

## ANALISIS STABILITAS BELOK BUS LISTRIK MEDIUM DENGAN VARIASI KECEPATAN DAN KONDISI JALAN

\*Rafi Ziyad Akbar<sup>1</sup>, Ismoyo Haryanto<sup>2</sup>, Gunawan Dwi Haryadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: rafiziyad@students.undip.ac.id

### Abstrak

Bus listrik merupakan kendaraan yang ramah lingkungan karena tidak menghasilkan polusi udara sehingga dapat mengurangi efek rumah kaca karena tidak menggunakan bahan bakar fosil sebagai penggerak utamanya, dengan digerakkan dengan motor listrik menggunakan energi listrik yang disimpan pada baterai atau tempat penyimpanan energi, Bus listrik dapat menjadi solusi dari bertambahnya volume lalu lintas dan pencemaran udara di Indonesia. Bus yang merupakan transportasi massal, sudah seharusnya diperhatikan faktor keselamatan dan keamanannya. Kestabilan merupakan hal yang sangat penting sehingga harus diperhitungkan pada kendaraan agar dapat mengetahui batas batas perilaku arah kendaraan terutama saat kendaraan sedang melakukan gerakan belok. Gerakan belok akan menunjukkan nilai kritis kestabilan kendaraan yaitu *oversteer* dan *understeer*. Pentingnya faktor keselamatan dan keamanan bus, maka diperlukan analisis stabilitas pada bus. Analisis stabilitas dilakukan dengan variasi kecepatan, sudut belok, kemiringan melintang jalan, dan permukaan jalan. Analisis yang digunakan adalah dengan melakukan analisis *slip*, analisis *skid*, dan analisis guling. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah bus listrik medium akan cenderung mengalami *oversteer*, hal ini juga ditunjukkan dengan sudut *slip* roda depan lebih kecil dari sudut *slip* roda belakang, batas kecepatan *skid* roda depan lebih besar dari batas kecepatan *skid* roda belakang, batas kecepatan guling roda depan lebih besar dari batas kecepatan guling roda belakang.

**Kata kunci:** bus listrik medium; guling; *skid*; *slip*; stabilitas

### Abstract

*The electric bus is an environmentally friendly vehicle because it does not produce air pollution so it can reduce the greenhouse effect because it does not use fossil fuels as the main driver, by being driven by an electric motor using electrical energy stored in batteries or energy storage, electric buses can be a solution from the increase in traffic volume and air pollution in Indonesia. Buses are mass transportation, safety and security factors should be considered. Stability is very important so it must be taken into account on the vehicle in order to know the limits of the behavior of the direction of the vehicle, especially when the vehicle is making a turning movement. The turning movement will show the critical value of vehicle stability, namely oversteer and understeer. The importance of the safety and security of the bus, it is necessary to analyze the stability of the bus. Stability analysis was carried out with variations in speed, turning angle, road cross slope, and road surface. The analysis used is slip analysis, skid analysis, and roll analysis. The results obtained in this study are medium electric buses will tend to experience oversteer, this is also indicated by the front wheel slip angle is smaller than the rear wheel slip angle, the front wheel skid speed limit is greater than the rear wheel skid speed limit, the wheel roll speed limit front wheel is greater than the rear wheel rolling speed limit.*

**Keywords:** Medium Electric Bus; Roll; Skid; Slip; Stability;

### 1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara dengan kepadatan penduduk yang cukup tinggi. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik, pada tahun 2020, penduduk di Indonesia mencapai 270 juta jiwa, dengan laju pertumbuhan penduduk per tahun 2010-2020 mencapai angka 1,25% [1]. Angka pertumbuhan penduduk akan berbanding lurus dengan angka kebutuhan ketersediaan transportasi guna menunjang mobilitas penduduk. Hal ini berbanding lurus dengan pencemaran udara yang terjadi di Indonesia, perkembangan volume lalu lintas yang mencapai 15% pertahun menjadi sumber pencemaran udara terbesar di Indonesia yang mencapai 70% akibat emisi gas buang kendaraan bermotor [2].

Bus merupakan alat transportasi massal yang dapat menunjang kebutuhan mobilitas masyarakat karena dapat menampung banyak penumpang dan juga barang. Bus listrik merupakan kendaraan yang ramah lingkungan karena tidak menghasilkan polusi udara sehingga dapat mengurangi efek rumah kaca karena tidak menggunakan bahan bakar fosil

sebagai penggerak utamanya, dengan digerakkan dengan motor listrik menggunakan energi listrik yang disimpan pada baterai atau tempat penyimpanan energi, Bus listrik dapat menjadi solusi dari bertambahnya volume lalu lintas dan pencemaran udara di Indonesia. Bus yang merupakan transportasi massal, sudah seharusnya diperhatikan faktor keselamatan dan keamanannya. Kecelakaan pada bus dapat terjadi dari berbagai hal seperti, faktor jalanan, cuaca, muatan berlebih, pengereman, ataupun kestabilan kendaraan.

Kestabilan merupakan hal yang sangat penting sehingga harus diperhitungkan pada kendaraan agar dapat mengetahui batas batas perilaku arah kendaraan terutama saat kendaraan sedang melakukan gerakan belok. Gerakan belok akan menunjukkan nilai kritis kestabilan kendaraan yaitu *oversteer* dan *understeer*. *Oversteer* adalah kondisi ban depan mengalami *skid* sehingga terlalu cepat berbelok, dan *understeer* adalah kondisi ban belakang mengalami *skid* sehingga sulit untuk berbelok. Keadaan guling pada kendaraan dapat terjadi akibat roda yang terangkat ketika kendaraan sedang berbelok. Kondisi belok netral dapat terjadi ketika sudut *slip* roda depan sama dengan sudut *slip* roda belakang [3].

Pentingnya faktor keselamatan dan keamanan bus, maka diperlukan analisis stabilitas pada bus. Analisis stabilitas dilakukan dengan variasi kecepatan, sudut belok, kemiringan melintang jalan, dan permukaan jalan. Analisis yang digunakan adalah dengan melakukan analisis *slip*, analisis *skid*, dan analisis guling. Dari hasil analisis yang dilakukan akan diteruskan ke pengemudi sehingga pengemudi dapat mengatur kecepatan saat sedang berbelok dengan batasan batasan kestabilan kendaraan.

## 2. Bahan dan Metode Penelitian

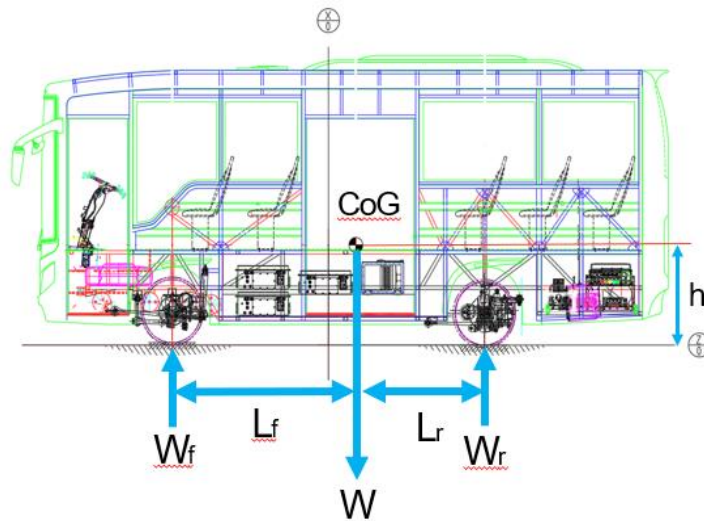
### 2.1. Spesifikasi Kendaraan

Pada tugas akhir ini, kendaraan yang digunakan adalah bus listrik medium yang dapat dilihat pada gambar 1 dan dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada tabel 1 berikut.

**Tabel 1.** Spesifikasi Bus Listrik Medium

| <b>Spesifikasi Bus Listrik Medium</b> |  |
|---------------------------------------|--|
| <b>Dimensi</b>                        |  |
| Panjang total                         | 8178 mm  |
| Lebar total                           | 2100 mm  |
| Tinggi total                          | 3309 mm  |
| Wheelbase                             | 3900 mm  |
| Jarak pijak roda depan                | 1754 mm  |
| Jarak pijak roda belakang             | 1694 mm  |
| Jarak suspensi depan                  | 804 mm   |
| Jarak suspensi belakang               | 860 mm   |
| <b>Weight Distribution</b>            |  |
| Weight Distribution Front             | 41 %   |
| Weight Distribution Rear              | 59 %   |
| Massa kendaraan total                 | 6775 kg  |
| Berat kendaraan depan                 | 2612 kg  |
| Berat kendaraan belakang              | 4163 kg  |
| <b>Suspensi</b>                       |  |
| Depan                                 | Suspensi dengan 2 balon udara, 2 Double Action Shock Absorber, Stabilizer. |
| Belakang                              | Suspensi dengan 4 balon udara, 4 Double Action Shock Absorber.             |
| Kekakuan pegas suspensi depan         | 514 N/m  |
| Kekakuan pegas suspensi belakang      | 567 N/m  |
| Kekakuan stabilizer bar depan         | 71000 Nm/rad   |
| <b>Aerodinamika</b>                   |  |
| Luas frontal kendaraan                | 6,832 m <sup>2</sup>   |
| Massa jenis angin                     | 1,2 kg/m <sup>3</sup>  |
| Koefisien drag                        | 0,7  |
| <b>Ban</b>                            |  |
| Tipe ban                              | 275/70 R17,5   |
| Jenis ban                             | Radial   |
| Diameter rims                         | 17,5 in  |
| Lebar ban                             | 275 mm   |

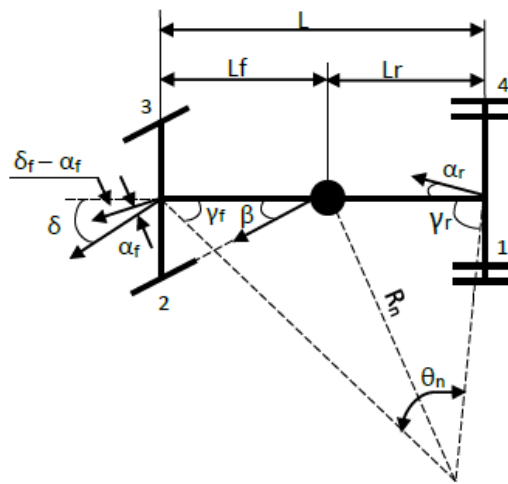
*Free body diagram* bus listrik medium ditunjukkan pada gambar 1 di bawah. Posisi titik berat menjadi peranan penting pada stabilitas kendaraan. Posisi titik berat kendaraan dapat diperoleh dengan mengetahui *weight distribution* pada pada roda depan dan roda belakang. Berat kendaraan total merupakan besar yang hasilnya akan sama dengan gaya reaksi yang terjadi pada roda depan dan roda belakang. Spesifikasi roda seperti lebar tapak depan, persen ketinggian dari lebar tapak ban, dan diameter ban yang dipakai akan memiliki pengaruh terhadap letak titik ketinggian beban terpusat kendaraan. Posisi titik berat berpengaruh terhadap stabilitas kendaraan. jika poisisi titik berat kendaraan berada di depan, maka kendaraan akan mengalami *understeer*, sedangkan jika posisi titik berat kendaraan berada di belakang, maka kendaraan akan mengalami *oversteer*. Posisi tinggi titik berat juga berpengaruh terhadap stabilitas, semakin jauh jarak antara titik berat dan sumbu guling, maka kendaraan akan semakin kritis terhadap guling [4].



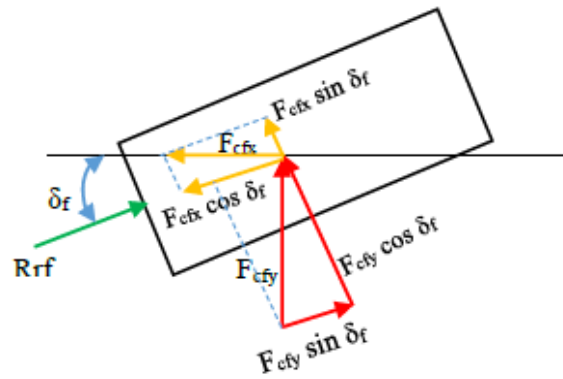
**Gambar 1.** *Free Body Diagram* Bus Listrik Medium

## 2.2. Gaya yang Bekerja pada Kendaraan Belok

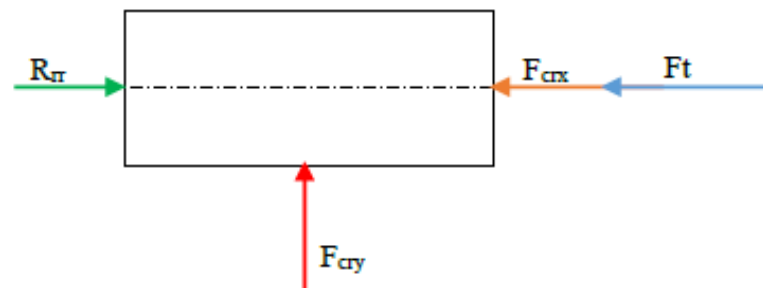
Gaya yang bekerja saat kendaraan sedang berbelok dapat diketahui berdasarkan free body diagram pada gambar 2, 3, dan 4. Gaya yang bekerja pada kendaraan ketika kendaraan berbelok adalah gaya sentrifugal yang mengarah ke arah berlawanan dari arah beloknya [5].



**Gambar 2.** Kinematika Kendaraan Belok



**Gambar 3.** Gaya yang Terjadi pada Roda Depan



**Gambar 4.** Gaya yang Terjadi pada Roda Belakang

Gaya longitudinal yang terjadi pada setiap ban saat berbelok:

$$F_{x1} = \frac{1}{2} [F_t + F_{crx} - R_{rr}]$$

$$F_{x2} = \frac{1}{2} [F_{cfy} \cdot \sin \delta_f - F_{cfx} \cdot \cos \delta_f + R_{rf}]$$

$$F_{x3} = \frac{1}{2} [F_{cfy} \cdot \sin \delta_f - F_{cfx} \cdot \cos \delta_f + R_{rf}]$$

$$F_{x4} = \frac{1}{2} [F_t + F_{crx} - R_{rr}]$$

Gaya lateral yang terjadi pada setiap ban saat berbelok:

$$F_{y1} = \frac{F_{cry}}{4} = \frac{L_f}{4L} (F_c \cos \beta)$$

$$F_{y2} = \frac{1}{2} [F_{cfy} \cdot \cos \delta_f + F_{cfx} \cdot \sin \delta_f]$$

$$F_{y3} = \frac{1}{2} [F_{cfy} \cdot \cos \delta_f + F_{cfx} \cdot \sin \delta_f]$$

$$F_{y4} = \frac{F_{cry}}{4} = \frac{L_f}{4L} (F_c \cos \beta)$$

Gaya vertikal yang terjadi pada setiap ban saat berbelok:

$$F_{z1} = \frac{L_f}{2L} (W \cos \theta + F_c \cos \beta \sin \theta) - \frac{L_f F_{cry} \cdot h_{gf}}{2L t_r} - \frac{L_f M_{gr}}{2L t_f} - \frac{(F_{cx} - R_a) h_{gr}}{2L} - \frac{M_p}{2L}$$

$$F_{z2} = \frac{L_r}{2L} (W \cos \theta + F_c \cos \beta \sin \theta) - \frac{L_r F_{cfy} \cdot h_{gf}}{L t_f} - \frac{L_r M_{gf}}{L t_f} + \frac{(F_{cx} - R_a) h_{gf}}{2L} + \frac{M_p}{2L}$$

$$F_{z3} = \frac{L_r}{2L} (W \cos \theta + F_c \cos \beta \sin \theta) + \frac{L_r F_{cfy} \cdot h_{gf}}{L t_f} + \frac{L_r M_{gf}}{L t_f} + \frac{(F_{cx} - R_a) h_{gf}}{2L} + \frac{M_p}{2L}$$

$$F_{z4} = \frac{L_f}{2L} (W \cos \theta + F_c \cos \beta \sin \theta) + \frac{L_f F_{cry} \cdot h_{gf}}{2L t_r} + \frac{L_f M_{gr}}{2L t_r} - \frac{(F_{cx} - R_a) h_{gr}}{2L} - \frac{M_p}{2L}$$

Keterangan:

m = Massa kendaraan (Kg)

V = Kecepatan kendaraan belok (m/s)

R = Radius belok (m)

$F_c$  = Gaya sentrifugal yang terjadi pada kendaraan (N)

$F_{cfx}$  = Gaya sentrifugal 105ea rah longitudinal yang terjadi pada roda depan (N)

$F_{crx}$  = Gaya sentrifugal ke arah longitudinal yang terjadi pada roda belakang (N)

$F_{cfy}$  = Gaya sentrifugal ke arah lateral yang terjadi pada roda depan (N)

$F_{cry}$  = Gaya sentrifugal ke arah lateral yang terjadi pada roda belakang (N)

$R_r$  = Gaya hambat *rolling* yang terjadi pada ban kendaraan (N)

Sistem suspensi dan kekakuan vertikal ban kendaraan berpengaruh pada gaya vertikal yang terjadi pada kendaraan saat berbelok yang dapat menimbulkan momen guling dan momen *pitching*. Sistem suspensi mengalami reaksi sehingga menimbulkan momen yang disebabkan oleh momen guling yang terjadi pada kendaraan sebagai aksi [6]. Besar momen guling dan momen *pitching* dapat menggunakan persamaan berikut dengan  $\gamma^\circ$  dan  $\gamma_p$  adalah sudut guling dan sudut *pitching* kendaraan ketika berbelok:

$$M_{gf} = K_{eqf} \cdot \frac{b_f^2}{2} \cdot \gamma_f$$

$$\gamma_f = \frac{\frac{L_r}{L} \cdot F_{cy} \cdot r_c}{K_{eqf} \cdot \frac{b_f^2}{2} - \frac{L_r}{L} \cdot W \cdot r_c}$$

$$M_{gr} = K_{eqr} \cdot \frac{b_r^2}{2} \cdot \gamma_r$$

$$\gamma_r = \frac{\frac{L_f}{L} \cdot F_{cy} \cdot r_c}{K_{eqr} \cdot \frac{b_r^2}{2} - \frac{L_f}{L} \cdot W \cdot r_c}$$

$$M_p = (F_{cx} - R_a) \cdot r_c + W \cdot \gamma_p \cdot r_c$$

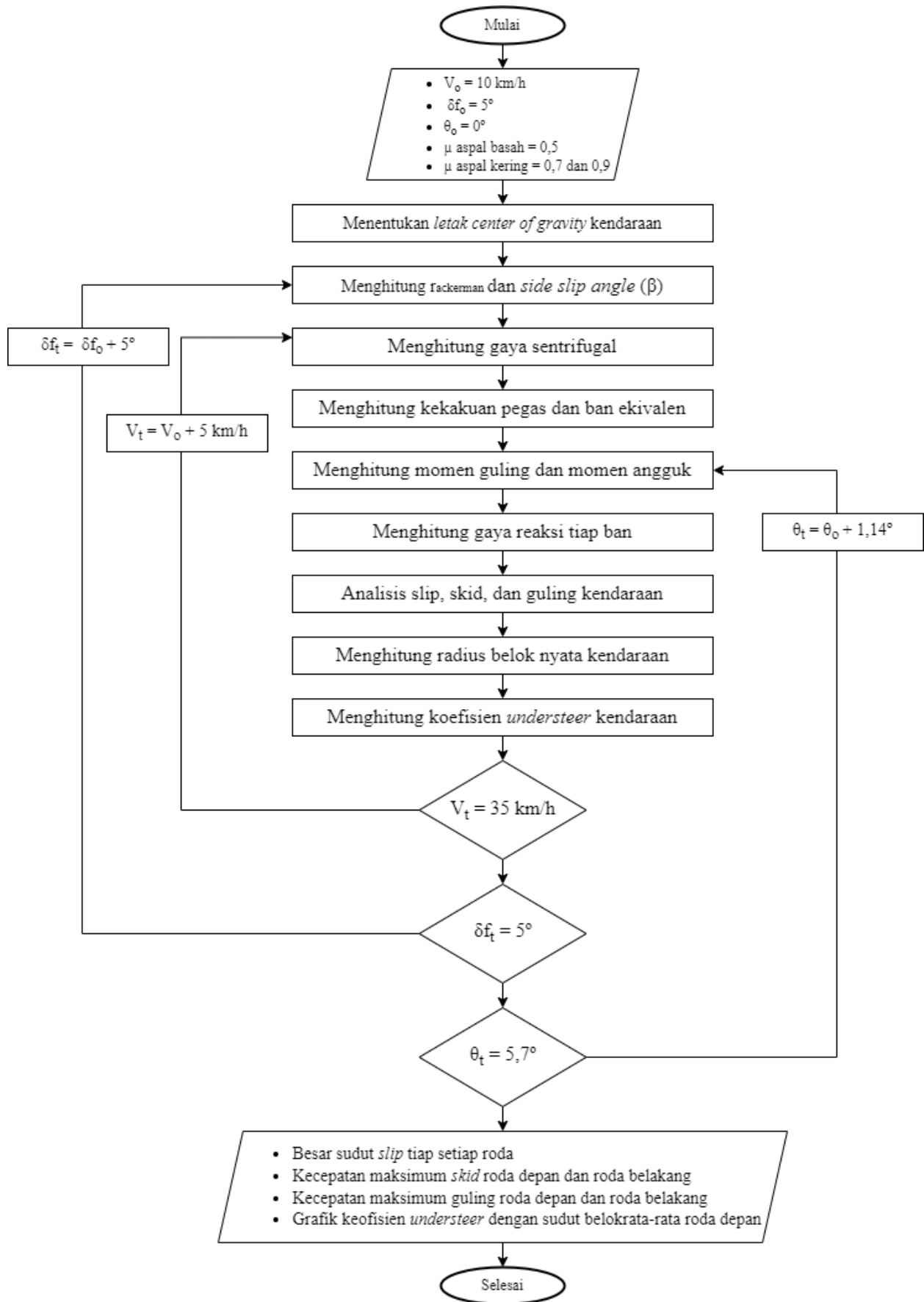
$$\gamma_p = \frac{(F_{cx} - R_a) \cdot r_c}{2 \cdot K_{eqf} \cdot L_f^2 + 2 \cdot K_{eqr} \cdot L_r^2 - W \cdot r_c}$$

$K_{eq}$  merupakan kekakuan ekivalen pegas,  $K_s$  merupakan kekakuan pegas suspensi.  $K_{teq}$  merupakan kekakuan ban

$$K_{eq} = \frac{(K_s + R_s) \cdot K_{teq}}{(K_s + R_s) + K_{teq}}$$

### 2.3. Alur Penelitian

Dalam proses perhitungan stabilitas arah belok kendaraan, langkah-langkah yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 5 di bawah.



Gambar 5. Diagram Alir Perhitungan

#### 2.4. Analisis Slip

Saat kendaraan berbelok, gaya sentrifugal akan bekerja pada kendaraan, adanya gaya sentrifugal ini juga berpengaruh terhadap reaksi pada ban. Gaya sentrifugal ke arah lateral pada ban akan menimbulkan deformasi. Sehingga putaran ban akan bergeser dan membentuk sudut yang dinamakan sudut *slip*. Faktor faktor yang mempengaruhi sudut *slip* pada roda adalah gaya lateral ( $F_y$ ), gaya normal ( $F_z$ ), tekanan ban, dan gaya longitudinal dari ban [7].

$$\alpha_{rb} = 0,3 \cdot \frac{C_{rp}}{C_{rs}} \cdot \frac{C_{rx}}{C_{ro}} \cdot [0,087935(F_{y\alpha})^{0,79008} - 0,005277(F_z)]$$

Keterangan:

- $\alpha_{rb}$  = Sudut *slip* yang terjadi pada setiap roda/ban
- $F_{y\alpha}$  = Gaya belok (lateral) yang terjadi pada setiap roda/ban
- $F_z$  = Gaya normal yang terjadi pada setiap roda/ban
- $C_{rp}$  =  $3,35 + 5,30 (P) - 0,0916 (P)^2$
- $C_{rs}$  =  $3,35 + 5,30 (P_s) - 0,0916 (P_s)^2$
- $P$  = Tekanan ban (Psi)
- $P_s$  = Tekanan standar 25 Psi

$$C_{rx} = \left[ \frac{F_{y\alpha} + 0,107927 (F_x)}{161,1398} \right]^{0,474998}$$

$$C_{ro} = \left[ \frac{F_{y\alpha}}{161,1398} \right]^{0,474998}$$

Jika:

- $\alpha_r < \alpha_f$ , kendaraan akan mengalami perilaku *understeer*
- $\alpha_r > \alpha_f$ , kendaraan akan mengalami perilaku *oversteer*
- $\alpha_r = \alpha_f$ , kendaraan akan mengalami perilaku netral

#### 2.5. Analisis Skid

*Skid* adalah kondisi terjadinya pergeseran bidang kontak antara roda dengan permukaan jalan. Pada kendaraan yang sedang berbelok, gaya ke samping timbul sehingga dapat membuat roda kendaraan dapat mengalami *skid* akibat gaya lateral yang terjadi tidak mampu ditahan oleh gaya gesek antara roda dan permukaan jalan. Jika *skid* roda belakang kendaraan terjadi sebelum roda depan mengalami *skid* ( $V_{sf} > V_{sr}$ ), maka kendaraan akan mengalami *oversteer*, dan jika *skid* roda depan kendaraan terjadi sebelum roda belakang mengalami *skid* ( $V_{sf} < V_{sr}$ ), maka kendaraan akan mengalami *understeer* [6].

Kondisi kritis kendaraan mengalami skid Ketika:

$$F_{cf} = F_{zf} \cdot \mu$$

$$F_{cr} = F_{zr} \cdot \mu$$

Sehingga didapatkan persamaan untuk mendapatkan besar kecepatan maksimum agar roda kendaraan tidak mengalami skid.

$$V_{sf} = \sqrt{\frac{R \cdot g}{W} \left[ \frac{(\mu L_f \cdot W \cos \theta) - (R_a \cdot h_{gf} \cdot \mu) + (M_p \cdot \mu) + (L_f \cdot W \sin \theta)}{(L_r \cdot \cos \beta \cos \theta) - (\mu L_r \cdot \cos \beta \sin \theta) - (h_{gf} \cdot \mu \sin \beta)} \right]}$$

$$V_{sr} = \sqrt{\frac{R \cdot g}{W} \left[ \frac{(\mu L_f \cdot W \cos \theta) + (R_a \cdot h_{gr} \cdot \mu) - (M_p \cdot \mu) + (L_f \cdot W \sin \theta)}{(L_f \cdot \cos \beta \cos \theta) - (\mu L_f \cdot \cos \beta \sin \theta) + (h_{gr} \cdot \mu \sin \beta)} \right]}$$

Keterangan:

- $\mu$  = koefisien gesek antara roda dengan permukaan jalan
- $V_{sf}$  = Kecepatan maksimum kendaraan sebelum mengalami *skid* pada roda depan (m/s)
- $V_{sr}$  = Kecepatan maksimum kendaraan sebelum mengalami *skid* pada roda belakang (m/s)

Jika :

- $V_{sf} > V_{sr}$ , *skid* roda belakang akan terjadi sebelum *skid* roda depan dan kendaraan cenderung *oversteer*.
- $V_{sf} < V_{sr}$ , *skid* roda depan akan terjadi sebelum *skid* roda belakang dan kendaraan cenderung *understeer*.

#### 2.6. Analisis Guling

Kendaraan mengalami guling ketika adanya roda yang terangkat saat kendaraan sedang berbelok. Ketika salah satu depan terangkat saat kendaraan berbelok maka kendaraan sedang mengalami *understeer*, dan ketika salah satu roda

belakang terangkat saat kendaraan berbelok maka kendaraan sedang mengalami *oversteer*. Analisis guling akan menunjukkan kondisi terangkatnya salah satu roda pada kendaraan [6].

Kondisi kritis roda depan terjadi ketika  $F_{z2} = 0$ .

$$F_{z2} = \frac{L_r}{2L} (W \cos \theta + F_c \cos \beta \sin \theta) - \frac{L_r F_{c f y} \cdot h_{g f}}{L t_f} - \frac{L_r M_{g f}}{L t_f} + \frac{(F_{c x} - R_a) h_{g f}}{2L} + \frac{M_p}{2L}$$

Kecepatan maksimum agar roda depan tidak terangkat dan menyebabkan kendaraan mengalami guling dapat diketahui dengan menggunakan persamaan:

$$V_{g f} = \sqrt{\frac{R \cdot g}{W} \cdot \frac{(L_r \cdot W \cos \theta \cdot t_f) + (2 \cdot L_r \cdot \frac{L_r}{L} \cdot h_{g f} \cdot W \sin \theta) - (2 \cdot L_r \cdot M_{g f}) - (R_a \cdot h_{g f} \cdot t_f) + (M_p \cdot t_f)}{(2 \cdot L_r \cdot \frac{L_r}{L} \cdot h_{g f} \cdot \cos \beta \cos \theta) - (L_r \cdot \cos \beta \sin \theta \cdot t_f) - (h_{g f} \cdot t_f \cdot \sin \beta)}}$$

Kondisi kritis roda depan terjadi ketika  $F_{z1} = 0$ .

$$F_{z1} = \frac{L_f}{2L} (W \cos \theta + F_c \cos \beta \sin \theta) - \frac{L_f F_{c r y} \cdot h_{g r}}{2L t_r} - \frac{L_f M_{g r}}{2L t_r} - \frac{(F_{c x} - R_a) h_{g r}}{2L} - \frac{M_p}{2L}$$

Kecepatan maksimum agar roda belakang tidak terangkat dan menyebabkan kendaraan mengalami guling dapat diketahui dengan menggunakan persamaan:

$$V_{g r} = \sqrt{\frac{R \cdot g}{W} \cdot \frac{(L_f \cdot W \cos \theta \cdot t_r) + (2 \cdot L_f \cdot \frac{L_f}{L} \cdot h_{g r} \cdot W \sin \theta) - (2 \cdot L_f \cdot M_{g r}) + (R_a \cdot h_{g r} \cdot t_r) - (M_p \cdot t_r)}{(2 \cdot L_f \cdot \frac{L_f}{L} \cdot h_{g r} \cdot \cos \beta \cos \theta) - (L_f \cdot \cos \beta \sin \theta \cdot t_r) + (h_{g r} \cdot t_r \cdot \sin \beta)}}$$

Keterangan:

- $V_{g f}$  = Kecepatan maksimum kendaraan roda depan terangkat (m/s)
- $V_{g r}$  = Kecepatan maksimum kendaraan roda belakang terangkat (m/s)
- $t_f$  = Lebar *track* depan (m)
- $t_r$  = Lebar *track* belakang (m)

Jika :

- $V_{g f} > V_{g r}$ , satu roda belakang terangkat sebelum satu roda depan terangkat dan kendaraan cenderung *oversteer*.
- $V_{g f} < V_{g r}$ , satu roda depan terangkat sebelum satu roda belakang terangkat dan kendaraan cenderung *understeer*.

## 2.7. Koefisien Understeer

*Understeer* indeks adalah besaran yang digunakan untuk mengidentifikasi perilaku belok pada kendaraan [6]. *Understeer* indeks dapat diketahui dengan menggunakan persamaan:

$$K_{us} = (\alpha_f - \alpha_r) \cdot \frac{R \cdot g}{V^2}$$

Keterangan:

- $R$  = Radius belok nyata kendaraan
- $\alpha_f$  = Besar sudut *slip* roda depan
- $\alpha_r$  = Besar sudut *slip* roda belakang
- $K_{us}$  = *Understeer* Indeks
- $V$  = Kecepatan belok kendaraan

Berdasarkan persamaan di atas, parameter perilaku belok kendaraan berdasarkan  $K_{us}$  adalah:

- Jika  $K_{us} = 0$ , maka kendaraan *neutral*
- Jika  $K_{us} = +$ , maka kendaraan *understeer*
- Jika  $K_{us} = -$ , maka kendaraan *oversteer*

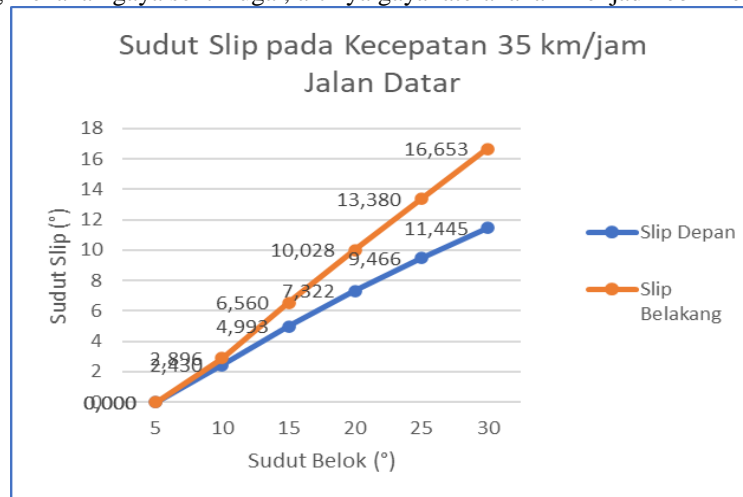
## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Analisis Slip

Gambar 6 merupakan hasil analisis slip pada bus listrik medium. Sudut *slip* terbesar terjadi ketika kendaraan berbelok pada jalan datar dengan kecepatan 35 km/jam dengan sudut belok 30°, yaitu sebesar 11,445° untuk ban depan dan 16,653° untuk ban belakang semakin besar sudut belok, maka sudut *slip* yang terjadi akan semakin besar pula, Sudut *slip* pada ban terjadi karena adanya gaya lateral. Semakin besar gaya lateral, maka sudut *slip* yang terjadi akan semakin besar. Semakin besar sudut kemiringan jalan, maka sudut



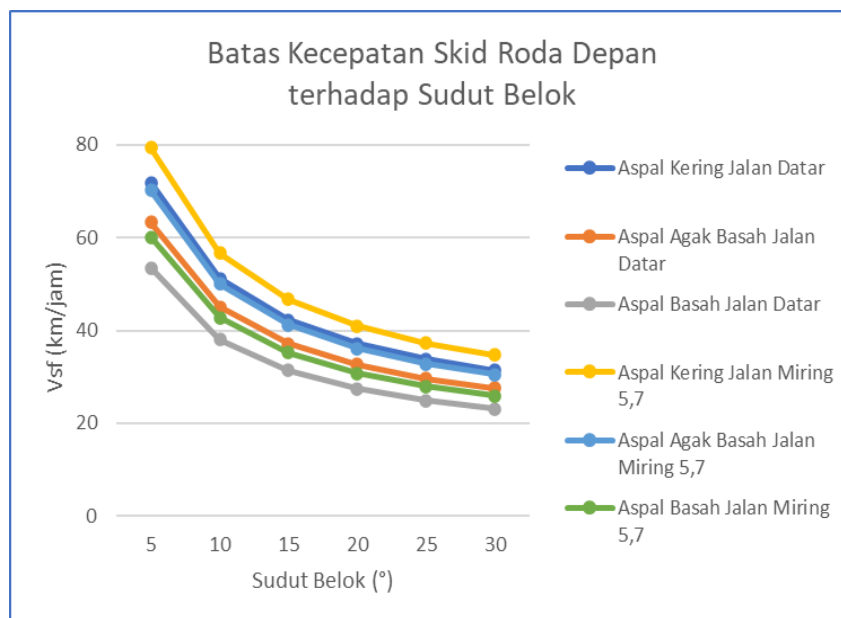
*slip* yang terjadi akan lebih kecil, karena semakin bertambah sudut kemiringan melintang jalan, semakin besar gaya berat yang menahan gaya sentrifugal, artinya gaya lateral akan menjadi lebih kecil [8].



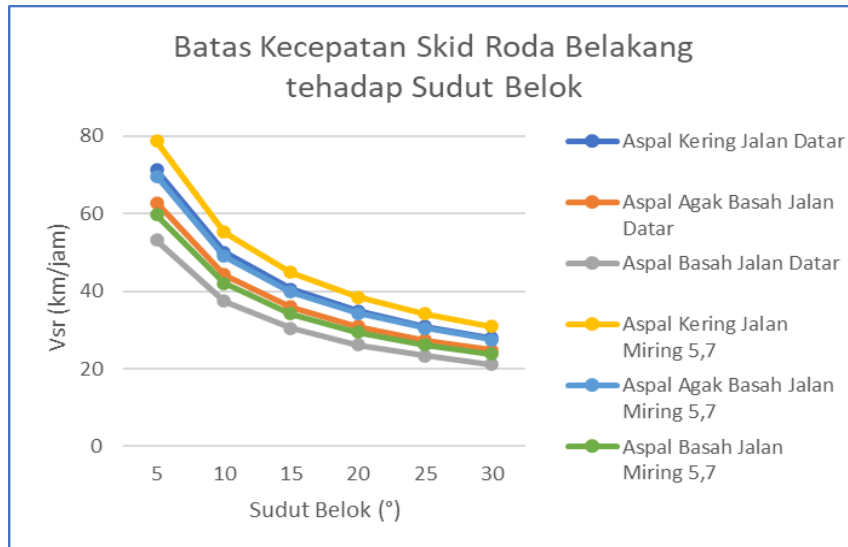
**Gambar 6.** Grafik Sudut Slip Ban Depan dan Ban Belakang terhadap Sudut Belok dengan Kecepatan 35 km/jam pada Jalan Datar

### 3.2. Analisis Skid

Gambar 7 dan 8 merupakan hasil analisis skid pada bus listrik medium. Batas kecepatan maksimum sebelum kendaraan mengalami skid paling rendah adalah ketika kendaraan berbelok pada jalan datar aspal basah dengan kecepatan 35 km/jam pada sudut belok 35°, yaitu sebesar 23,155 km/jam untuk batas maksimum roda depan dan 21,118 km/jam untuk batas maksimum roda belakang. batas kecepatan *skid* pada kendaraan dipengaruhi oleh permukaan jalan yang dilalui dan kemiringan melintang jalan. Semakin besar koefisien adhesi permukaan jalan, maka batas kecepatan *skid* akan semakin besar. Semakin besar sudut kemiringan melintang jalan, maka batas kecepatan *skid* akan semakin besar. [9].



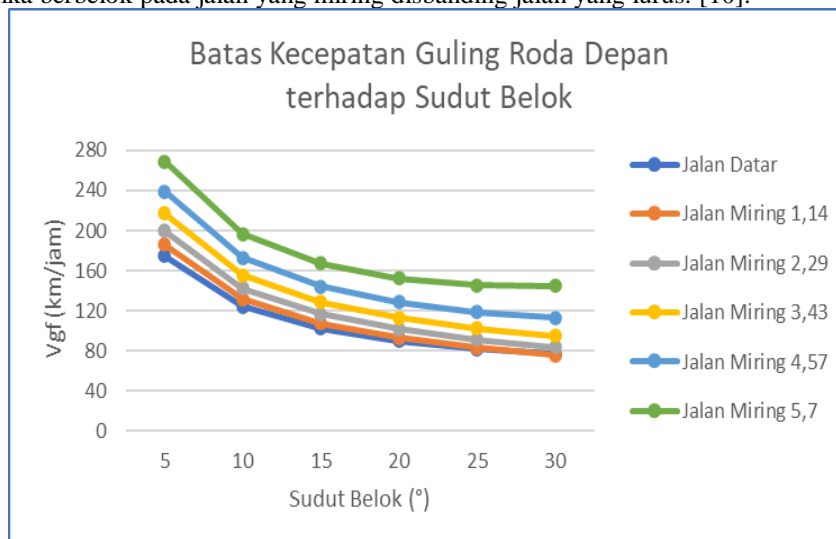
**Gambar 7.** Batas Kecepatan Skid Roda Belakang terhadap Sudut Belok



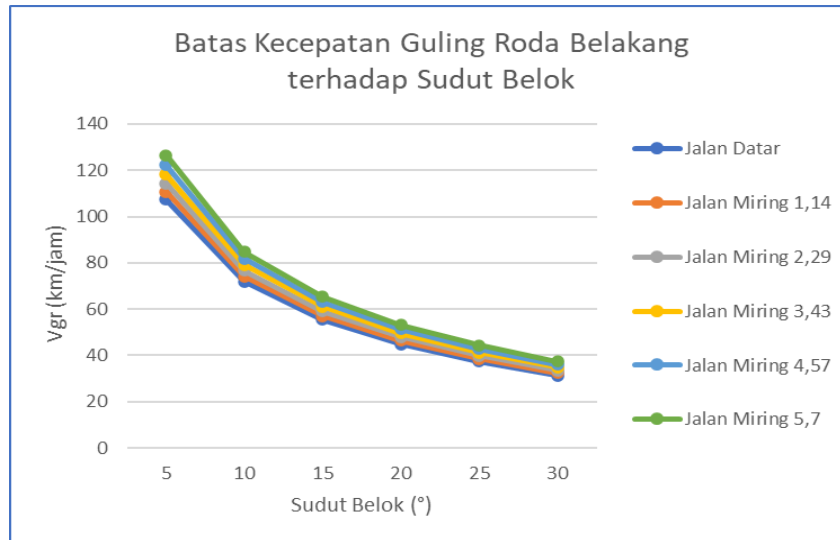
**Gambar 8.** Batas Kecepatan Skid Roda Belakang terhadap Sudut Belok

### 3.3. Analisis Guling

Gambar 9 dan 10 merupakan hasil analisis guling pada bus listrik medium. Batas kecepatan maksimum sebelum kendaraan mengalami guling paling rendah adalah ketika kendaraan berbelok pada jalan datar dengan kecepatan 35 km/jam pada sudut belok 35°, yaitu sebesar 76,491 km/jam untuk batas maksimum roda depan dan 31,280 km/jam untuk batas maksimum roda belakang. Batas kecepatan guling pada kendaraan dipengaruhi oleh kemiringan melintang jalan. Semakin besar sudut kemiringan melintang jalan, maka batas kecepatan guling akan semakin besar. Kendaraan akan lebih aman ketika berbelok pada jalan yang miring dibanding jalan yang lurus. [10].



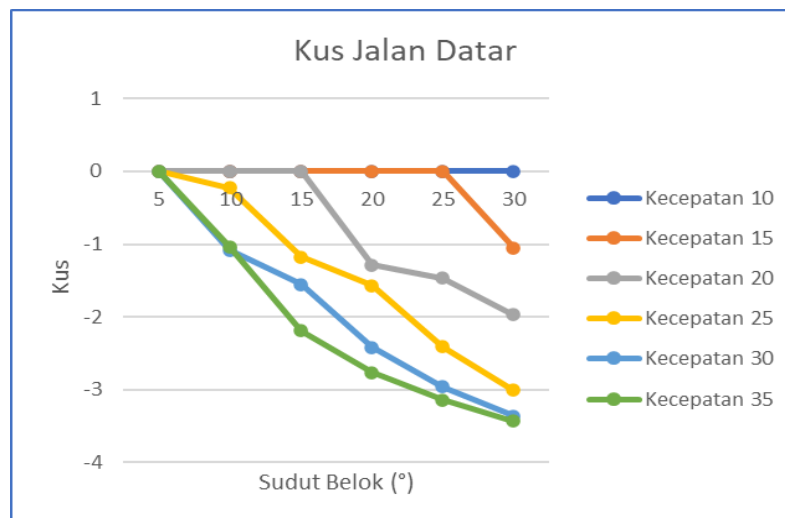
**Gambar 9.** Batas Kecepatan Guling Roda Belakang terhadap Sudut Belok



Gambar 10. Batas Kecepatan Guling Roda Belakang terhadap Sudut Belok

### 3.4. Analisis Understeer Indeks

Gambar 11 merupakan hasil analisis understeer indeks pada bus listrik medium. Bus listrik medium akan cenderung mengalami *oversteer* ketika berbelok karena sudut *slip* ban depan lebih kecil dari sudut *slip* ban belakang sehingga radius belok nyata akan lebih kecil dari radius belok *ackerman*. Koefisien *understeer* terkecil terjadi ketika kendaraan berbelok pada jalan datar dengan kecepatan 35 km/jam dengan sudut belok 30°, yaitu sebesar -3,430. Semakin besar sudut kemiringan melintang jalan, maka koefisien *understeer* akan semakin kecil [10].



Gambar 11. Grafik Koefisien Understeer terhadap Sudut Belok pada Jalan Datar

## 4. Kesimpulan

Sudut *slip* yang terjadi pada bus listrik medium, sudut *slip* ban depan memiliki nilai lebih kecil dari sudut *slip* ban belakang.

Batas kecepatan maksimum bus listrik medium sebelum skid pada roda depan memiliki nilai lebih besar dari batas kecepatan maksimum sebelum skid pada roda belakang.

Batas kecepatan maksimum bus listrik medium sebelum guling pada bagian depan memiliki nilai lebih besar dari batas kecepatan maksimum sebelum guling pada bagian belakang.

Berdasarkan koefisien *understeer*, Bus listrik medium akan cenderung mengalami *oversteer* ketika berbelok karena sudut *slip* ban depan lebih kecil dari sudut *slip* ban belakang sehingga radius belok nyata akan lebih kecil dari radius belok *ackerman*.

Berdasarkan analisis *slip*, *skid*, dan guling, kendaraan bus listrik medium akan cenderung mengalami perilaku *oversteer* karena berdasarkan hasil analisis didapatkan sudut *slip* roda depan lebih kecil dari sudut *slip* roda belakang, batas kecepatan *skid* roda depan lebih besar dari batas kecepatan *skid* roda belakang, batas kecepatan guling roda depan lebih besar dari batas kecepatan guling roda belakang.

## 5. Daftar Pustaka

- [1] Badan Pusat Statistik. Hasil Sensus Penduduk 2020. Berita Resmi Statistik, No. 7 Tahun XXIV, 21 Januari 2021.
- [2] Ika KN, Robby H. Pengujian Emisi Gas Buang Motor Bensin Empat Tak Satu Silinder Menggunakan Campuran Bahan Bakar Premium dengan Etanol. *Elemen: Jurnal Teknik Mesin*, 4(1), 22-28, 2017.
- [3] Maslakhatus Z. Analisis Pengaruh Posisi Center of Gravity terhadap Stabilitas Arah Bus *Double Deck*. Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember; 2018.
- [4] Bagus A. *Center of Gravity and Steering Dynamics of a Vehicle, Vehicle Type: 2012 Mazda 2 R A/T*. Teknik Mesin Universitas Indonesia; 2012.
- [5] Georg R. *Road Vehicle Dynamics: Fundamental and Modeling*. Boca Raton: CRC Press Taylor and Francis Group; 2003.
- [6] I Nyoman S, Bambang S. *Teknologi Konstruksi Otomotif*, 2nd Ed. Surabaya: Guna Widya; 2018.
- [7] Jaroslav JT. *Mechanics of Vehicles*. Cleaveland: Towmotor Corp; 1957.
- [8] Faisal R. Analisis Stabilitas Arah Mobil Toyota Agya dengan Variasi Jumlah Penumpang, Kecepatan Belok, Sudut Belok, dan Kemiringan Melintang Jalan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember; 2017.
- [9] Alfian RH. Analisis Stabilitas Kendaraan dan Kekuatan Pengait Bak Angkut Kendaraan Multiguna Pedesaan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember; 2017.
- [10] Maslakhatus Z. Analisis Pengaruh Posisi Center of Gravity terhadap Stabilitas Arah Bus *Double Deck*. Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember; 2018.