

PEMODELAN DAN SIMULASI DINAMIKA *HANDLING*

MOBIL LISTRIK UNS GENERASI II

Krinantyo Pamungkas^{1, a}, Didik Djoko Susilo^{2, b*} dan Ubaidillah^{3, c}

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UNS

Jl. Ir. Sutami No 36 A Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

^aimunk_pams@yahoo.co.id, ^bdjoksus_2010@yahoo.com, ^cubaid.ubaidillah@gmail.com

Abstrak

Universitas Sebelas Maret Surakarta mengembangkan sebuah mobil listrik yang diberi nama *Smart-EV.2*. Untuk mengetahui unjuk kerja mobil ini maka berbagai penelitian dan pengujian dilakukan terhadap komponen dan sistem yang diaplikasikan pada mobil listrik ini. Paper ini membahas pemodelan dan simulasi yang dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja *handling* dari mobil *Smart – EV.2* ini. Pemodelan dan simulasi yang dilakukan menggunakan software Matlab-Simulink. Pemodelan yang digunakan adalah model kendaraan 7 derajat kebebasan. Persamaan gerak diturunkan berdasarkan prinsip hukum kedua Newton. Lima tipe pengujian kendaraan dilakukan untuk tujuan validasi model yaitu *step steer* 50 km/jam, *double lane change* 80 km/jam, *slalom* 30 km/jam, *sudden braking* 60 km/jam, dan *sudden acceleration* 20 km/jam. Masukan gangguan yang dipakai pada pemodelan *handling* berupa gangguan pada arah lateral yaitu *steer* dan gangguan pada arah longitudinal yaitu pengereman dan percepatan yang diambil dari software CarSimEd. Simulasi ini mampu menampilkan respon percepatan lateral, percepatan longitudinal, *pitch rate*, *yaw rate*, *roll angle*, longitudinal slip, beban vertikal ban dan kecepatan mobil *SmartT-EV2*. Hasil simulasi Matlab-Simulink kemudian divalidasi menggunakan software CarSimEd. *Error* hasil simulasi berkisar antara 5-15%. Berdasarkan analisa hasil simulasi, diperoleh bahwa desain mobil *SmartT-EV.2* dapat melakukan semua manuver dengan aman kecuali manuver *step steer* karena memiliki kemungkinan mobil *SmartT-EV.2* terguling. Jarak pengereman mobil *SmartT-EV.2* pada *sudden braking* 60 km/jam adalah 32,4 meter.

Kata kunci : Mobil Listrik UNS, Pemodelan dan Simulasi *Handling*, Matlab-Simulink, CarSimEd

Pendahuluan

Handling adalah respon kendaraan yang terjadi akibat variabel masukan dari pengemudi. *Handling* meliputi keseimbangan kendaraan ketika melakukan manuver dan berjalan pada jalan yang lurus. Perilaku dinamik *handling* kendaraan ditentukan oleh gaya yang dibebankan pada kendaraan yang berasal dari gaya ban, gravitasi dan aerodinamik. Gaya yang akan dihasilkan oleh masing-masing sumber gangguan ini dipelajari, terutama pada waktu manuver dan kondisi keseimbangan, serta bagaimana kendaraan akan merespon gaya ini [7]. Perilaku dinamika *handling* dapat dipelajari melalui pemodelan dan simulasi [2].

Beberapa tahun terakhir ini UNS mulai mengembangkan sebuah mobil listrik yang diberi nama *Smart-EV*. Mobil *Smart-EV* yang dikembangkan saat ini merupakan mobil listrik UNS generasi II. Pengembangan mobil ini senantiasa dilakukan agar diperoleh sebuah kendaraan ramah lingkungan yang aman dan nyaman. Salah satu kriteria yang harus dimiliki mobil *Smart-EV* adalah kemampuan *handling* yang baik untuk menjamin keamanan kendaraan pada saat digunakan.

Penelitian unjuk kerja *handling* kendaraan dilakukan untuk memperoleh perilaku dinamika *handling* dan mendapatkan sifat yang kritis dari kendaraan tersebut yang antara lain meliputi: percepatan lateral,

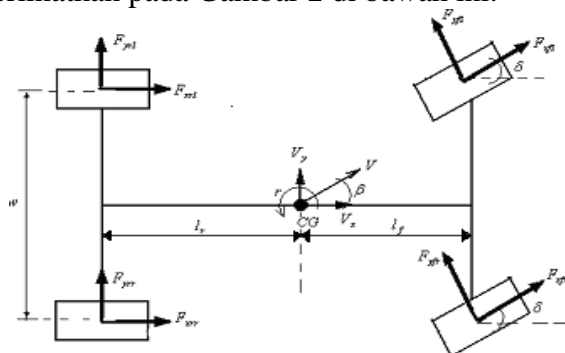
percepatan longitudinal, gerakan rotasi bodi kendaraan pada sumbu longitudinal, lateral dan vertikal dengan masukan pengereman, percepatan serta *steering*. Perilaku mobil ini selanjutnya dapat digunakan sebagai referensi dalam memperbaiki disain kendaraan serta dapat juga digunakan sebagai subsistem dalam pengembangan sistem kontrol stabilitas mobil kendaraan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk memodelkan dan mensimulasikan dinamika *handling* mobil listrik *Smart-EV.2* yang digabung dengan model ban Dugof menggunakan *software* Matlab-Simulink karena pengaruh variabel masukan pengemudi berupa pengereman, percepatan, dan *steering*. Bagian pertama tulisan ini berisi tentang penurunan persamaan gerak model kendaraan. Bagian kedua berisi tentang penyusunan model pada *software* Matlab-Simulink dan validasinya menggunakan *software* CarSim. Validasi hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil yang diperoleh menggunakan *software* CarSimEd yang sudah diaplikasikan pada industri otomotif. Sedangkan bagian ketiga merupakan simulasi unjuk kerja *handling* mobil *Smart-EV.2* UNS berdasarkan model yang telah divalidasi.

Persamaan Model Kendaraan

A. Model *Handling*

Model *handling* mobil *Smart-EV.2* yang digunakan dalam penelitian ini adalah model sistem 7 derajat kebebasan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2 Model *handling* 7 derajat kebebasan.

Pada model ini, diambil dengan menghitung 3 derajat kebebasan untuk bodi

kendaraan pada gerakan lateral dan longitudinal serta gerakan *yaw* (r) dan satu derajat kebebasan dari gerakan rotasional setiap ban. Dalam model *handling* kendaraan, diasumsikan bahwa kendaraan bergerak pada jalan yang datar. Kendaraan mengalami gerakan sepanjang sumbu longitudinal x , sumbu lateral y , serta gerakan *angular* dari *yaw* di seputar sumbu vertikal z . Gerakan pada bidang horizontal dikarakteristikan oleh percepatan lateral dan longitudinal, masing-masing dinotasikan oleh a_y dan a_x , sedangkan kecepatan pada arah lateral dan longitudinal masing-masing dinotasikan v_y dan v_x [1,2,4].

Percepatan pada sumbu longitudinal x didefinisikan sebagai berikut:

$$\dot{v}_x = a_x + v_y \dot{r} \quad (1)$$

Percepatan longitudinal didefinisikan dengan menjumlahkan semua gaya pada sumbu x sebagai berikut:

$$a_x = \frac{F_{xfl} \cos \delta - F_{yfl} \sin \delta + F_{xfr} \cos \delta - F_{yfr} \sin \delta + F_{xrl} + F_{xrr}}{m_t} \quad (2)$$

Percepatan pada sumbu lateral y didefinisikan sebagai berikut:

$$\dot{v}_y = a_y - v_x \dot{r} \quad (3)$$

Percepatan lateral didefinisikan dengan menjumlahkan semua gaya pada arah lateral sebagai berikut:

$$a_y = \frac{F_{yfl} \cos \delta + F_{xfl} \sin \delta + F_{yfr} \cos \delta + F_{xfr} \sin \delta + F_{yrl} + F_{yrr}}{m_t} \quad (4)$$

ban dinotasikan dengan F_{xij} sedangkan gaya lateral ban dinotasikan dengan F_{yij} . Indeks (i) mengindikasikan ban depan/*front* (f) atau belakang/*rear* (r) sedangkan indeks (j) mengindikasikan ban kiri/*left* (l) atau kanan/*right* (r). Sudut *steering* roda dinotasikan oleh δ , *yaw rate* dengan \dot{r} dan m_t menotasikan massa total dari kendaraan [1,2,4].

Kecepatan longitudinal dan lateral dari kendaraan v_x dan v_y dapat diperoleh dengan

mengintegrasikan \dot{v}_x dan \dot{v}_y . Kecepatan longitudinal dan lateral ini dapat digunakan untuk memperoleh *side slip angle* yang dinotasikan oleh α . Side slip angle ban depan dapat dicari dengan rumus:

$$\alpha_f = \tan^{-1} \frac{v_y + l_f \dot{r}}{v_x} - \delta_f \quad (5)$$

Side slip angle ban belakang dicari dengan rumus:

$$\alpha_r = \tan^{-1} \left(\frac{v_y - l_r \dot{r}}{v_x} \right) \quad (6)$$

Notasi α_f dan α_r adalah masing-masing *side slip angle* pada ban depan dan belakang. l_f dan l_r adalah masing-masing jarak antara roda depan dan belakang ke pusat gravitasi (CG).

Longitudinal slip ban dihitung berdasarkan komponen kecepatan longitudinal dari ban. Komponen kecepatan longitudinal pada ban depan diberikan oleh [1,2,4]:

$$v_{wxf} = V_{tf} \cos \alpha_f \quad (7)$$

Kecepatan ban depan dirumuskan:

$$V_{tf} = \sqrt{(v_y + l_f \dot{r})^2 + v_x^2} \quad (8)$$

Komponen kecepatan longitudinal pada ban belakang adalah:

$$v_{wxr} = V_{tr} \cos \alpha_r \quad (9)$$

Kecepatan ban belakang dirumuskan:

$$V_{tr} = \sqrt{(v_y - l_r \dot{r})^2 + v_x^2} \quad (10)$$

Longitudinal slip rasio pada ban depan adalah:

$$s_{af} = \frac{v_{wxf} - \omega_f R_w}{v_{wxf}} \quad \{\text{pada kondisi pengereman}\} \quad (11)$$

Longitudinal slip rasio untuk ban belakang:

$$s_{ar} = \frac{v_{wxr} - \omega_r R_w}{v_{wxr}} \quad \{\text{pada kondisi pengereman}\} \quad (12)$$

Notasi ω_r dan ω_f masing-masing merupakan kecepatan angular dari ban belakang dan depan, sedangkan R_w adalah jari-jari roda.

Gerakan *yaw* juga tergantung pada gaya ban F_{xij} dan F_{yij} yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\ddot{r} = \frac{1}{J_z} \left(\begin{array}{l} \frac{w}{2} F_{yfl} \cos \delta - \frac{w}{2} F_{yfr} \cos \delta + \frac{w}{2} F_{xrl} - \frac{w}{2} F_{xrr} - \frac{w}{2} F_{yfl} \sin \delta + \\ \frac{w}{2} F_{yfr} \sin \delta + l_r F_{yrl} + l_r F_{yrr} - l_f F_{yfl} \cos \delta - l_f F_{yfr} \cos \delta - \\ l_f F_{yfl} \sin \delta - l_f F_{yfr} \sin \delta \end{array} \right) \quad (13)$$

Notasi J_z adalah momen inersia di seputar sumbu z. Gerakan *roll* dan *pitch* sangat tergantung pada percepatan longitudinal dan lateral. Massa *sprung* yang dinotasikan dengan m_s harus dipertimbangkan dalam perhitungan yang mempengaruhi *handling* pada gerakan *pitch* dan *roll* sebagai berikut [1]:

$$\ddot{\phi} = \frac{-m_s h_{cg} a_y + \phi (m_s g h_{cg} - k_\phi) + \dot{\phi} (-\beta_\phi)}{I_{xx}} \quad (14)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-m_s h_{cg} a_y + \theta (m_s g h_{cg} - k_\theta) + \dot{\theta} (-\beta_\theta)}{I_{yy}} \quad (15)$$

I_{xx} dan I_{yy} masing-masing adalah momen inersia *roll* dan *pitch*, sedangkan h_{cg} adalah jarak pusat *roll* dan *pitch* ke pusat gravitasi.

B. Torsi Pengereman dan Percepatan

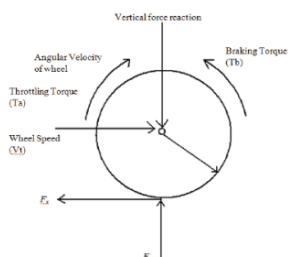
Penjumlahan torsi pada poros roda depan dan belakang digambarkan dalam persamaan berikut:

$$F_{xf} R_w - T_{bf} + T_{af} = I_\omega \dot{\omega}_f \quad (16)$$

$$F_{xr} R_w - T_{br} + T_{ar} = I_\omega \dot{\omega}_r \quad (17)$$

Kecepatan angular roda depan dan belakang dinotasikan oleh ω_f dan ω_r , I_ω adalah inersia

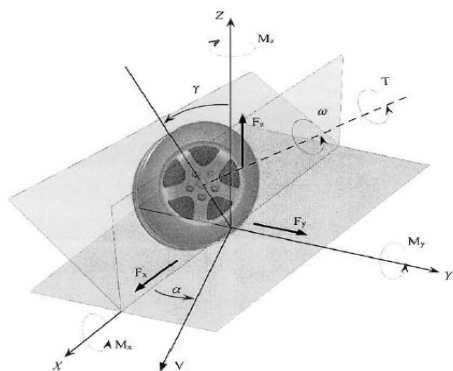
roda disekitar poros, R_ω adalah jari-jari roda, T_{bf} dan T_{br} adalah torsi pengereman yang digunakan, T_{af} dan T_{ar} adalah torsi percepatan yang digunakan pada roda ban depan dan belakang [1]. Gambar 3 menunjukkan diagram benda bebas roda.



Gambar 3. Diagram benda bebas roda.

C. Model Ban Dugoff

Model ban dapat menggambarkan perilaku ban pada berbagai kondisi pengemudian kendaraan dengan masukan gangguan berupa *steering*, pengereman dan percepatan dari pengemudi. Gaya dan momen yang bekerja pada setiap ban dihasilkan ketika terdapat gesekan antara ban dan permukaan jalan. Gaya dan momen yang dihasilkan memiliki pengaruh yang besar pada perilaku *handling* kendaraan. Dua elemen dasar dari model ban akan dipertimbangkan dalam simulasi *handling* yaitu gaya lateral dan longitudinal yang mana masing-masing tergantung pada *slip angle* dan *slip ratio* [5]. Gambar 4 memperlihatkan gaya dan momen yang bekerja pada ban.



Gambar 4 Gaya dan momen pada ban.

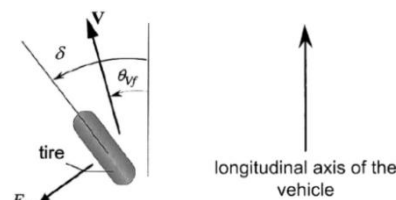
Slip ratio (S_{ai}) didefinisikan sebagai perbandingan antara slip kecepatan dengan kecepatan kendaraan. Indeks (i) mengindikasikan ban depan (f) / belakang (r).

Ekspresi yang menggambarkan *slip ratio* adalah:

$$S_{ai} = \frac{V_{vehicle} - V_{wheel}}{V_{vehicle}} \quad (18)$$

Slip angle (α_i) didefinisikan sebagai sudut yang terbentuk antara arah dari ban dengan vektor kecepatan dari kendaraan. Indeks (i) mengindikasikan ban depan (f) / belakang (r). Nilai dari *slip angle* akan bernilai kecil pada keadaan *steady cornering*. Nilai *slip angle* akan berubah secara tiba-tiba pada kondisi pengemudian yang kritis. Gambar 5 mengilustrasikan sebuah ban yang bergerak sepanjang vektor kecepatan (v) pada sisi *slip angle* (α_i). Ban disetir dengan sudut δ . Jika sudut antara vektor kecepatan (v) dan sumbu x kendaraan diperlihatkan dengan θ_{vf} , maka *slip angle* (α_i) dapat didefinisikan sebagai berikut [6]:

$$\alpha_i = \theta_{vf} - \delta \quad (19)$$



Gambar 5 Sudut slip ban

Model ban yang digunakan dalam penelitian ini adalah model ban Dugoff. Model ban Dugoff dapat digunakan untuk menghitung gaya lateral dan longitudinal pada ban. Pada model Dugoff distribusi tekanan vertikal pada permukaan bidang kontak diasumsikan seragam. Persamaan model ban Dugoff adalah sebagai berikut [6]:

Gaya longitudinal ban diberikan dengan

$$F_x = C_\sigma \frac{\sigma_x}{1 + \sigma_x} f(\lambda) \quad (20)$$

Gaya lateral ban diberikan dengan:

$$F_y = C_\alpha \frac{\tan(\alpha)}{1 + \sigma_x} f(\lambda) \quad (21)$$

Kekakuan *cornering* ban diberikan oleh C_α dan kekakuan longitudinal ban adalah C_σ . Untuk λ didapat dari:

$$\lambda = \frac{\mu F_z(1+\sigma_x)}{2\{(C_\sigma\sigma_x)^2+(C_\alpha\tan(\alpha))^2\}^{1/2}} \quad (22)$$

$$f(\lambda) = (2 - \lambda)\lambda \quad \text{jika } \lambda < 1 \quad (23)$$

$$f(\lambda) = 1 \quad \text{jika } \lambda \geq 1 \quad (24)$$

Notasi F_z adalah gaya vertikal pada ban sedangkan μ adalah koefisien gesek ban dan jalan [6].

Validasi Model

A. Data Model

Model mobil listrik Universitas Sebelas Maret Generasi II (*Smart-EV.2*) ditunjukkan pada gambar 6 di bawah ini,



Gambar 6. Model *Smart-EV.2*.

Data model ditunjukkan pada tabel 1 di bawah ini.

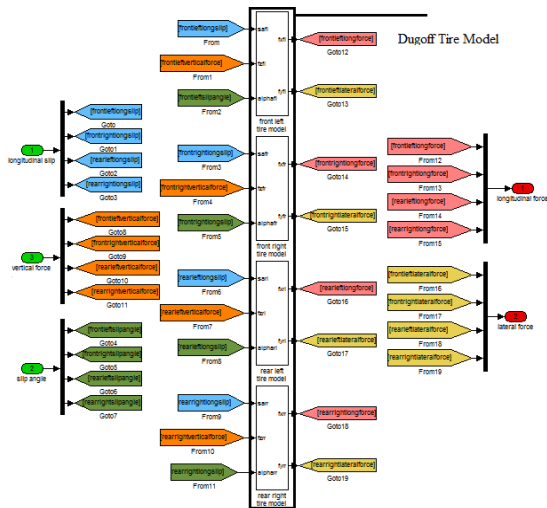
Tabel 2. Parameter mobil *Smart-EV.2*.

Simbol	Deskripsi	Nilai
m_s	Massa <i>sprung</i>	1250 kg
m_t	Massa total mobil	1400 kg
I_{yy}	Momen inersia <i>pitch</i>	1263.5 kgm ²
I_{xx}	Momen inersia <i>roll</i>	450.1 kgm ²
I_{zz}	Momen inersia <i>yaw</i>	1263.5 kgm ²
m_{ufl}	Massa <i>unsprung</i> roda depan kiri	40 kg

m_{url}	Massa <i>unsprung</i> roda belakang kiri	35 kg
m_{urr}	Massa <i>unsprung</i> roda belakang kanan	35 kg
m_{ufr}	Massa <i>unsprung</i> roda depan kanan	40 kg
K_{sfl}	Kekakuan pegas pada suspensi depan kiri	18000 N/m
K_{srl}	Kekakuan pegas pada suspensi belakang kiri	18000 N/m
K_{srr}	Kekakuan pegas pada suspensi belakang kanan	18000 N/m
K_{sfr}	Kekakuan pegas pada suspensi depan kanan	18000 N/m
C_{sfl}	Koefisien damping pada suspensi depan kiri	1500 Ns/m
C_{srl}	Koefisien damping pada suspensi belakang kiri	1500 Ns/m
C_{srr}	Koefisien damping pada suspensi belakang kanan	1500 Ns/m
C_{sfr}	Koefisien damping pada suspensi depan kanan	1500 Ns/m
K_{tfl}	Kekakuan ban depan kiri	200.000 N/m
K_{trl}	Kekakuan ban belakang kiri	200.000 N/m
K_{trr}	Kekakuan ban belakang kanan	200.000 N/m
K_{tfr}	Kekakuan ban depan kanan	200.000 N/m
l_f, l_r	Jarak poros roda depan dan belakang ke pusat gravitasi	0.95 m
h_{cg}	Jarak dari pusat gerakan <i>roll</i> dan <i>pitch</i> ke pusat gravitasi	0.95 m
w	Lebar trek roda	1.3 m

Selanjutnya persamaan - persamaan kendaraan dimasukkan ke dalam diagram blok Matlab-Simulink sebagaimana

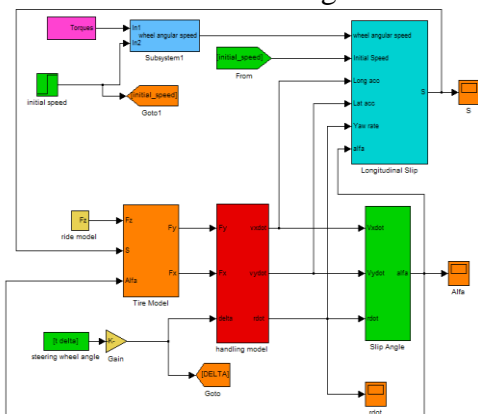
ditunjukkan pada gambar 7 dan 8 seperti berikut.



Gambar 7. Model Ban Dugoff.



Gambar 8. Model Handling Kendaraan.

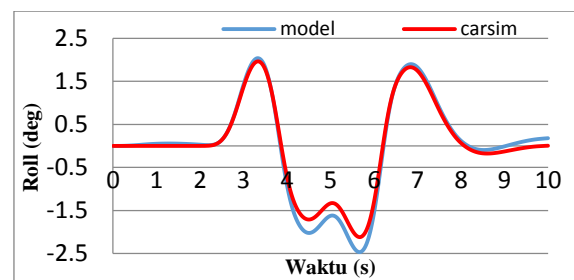


Gambar 9. Model Kendaraan Penuh.

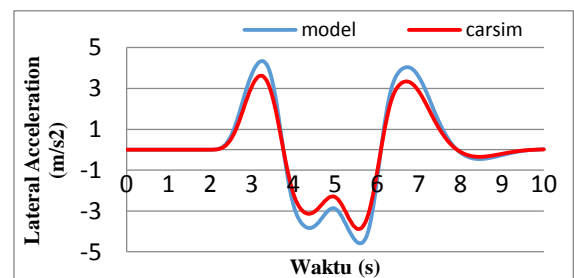
dengan kecepatan 50 km/jam, *double lane change* 80 km/jam, *slalom* 30 km/jam, *sudden braking* 60 km/jam dan *sudden acceleration* 20 km/jam. Gangguan masukan yang berupa *steering*, pengereman dan percepatan diambil dari *software* CarSimEd. Model kendaraan yang dibuat dikatakan valid apabila *error* antara hasil simulasi model dan *software* CarSimEd berkisar antara 2-15% [3].

B. Hasil Validasi

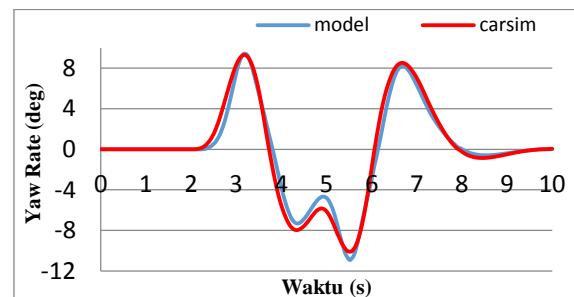
Berikut ini disajikan data-data hasil validasi model Matlab-Simulink dengan *software* CarSim.



(a) Sudut Roll bodi kendaraan



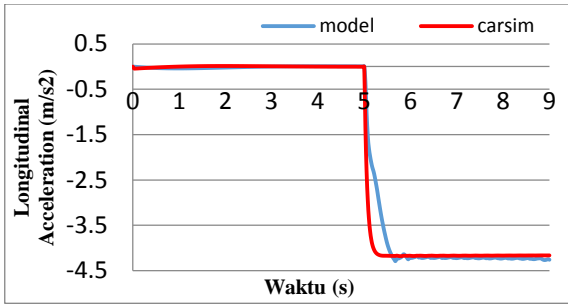
(b). Percepatan lateral



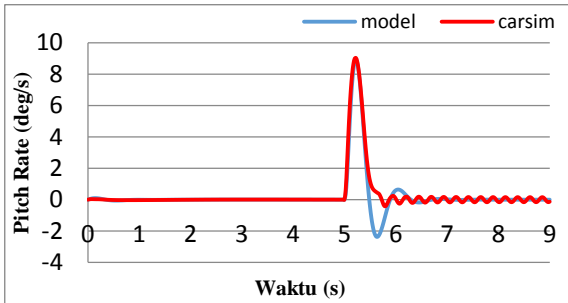
(c). Yaw rate.

Gambar 10. Manuver *double lane change* kecepatan 80 km/jam arah lateral.

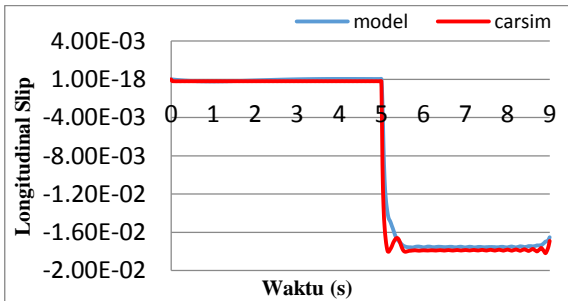
Selanjutnya model *handling* mobil akan diperiksa menggunakan *software* CarSimEd untuk tujuan validasi. Lima tipe pengujian dinamika kendaraan dilakukan yaitu *step steer*



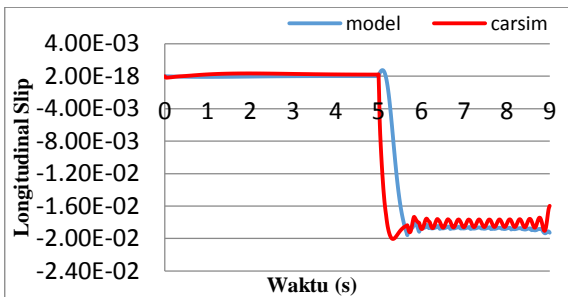
(a). Percepatan longitudinal.



(b). Pitch rate.



(c). Longitudinal slip ban depan



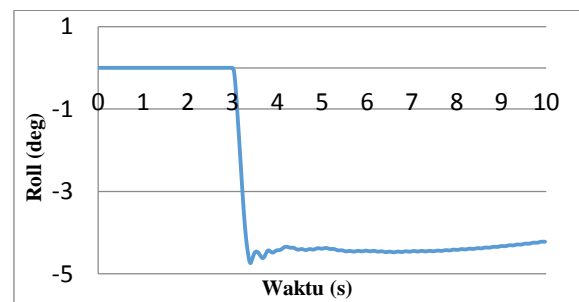
(d). Longitudinal slip ban belakang
 Gambar 11. Manuver *sudden braking* kecepatan 60 km/jam arah lateral.

Hasil validasi menunjukkan bahwa model memperlihatkan bahwa respon model *handling* Matlab-Simulink yang disusun sangat dekat dan mengikuti tren CarSimEd. Perbedaan kecil pada besarnya nilai respon disebabkan karena *body flexibility* yang diabaikan pada model. Perbedaan ini juga

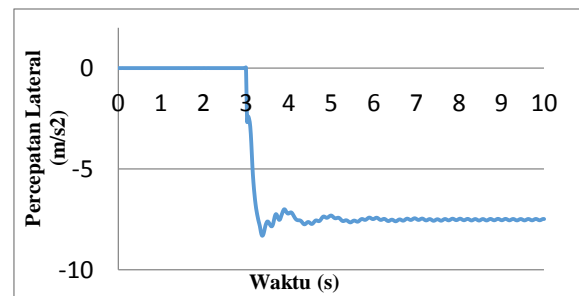
disebabkan karena asumsi pemodelan yaitu pengaruh anti *roll bar* yang diabaikan dalam model yang dibuat. *Error* yang terjadi antara hasil simulasi dengan CarSimEd berkisar antara 5-15%.

Hasil Simulasi

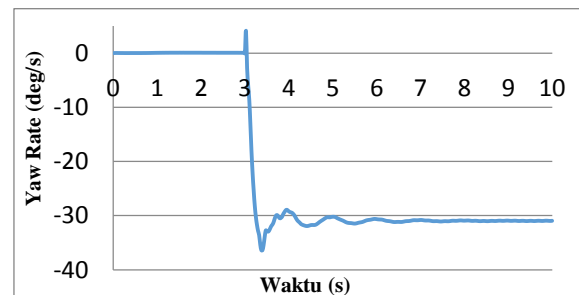
Simulasi *Smart-EV.2* dilakukan pada beberapa manuver yakni: *step steer*, *double lane change* dan *slalom* pada arah lateral dan manuver *sudden braking* dan *sudden acceleration* pada arah longitudinal. Hasilnya disajikan sebagai berikut:



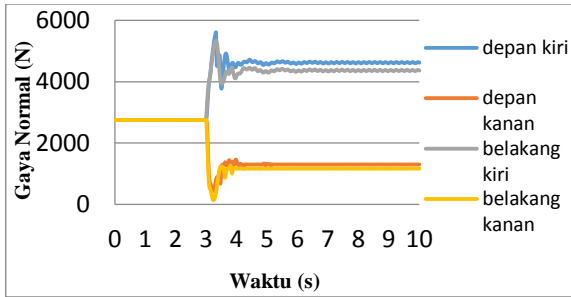
(a). Roll bodi kendaraan.



(b). Percepatan lateral.



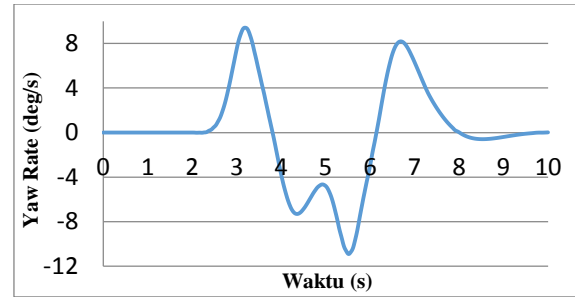
(c). Yaw rate.



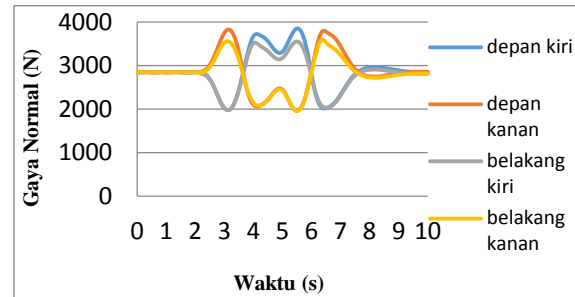
(d). Gaya normal ban.

Gambar 12. Respon mobil *Smart-EV.2* pada manuver *step steer* sudut 160° searah jarum jam kecepatan 50 km/jam

Gambar 12 menunjukkan respon mobil *Smart-EV.2* pada manuver *step steer* 160 derajat searah jarum jam dengan kecepatan 50 km/jam. Nilai maksimum *roll* bodi kendaraan mencapai 4,5 derajat, percepatan lateral mencapai $8,2 \text{ m/s}^2$ dan *yaw rate* mencapai 35 deg/s. Respon gaya normal ban menunjukkan pada ban sebelah kanan mobil *Smart-EV.2* mendekati nol. Hal ini sangat berbahaya karena memungkinkan ban terangkat dan menyebabkan mobil terguling.



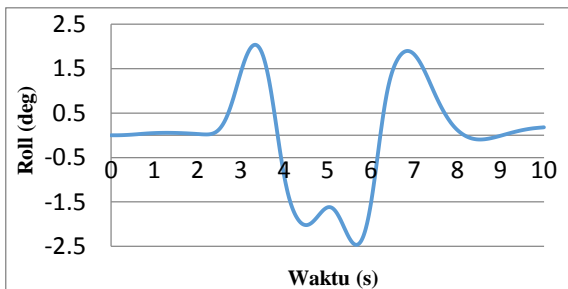
(c). Yaw rate



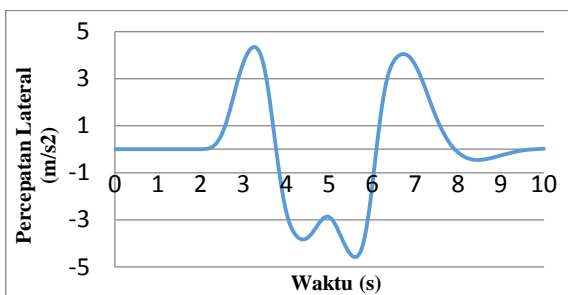
(d). Gaya normal ban

Gambar 13. Respon mobil *Smart-EV.2* pada manuver *double lane change* dengan kecepatan 80 km/jam

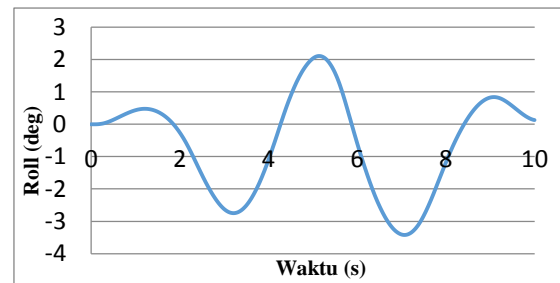
Gambar 13 menunjukkan respon mobil *Smart-EV.2* pada manuver *double lane change* dengan kecepatan 80 km/jam. Hasil simulasi menunjukkan nilai maksimum untuk respon *roll* bodi kendaraan adalah 2,5 derajat, percepatan lateral adalah 4,5 meter/detik², dan *yaw rate* adalah 11 meter/detik. Respon gaya normal ban menunjukkan manuver *double lane change* aman dilakukan mobil.



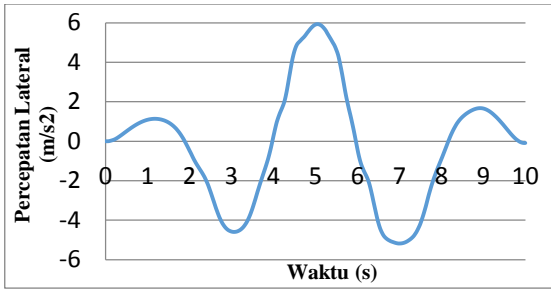
(a). *Roll* bodi kendaraan



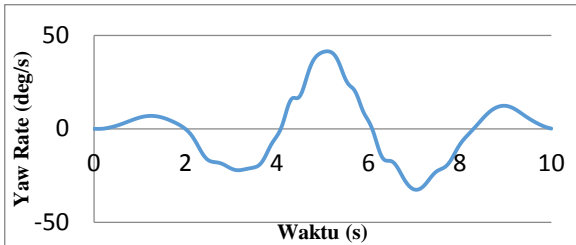
(b). Percepatan lateral



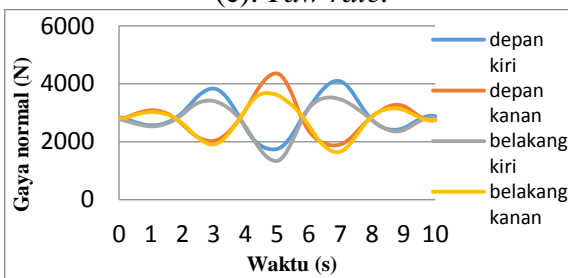
(a). *Roll* bodi kendaraan



(b). Percepatan lateral.



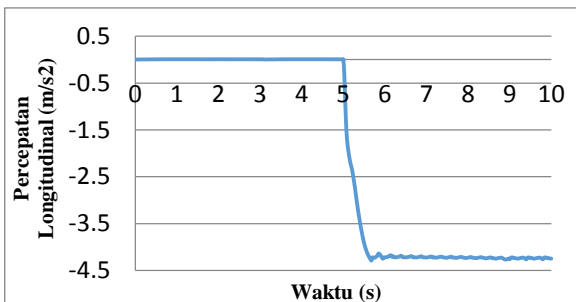
(c). Yaw rate.



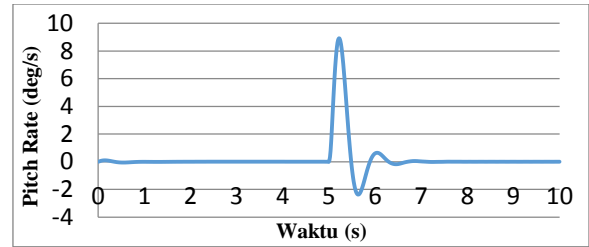
(d). Gaya normal ban

Gambar 14. Respon mobil *Smart-EV.2* pada manuver *slalom* dengan kecepatan 30 km/jam

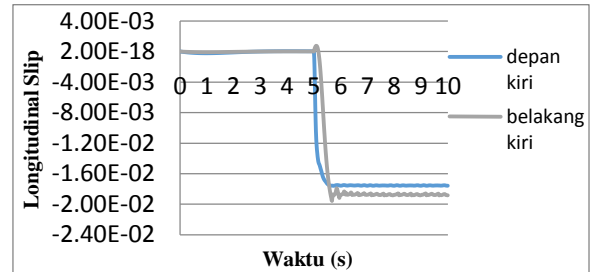
Gambar 14 menunjukkan respon mobil pada manuver *slalom* dengan kecepatan 30 km/jam. Hasil simulasi menunjukkan nilai maksimum untuk respon *roll* bodi kendaraan adalah 3,5 derajat, percepatan lateral adalah 6 meter/detik², dan *yaw rate* adalah 40 meter/detik. Respon gaya normal ban menunjukkan manuver *slalom* aman dilakukan mobil.



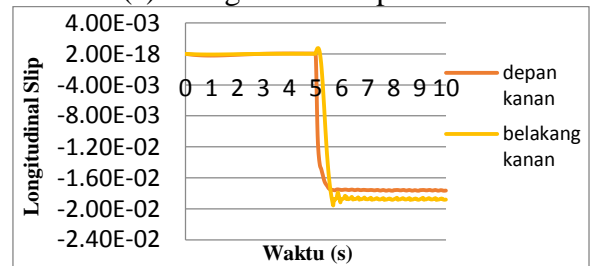
(a). Percepatan longitudinal



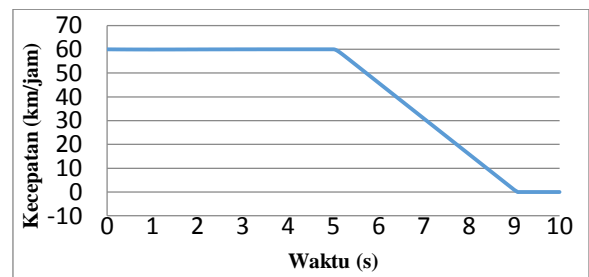
(b). Pitch rate



(c). Longitudinal slip ban kiri



(d). Longitudinal slip ban kanan

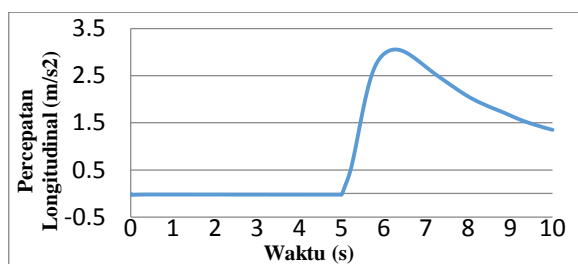


(e). Kecepatan kendaraan

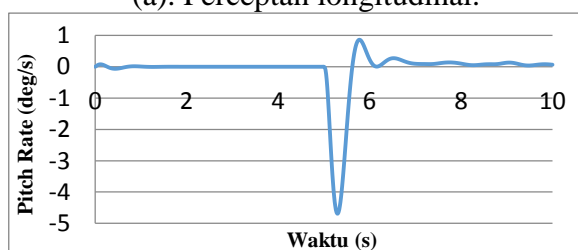
Gambar 15 Respon mobil *Smart-EV.2* pada manuver *sudden braking* dengan kecepatan 60 km/jam

Gambar 15 menunjukkan respon mobil pada pengujian *sudden braking* dengan kecepatan 60 km/jam. Hasil simulasi menunjukkan nilai maksimum untuk respon percepatan longitudinal adalah 4,3 m/s², dan *pitch rate* adalah 9 meter/detik. Respon longitudinal slip menunjukkan nilai yang relatif kecil, hal ini menunjukkan ban memiliki pencekeraman yang bagus terhadap jalan. Dari kecepatan kendaraan dapat diketahui waktu yang dibutuhkan mobil *Smart-EV.2* untuk berhenti adalah 4 detik.

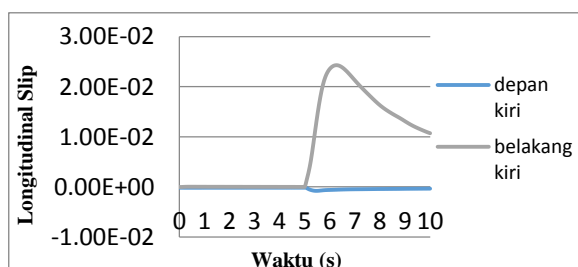
Jarak pengereman dapat diperoleh dengan mengintegrasikan dua kali percepatan longitudinal yaitu 32,4 m.



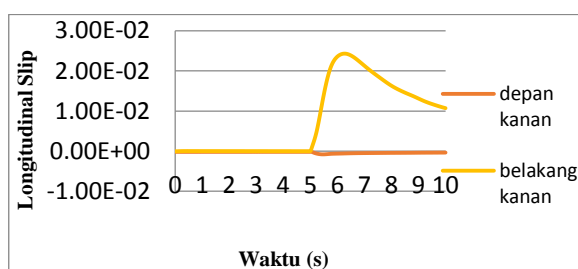
(a). Percepatan longitudinal.



(b). Pitch rate.



(c). Longitudinal slip ban kiri.



(d). Longitudinal slip ban kanan.

Gambar 16. Respon mobil Smart-EV.2 pada manuver *sudden acceleration* dengan kecepatan 20 km/jam

Gambar 16 menunjukkan hasil simulasi mobil *Smart-EV.2* pada pengujian *sudden acceleration* dengan kecepatan 20 km/jam. Hasil simulasi menunjukkan nilai maksimum untuk respon percepatan longitudinal adalah 3 m/s^2 , dan *pitch rate* adalah 4,8 meter/detik. Respon longitudinal slip menunjukkan nilai yang relatif kecil, hal

ini menunjukkan ban memiliki pencekeraman yang bagus terhadap jalan. Nilai longitudinal slip ban belakang lebih besar karena mobil *Smart-EV.2* berpengergerak roda belakang.

Kesimpulan

Model yang dirancang mampu menggambarkan perilaku dinamik *handling* mobil listrik *Smart-EV.2* dengan kesalahan respon berkisar antara 5-15 %. Besarnya nilai maksimum percepatan lateral, *roll* bodi kendaraan dan *yaw rate* pada simulasi manuver *step steer* adalah: $8,2 \text{ m/s}^2$; 4,5 derajat; 35 derajat/s, *double lane change*: $4,5 \text{ m/s}^2$; 2,5 derajat; 11 derajat/s, *slalom*: 6 m/s^2 ; 3,5 derajat; 40 derajat/s, nilai maksimum percepatan longitudinal dan *pitch rate* pada manuver *sudden braking* adalah $4,3 \text{ m/s}^2$ dan 9 derajat/s sedangkan pada *sudden acceleration* adalah 3 m/s^2 dan 4,8 derajat/s. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semua manuver dapat dilakukan mobil *Smart-EV.2* dengan aman kecuali manuver *step steer* 50 km/jam karena memiliki kemungkinan ban sebelah kanan terangkat yang dapat menyebabkan mobil terguling. Waktu yang dibutuhkan mobil *Smart-EV.2* untuk berhenti dari kecepatan 60 km/jam adalah 4 detik dengan jarak pengereman 32,4 m.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F., Ahmad, K., Hudha, H., Jamaluddin, "Adaptive PID Control With Pitch Moment Rejection For Reducing Unwanted Vehicle Motion In Longitudinal Direction", J. of Mechanical Engineering and Technology, (2010) Vol. 2, No. 2, pp. 32-42.
- [2] F.A., Kadir, K., Hudha, Z.A., Kadir, Ubaidillah. Modeling and Validation of Vehicle Handling Model Based on Wheel Trajectories (p.1-82). Malaysia: Faculty of Mechanical Engineering Universiti Teknikal Malaysia Melaka, 2009.
- [3] J., Lee, S., Jin, Heo. "Full Vehicle Dynamics for Chassis Controls", 2008, No. F2008-SC-021.
- [4] K., Hudha, Z. A., Kadir, M.R., Said, H., Jamaluddin, "Modeling, Validation and Roll Moment Rejection Control of Pneumatically Actuated Active Control

- for Improving Vehicle Lateral Dynamics Performance”, International Journal of Engineering Systems Modeling and Simulation (IJESMS), (2009), Vol. 1, No. 2/3.
- [5] M.S., Burhaumudin, P.M., Samin, H., Jamaluddin, R.A., Rahman, S., Sulaiman, “Integration of Magic Formula Tire Model with Vehicle Handling Model”, International Journal of Research In Engineering and Technology (IJRET), (2012), Vol. 1, No. 3, 2012 ISSN 2277-4378. pp. 139-145.
- [6] R., Rajamani, Vehicle Dynamics and Control, New York: Springer, 2006, pp 387-432.
- [7] T. D., Gillespie,. Fundamentals of Vehicle Dynamics, Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc, 1992, pp 1-19