendaraan dan gaya inersia yang arahnya vertical. Gaya longitudinal diakibatkan oleh komponen longitudinal dari gaya sentrifugal kendaraan dan gaya inersia, sedang gaya samping atau gaya lateral pada dasarnya disebabkan oleh gaya sentrifugal kendaraan. Disamping itu karena ban umumnya memiliki sudut chamber ($\gamma$), mengakibatkan timbul gaya dorong chamber ke arah samping ($F_{y\gamma}$). Di dalam analisa ini, gaya dorong chamber di abaikan. Gaya-gaya lain yang dapat mempengaruhi kendaraan adalah gaya angin dan gaya tahanan rolling. Lihat gambar 3.

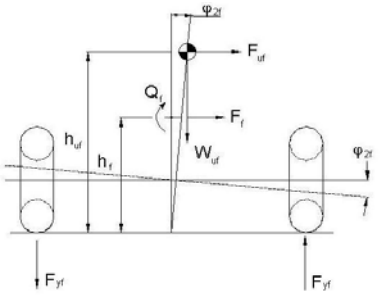



**Gambar 2. Kondisi Berbelok Ideal *(Ackerman)***

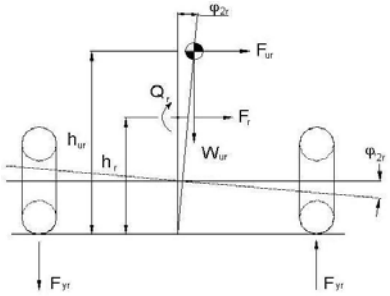



**Gambar 3. Gaya yang Bekerja pada Ban**

Adapun untuk mencari gaya vertikal didapat secara grafis.



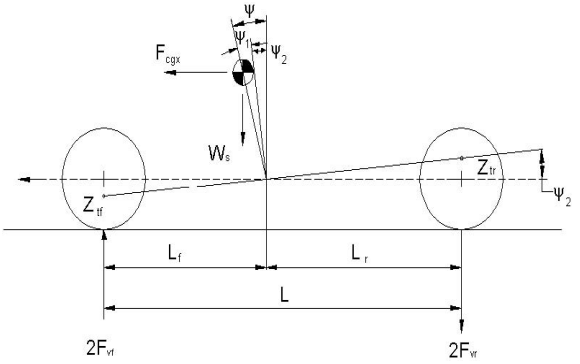

(a) Poros Depan




(b) Poros Belakang

**Gambar 4. Perpindahan Beban Lateral**

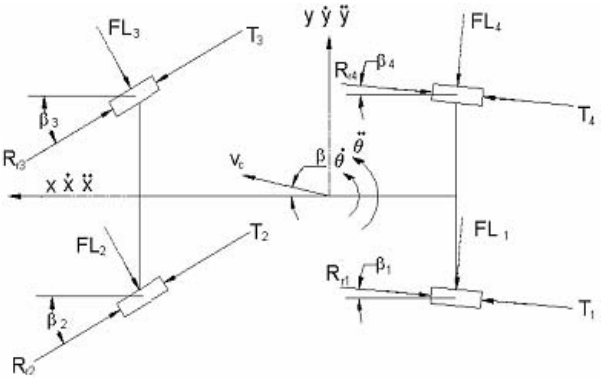
Gambar 4 menunjukkan pengaruh momen rolling yang di sebabkan gaya sentrifugal menghasilkan gaya arah vertikal pada setiap roda.




**Gambar 5. Perpindahan Beban Longitudinal**

Gaya sentifugal juga mengakibatkan momen pitching (angguk) sehingga roda pada poros depan mendapat gaya tekan sedangkan roda pada poros belakang mendapat gaya tarik.

Dengan menjumlahkan distribusi gaya berat pada roda dan gaya-gaya vertikal akibat gaya sentrifugal di dapat Fz.




**Gambar 6. Arah Gaya Pada Ban, Yawing dan Kecepatan**

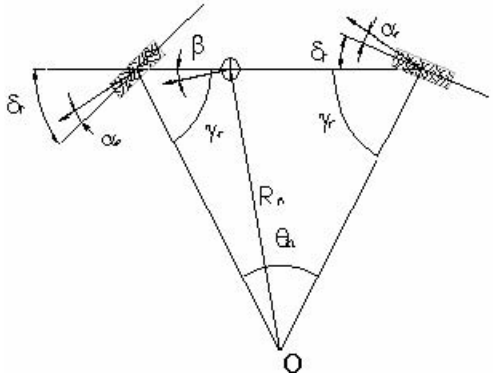
Gambar 6 menunjukkan arah gaya lateral dan gaya longitudinal pada masing-masing ban. Sudut slip pada setiap ban dipengaruhi oleh banyak factor. Jika dipakai faktor-faktor pengaruh tersebut, maka sudut slip merupakan fungsi dari konstruksi ban (K), gaya lateral ($F_y$), gaya normal ($F_z$), tekanan ban (P), keausan ban (A) dan gaya longitudinal ($F_x$).

$\alpha = f(K, F_y, F_z, P, A, F_x)$

### 2.2 Analisa 4WS

Sudut slip yang telah didapat menentukan besarnya sudut belok roda belakang dari kendaraan. Adapun metode untuk mencari sudut belok roda belakang adalah sebagai berikut:

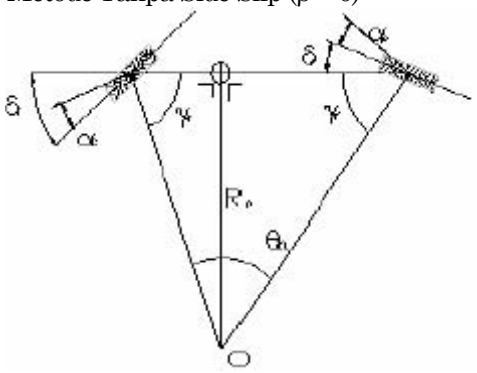
1. Metode Sudut Berimbang ($\gamma_f = \gamma_r$)




**Gambar 7. Pendekatan Model 2 Roda Depan dengan Arah $\delta_r$ Berlawanan $\delta_f$ dan ( $\gamma_f = \gamma_r$ )**

Metode ini bertujuan menyamakan sudut yang dibentuk garis tegak lurus arah roda depan dan belakang aktual terhadap panjang wheel base.

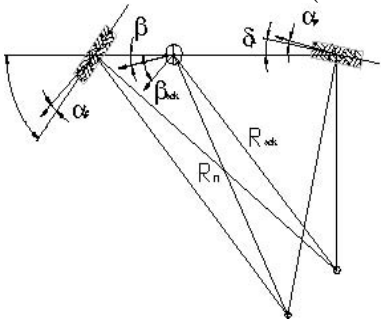
2. Metode Tanpa Side Slip ($\beta = 0$)




**Gambar 8. Pendekatan Model 2 Roda dengan Arah $\delta_f$ Berlawanan $\delta_r$ dan ($\beta = 0$)**

Prinsip metode ini adalah menciptakan gerak belok kendaraan tanpa sudut simpang ($\beta = 0$)

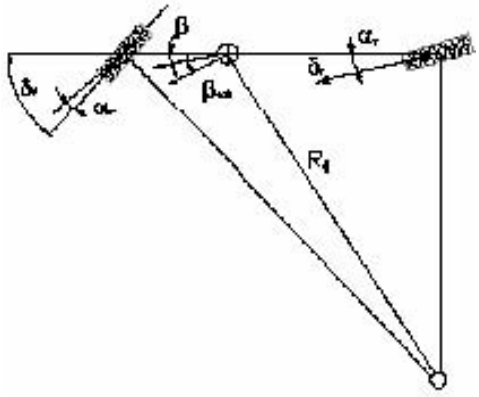
3. Metode Radius Ackerman ( $R_4 = R_{ack}$ )




**Gambar 9. Pendekatan Model 2 Roda dengan Arah $\delta_r$ Berlawanan Arah $\delta_f$ untuk ($R_4 = R_{ack}$)**

Maksud metode ini adalah radius putar nyata memiliki besar yang sama dengan radius putar ackerman.

4. Metode Side Slip Terkendali




**Gambar 10. Pendekatan Model 2 Roda dengan Arah $\delta_r$ Berlawanan Arah $\alpha_r$**

Metode ini bermaksud membatasi sudut simpang nyaa agar tidak melebihi sudut simpang ackerman. Titik pusat putar kendaraan harus berada garis yang tegak lurus dengan garis wheel base.

### 2.3 Analisa Skid

Agar kendaraan tidak mengalami skid, maka gaya gesek roda dengan jalan harus lebih besar atau sama dengan gaya samping. Gaya gesek tersebut adalah perkalian antara gaya normal roda pada poros depan atau belakang dengan koefisien gesek jalan.

Kondisi kritis skid roda depan dan roda belakang adalah sebagai berikut:

$\mu.F_{Zf} = F_{cf}$

$\mu.F_{Zr} = F_{cr}$

### 2.4 Data Kendaraan

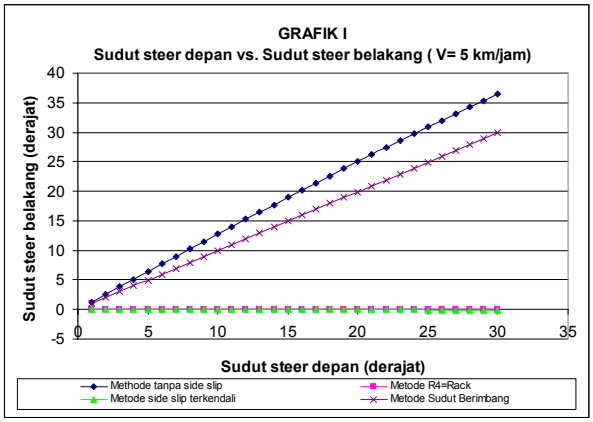
Data yang diolah adalah sebagai berikut:

| | | |
|---|---|---|
| Berat total | ($W_t$) | : 3517 N |
| Berat sprung | ($W_s$) | : 2656 N |
| Berat unspung | ($W_{uf}$) | : 439,56 N |
| | ($W_{ur}$) | : 421,44 N |
| Panjang wheel base | (L) | : 1420 mm |
| Lebar track | ($t_f$, $t_r$) | : 999 mm |
| Tinggi c.g.total | ($h_t$) | : 433,57 mm |
| Tinggi c.g.sprung | ($h_s$) | : 495,61 mm |
| Tinggi c.g.unsprung | ($h_{uf}$) | : 259,21 mm |
| | ($h_{ur}$) | : 224,4 mm |
| Jarak titik berat sprung | ($L_f$) | : 596,8 mm |
| | ($L_r$) | : 823,2 mm |
| Jarak titik berat total | (a) | : 621 mm |
| | (b) | : 799 mm |
| Tinggi sumbu guling | ($h_f$) | : 230 mm |
| | ($h_r$) | : 97 mm |
| Kekakuan ban | ($K_{tf}$) | : 42 kN/m |
| | ($K_{tr}$) | : 69 kN/m |
| Kekakuan suspensi | ($K_{sf}$) | : 30 kN/m |
| | ($K_{sr}$) | : 65 kN/m |
| Redaman suspensi | (C) | : 620 Ns/m |
| Jari-jari roda ban bias | (r) | : 200 mm |
| Tekanan ban | ($p_f$) | : 25 psi |
| | ($p_r$) | : 30 psi |

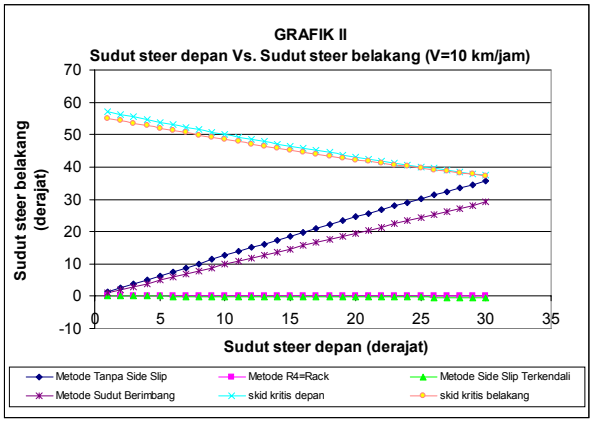
Sudut belok roda depan yang dianalisa adalah 1° s/d 30°, dan kecepatan kendaraan yang dianalisa adalah 5 km/jam, 10 km/jam, 15 km/jam, 20 km/jam, 25 km/jam, 30 km/jam, 35 km/jam dan 40 km/jam.

## 3. Hasil Pembahasan

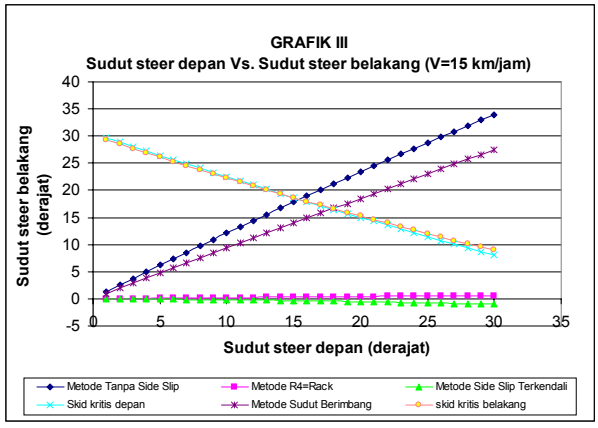
Dengan mengolah data kendaraan, didapatkan hasil analisa yang kemudian dibuat grafik sudut belok roda belakang ($\delta_r$) terhadap sudut belok roda depan ($\delta_f$), sebagai berikut:



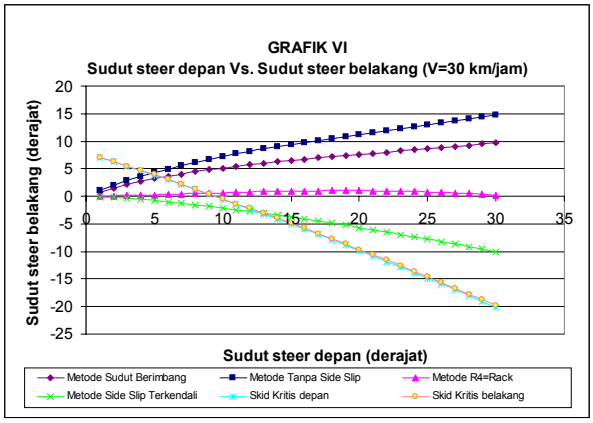

**Gambar 11. Grafik Sudut Steer Depan vs Sudut Steer Belakang (V = 5 km/jam)**



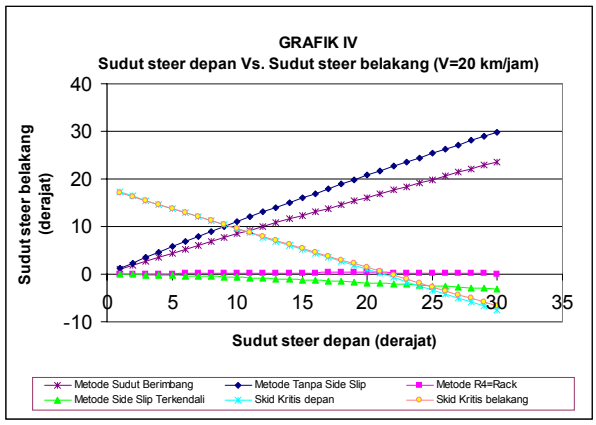

**Gambar 12. Grafik Sudut Steer Depan vs Sudut Steer Belakang (V = 10 km/jam)**



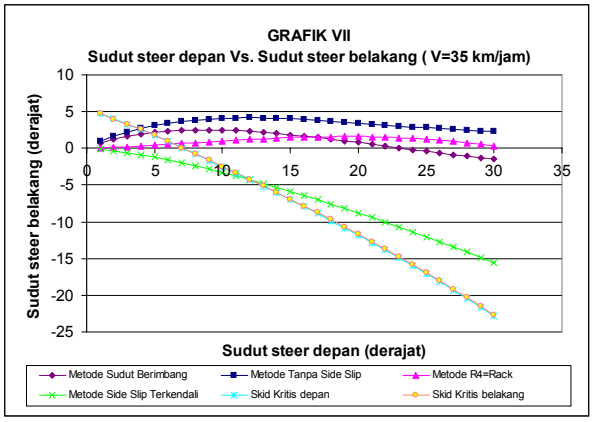

**Gambar 13. Grafik Sudut Steer Depan vs Sudut Steer Belakang (V = 15 km/jam)**



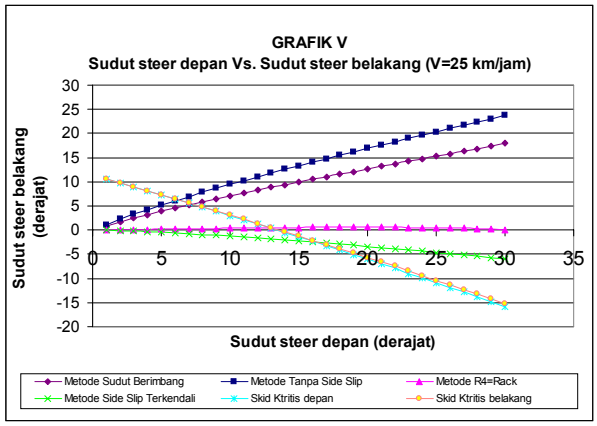

**Gambar 16. Grafik Sudut Steer Depan vs Sudut Steer Belakang (V = 30 km/jam)**



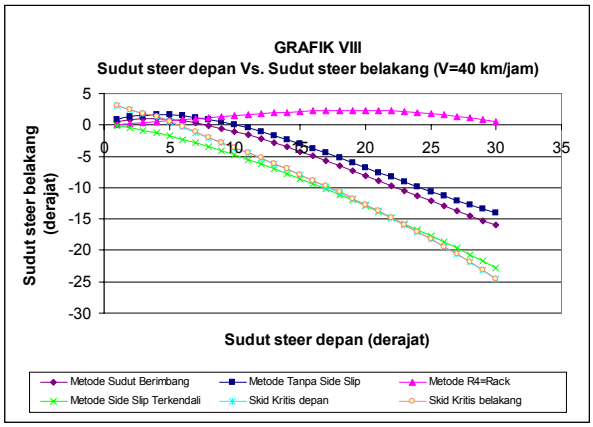

**Gambar 14. Grafik Sudut Steer Depan vs Sudut Steer Belakang (V = 20 km/jam)**




**Gambar 17. Grafik Sudut Steer Depan vs Sudut Steer Belakang (V = 35 km/jam)**




**Gambar 15. Grafik Sudut Steer Depan vs Sudut Steer Belakang (V = 25 km/jam)**



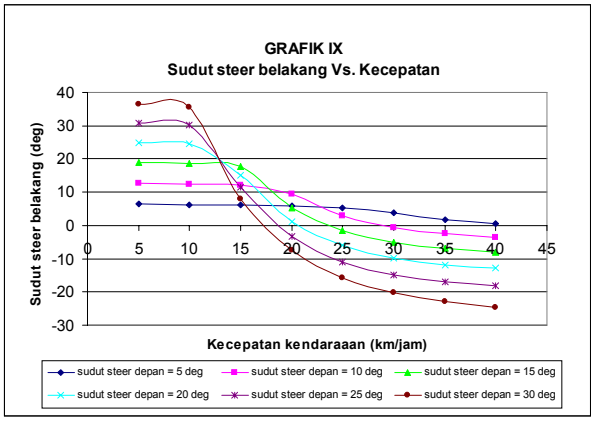

**Gambar 18. Grafik Sudut Steer Depan vs Sudut Steer Belakang (V = 40 km/jam)**

### 3.1 Analisa Perbandingan Metode

Dari gambar 10 sampai dengan gambar 18 menunjukkan bahwa:

- Sudut belok roda belakang hasil metode Tanpa *Side Slip* lebih besar dibandingkan metode-metode lainnya pada kecepatan rendah.
- Sudut belok roda belakang hasil metode *Side Slip* terkendali hasilnya paling kecil dibandingkan metode-metode lainnya pada kecepatan rendah.
- Pada kecepatan 5 km/jam dan 10 km/jam, metode Tanpa *Side Slip* sangat baik menghasilkan sudut belok roda belakang, karena menciptakan radius putar yang kecil dan stabil (tidak mengalami skid).
- Pada kecepatan kendaraan 15 km/jam, dengan sudut belok roda belakang hasil metode Tanpa *Side Slip* mengalami skid pada saat sudut belok roda depan ($\delta_f$) sebesar 16°. Sehingga sudut belok roda belakang untuk $\delta_f > 15°$, sudah tidak stabil.
- Juga pada kecepatan 20 km/jam untuk $\delta_f > 9°$, kecepatan 25 km/jam untuk $\delta_f > 6°$, kecepatan 30 km/jam untuk $\delta_f > 4°$, kecepatan 35 km/jam untuk $\delta_f > 3°$, serta kecepatan 40 km/jam untuk $\delta_f > 3°$, kondisi kendaraan sudah tidak stabil bila menggunakan metode Tanpa *Side Slip*.
- Pada kondisi kecepatan kendaraan 35 km/jam dengan sudut belok > 17°, menunjukkan bahwa sudut belok roda belakang hasil metode $R_4 = R_{ack}$ lebih besar dibandingkan hasil metode sudut berimbang. Ini artinya bahwa radius putar metode $R_4 = R_{ack}$ lebih kecil dibandingkan dengan metode sudut berimbang.
- Pada kondisi kecepatan kendaraan 40 km/jam dengan sudut belok > 8 °, menunjukkan bahwa susut belok roda belakang hasil metode $R_4 = R_{ack}$ lebih positif dibandingkan hasil metode tanpa side slip. Ini artinya bahwa radius putar metode $R_4 = R_{ack}$ lebih kecil dibandingkan dengan metode tanpa side slip, namun metode R4 = Rack sudah tidak stabil pada $\delta_f > 5°$.
- Hasil skid kritis depan terlihat sudut belok roda belakangnya lebih kecil dibandingkan hasil skid kritis belakang, ini berarti menandakan bahwa kondisi kendaraan understeering.
- Metode *Side Slip* terkendali ($\beta_4 = \beta_{ack}$) merupakan metode yang paling telat mengalami skid, namun hasil metode ini juga kurang bagus karena menciptakan radius putar terlalu besar.

Hubungan $\delta_r$ dan V, dimana harga $\delta_r$ yang digunakan merupakan hasil dari metode Tanpa Sudut Simpang dan Skid Kritis Depan dapat dilihat pada gambar 19.

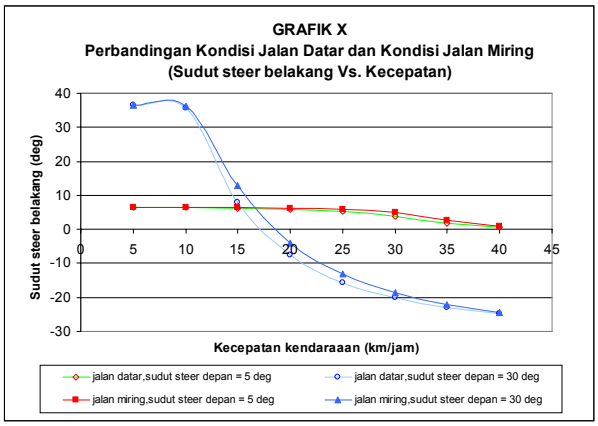



**Gambar 19. Grafik Sudut Belakang vs Kecepatan**

### 3.2 Analisa Grafik Sudut Steer Belakang vs Kecepatan (Gambar 19)

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari metode terbaik yang dapat menghasilkan kestabilan serta radius putar yang rendah, maka didalam grafik ini digunakan kombinasi rumusan $\delta_r$ dari skid kritis depan pada kondisi jalan datar :

- Pada kondisi kecepatan rendah dimana kendaraan belum mengalami skid, semakin besar $\delta_f$, maka $\delta_r$-nya bernilai semakin positif.
- Namun keadaan menjadi terbalik pada kondisi kecepatan tinggi, membesarnya $\delta_f$ menyebabkan $\delta_r$ cenderung bernilai negatif (roda belakang searah dengan roda depan).
- Pada kecepatan kendaraan 15 km/jam, terlihat bahwa $\delta_r$ dari sudut belok roda depan 20°, 25° dan 30° nilainya mulai lebih kecil dari pada $\delta_r$ dari sudut belok roda depan yang lebih rendah.
- Pada kecepatan 25 km/jam hingga 40 km/jam, semakin tinggi sudut belok roda depan maka semakin negatif sudut belok roda belakang.




**Gambar 20. Grafik Perbandingan Kondisi Jalan Datar dan Kondisi Jalan Miring (Sudut Steer Belakang vs Kecepatan)**

### 3.3 Analisa Pengaruh Kemiringan Jalan 10° (Gambar 20)

Pada grafik ini membandingkan sudut belok roda belakang hasil perhitungan pada kondisi jalan datar dengan kondisi jalan miring. Perbandingannya adalah sebagai berikut:

- Hasil sudut belok roda belakang pada kondisi jalan miring lebih besar dibandingkan dengan hasil sudut belok roda belakang pada kondisi jalan datar, ini disebabkan sudut slip pada kondisi jalan miring lebih kecil dibandingkan kondisi jalan datar.
- Pada sudut belok roda depan yang tetap dengan kecepatan kendaraan bertambah selisih antara sudut belok roda belakang kondisi jalan miring dengan sudut belok roda belakang kondisi jalan datar semakin besar. Tetapi pada kecepatan tinggi, kurva dari 2 kondisi jalan tersebut seolah-olah berhimpit kembali. Ini disebabkan karena pengaruh dari gaya sentrifugal.

## 4. Kesimpulan dan Saran

Adapun kesimpulan yang didapatkan dari analisa ini adalah:

1. Harga $\delta_r$ hasil metode Tanpa *Side Slip* menghasilkan radius putar yang kecil dibandingkan dengan menggunakan metode lain.
2. Bertambahnya kecepatan kendaraan menyebabkan harga $\delta_r$ mengarah ke harga negatif (searah $\delta_f$).
3. Pengaruh kemiringan jalan mempengaruhi kestabilan kendaraan, bertambah miring kondisi jalan menyebabkan kendaraan lebih stabil.
4. Kombinasi rumusan $\delta_r$ dari metode Tanpa *Side Slip* dengan rumusan $\delta_r$ skid kritis roda depan, menciptakan kendaraan bergerak lincah pada kecepatan rendah, dan stabil pada kecepatan tinggi.
5. Rumusan kombinasi antara $\delta_r$ metode Tanpa *Side Slip* dengan skid kritis roda depan yang digunakan rancangan kendaraan mini ini adalah:

| Kondisi Jalan Tanpa Kemiringan | |
|---|---|
| $\delta_f$ ( ˚ ) | $\delta_r = f(V)$ |
| 30 | $\delta_r = -0{,}0004.V^4 + 0{,}0368.V^3 - 1{,}1187.V^2 + 9{,}8178.V + 12{,}189$ |
| 25 | $\delta_r = -0{,}0003.V^4 + 0{,}0292.V^3 - 0{,}9133.V^2 + 8{,}4668.V + 8{,}5251$ |
| 20 | $\delta_r = -0{,}0002.V^4 + 0{,}0212.V^3 - 0{,}7001.V^2 + 7{,}0766.V + 4{,}6556$ |
| 15 | $\delta_r = -0{,}0001.V^4 + 0{,}013.V^3 - 0{,}4767.V^2 + 5{,}5284.V + 1{,}186$ |
| 10 | $\delta_r = 2E\text{-}05.V^4 - 0{,}0002.V^3 - 0{,}0504.V^2 + 0{,}9178.V + 9{,}1933$ |
| 5 | $\delta_r = 2E\text{-}05.V^4 - 0{,}0015.V^3 + 0{,}0397.V^2 - 0{,}4102.V + 7{,}689$ |

| Kondisi Kemiringan Jalan 10˚ | |
|---|---|
| $\delta_f$ ( ˚ ) | $\delta_r = f(V)$ |
| 30 | $\delta_r = -0{,}0004.V^4 + 0{,}0342.V^3 - 1{,}0695.V^2 + 9{,}8562.V + 10{,}88$ |
| 25 | $\delta_r = -0{,}0003.V^4 + 0{,}0271.V^3 - 0{,}8764.V^2 + 8{,}5989.V + 6{,}9969$ |
| 20 | $\delta_r = -0{,}0002.V^4 + 0{,}0196.V^3 - 0{,}6774.V^2 + 7{,}3325.V + 2{,}7845$ |
| 15 | $\delta_r = -8E\text{-}05.V^4 + 0{,}0096.V^3 - 0{,}3779.V^2 + 4{,}5876.V + 3{,}9172$ |
| 10 | $\delta_r = 5E\text{-}05.V^4 - 0{,}0032.V^3 + 0{,}0381.V^2 + 0{,}055.V + 11{,}714$ |
| 5 | $\delta_r = 2E\text{-}05.V^4 - 0{,}0015.V^3 + 0{,}0439.V^2 - 0{,}4578.V + 7{,}8454$ |

Saran yang dapat diusulkan dari analisa ini adalah:

1. Rumusan $\delta_r$ yang didapat di dalam analisa ini, hanya berlaku pada rancangan kendaraan mobil ini saja.
2. Untuk mengaplikasikan rumusan $\delta_r$ ini pada kendaraan, diperlukan sistem kontrol yang bekerja mengatur arah sudut belok roda belakang dengan bantuan sensor sudut belok roda depan dan sensor kecepatan.

## Daftar Pustaka


1. Wong, JY, *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley & Sons, New York, 1978.
2. Sutantra, I N., *Teknologi Otomotif: Teori dan Aplikasinya*, Guna Widya, Surabaya, 2001.
3. Birch, Thomas W, *Automotive Chassis Syste*", Thomson Learning.
4. Krisnawan, I G N., *Korelasi Sudut Streer Depan dan Belakang dengan Control Side Slip Angle Guna Meningkatkan Stabilitas Arah Kendaraan*, FTI-ITS, 1988.
5. Syahmanto, M., *Pengaruh Parameter Deasin dan Parameter Operasi terhadap δr sisterm 4-WS pada Kecepatan Rendah*, FTI-ITS, 2001.

Hendratno, Bayu, *Analisa Kestabilan Mobil Tenaga Surya Widya Wahana III ITS Dengan Menggunakan Tiga Roda*, FTI-ITS, 1996.