

M2-015 Pemodelan dan Simulasi Dinamika Kendaraan Toyota Kijang Innova dengan Menggunakan Virtual Reality

Sabar Budidoyo¹⁾, Joga Dharma Setiawan¹⁾ dan Mochamad Safarudin²⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
e-mail: budidoyo_sabar@yahoo.com

²⁾ Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Malaysia

ABSTRAK

Perkembangan industri otomotif akhir-akhir ini mengalami kemajuan yang sangat pesat sehingga memacu persaingan antar produsen untuk membuat kendaraan dengan variasi bentuk, tipe, dan spesifikasi yang beraneka ragam agar menarik minat para konsumen dalam hal kenyamanan, unjuk kerja, dan keselamatan. Dalam mendukung perkembangan industri otomotif tersebut, diperlukan penelitian yang mampu mensimulasikan kendaraan jalan raya roda empat, terutama untuk mensimulasikan fenomena rollover dimana body kendaraan mengalami rolling yang berlebihan terhadap sumbu longitudinalnya dan dapat mengakibatkan terjadinya kecelakaan. Makalah ini menyajikan model kendaraan Toyota Innova dengan 8 derajat kebebasan dan 3 derajat kebebasan yang dibuat dengan menggunakan software Matlab/Simulink. Model kendaraan tersebut kemudian disimulasikan dengan mengambil contoh kasus dengan variasi sudut steer sebesar 45 dan 60 derajat dan juga dengan variasi kecepatan masing-masing 30 dan 50 km/jam. Validasi hasil simulasi dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi dari model yang dibuat menggunakan Matlab/Simulink dengan hasil simulasi yang dibuat menggunakan software CarSim. Untuk mempermudah visualisasi hasil simulasi, output dari simulasi ini dihubungkan dengan lingkungan virtual (virtual environment) yang dibuat dengan menggunakan VRML (virtual reality modeling language).

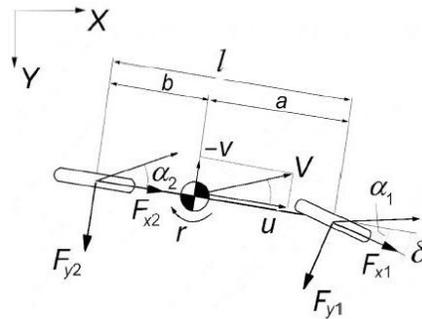
Keywords: road vehicle dynamics, handling system, virtual environment, rollover

1. Pendahuluan

Toyota Kijang Innova merupakan model kendaraan dengan konsep mobil MPV (*multi purpose vehicle*) yang diproduksi oleh Toyota. Mobil ini merupakan jenis mobil kijang Generasi V yaitu dari tahun 2004 sampai saat ini. Mobil ini merupakan jenis mobil yang diharapkan produsennya yaitu PT. Toyota Astra Motor untuk mampu menguasai pasar tidak hanya di Indonesia. Toyota Kijang Innova pun telah diekspor ke beberapa negara seperti Malaysia, Thailand, dan Brunei Darussalam dan direncanakan juga mencapai negara ASEAN lainnya, Timur Tengah dan Oseania[10]. Makalah ini menyajikan pemodelan kendaraan Toyota Kijang Innova dengan menggunakan *Matlab/Simulink* yang kemudian dihubungkan dengan *virtual reality* sehingga terciptalah sebuah komponen peralatan yang mampu mensimulasikan kendaraan roda empat serta mampu menampilkan pengalaman berkendara bagi siapapun yang menggunakannya layaknya mengendarai kendaraan sungguhan. Dalam makalah ini, dibuat model kendaraan dengan 8 derajat kebebasan dan 3 derajat kebebasan serta disimulasikan dengan variasi sudut *steer* 45 dan 60 derajat.

2. Pemodelan dengan 3 Derajat Kebebasan

Pemodelan kendaraan dengan 3 derajat kebebasan merupakan pemodelan kendaraan sederhana dengan menganggap bahwa *body* kendaraan bersifat *rigid*, tanpa adanya elemen kendaraan berupa pegas (*spring*) dan peredam (*damping*). Tiga derajat kebebasan di sini adalah dinamika pada arah longitudinal, lateral, dan juga perputaran *body* terhadap sumbu-z kendaraan (*yaw dynamics*). Gambar 1 menunjukkan skema dari pemodelan kendaraan dengan 3 derajat kebebasan. Berikut adalah persamaan-persamaan yang digunakan untuk memodelkan kendaraan roda empat dengan 3 derajat kebebasan[2]:



Gambar 1 *Bicycle Model* dengan tiga derajat kebebasan.[2]

$$m(\dot{u} - vr) = \sum F_{La} \quad (1)$$

$$m(\dot{v} + ur) = \sum F_{Lo} \quad (2)$$

$$I\dot{r} = \sum M \quad (3)$$

Persamaan (1), (2), dan (3) masing-masing memodelkan kendaraan untuk longitudinal, lateral, dan *yaw dynamics*, dimana $\sum F_{La}$ adalah resultan gaya pada arah longitudinal, $\sum F_{Lo}$ adalah resultan gaya pada arah lateral, dan $\sum M$ adalah resultan moment terhadap sumbu putar $-z$.

$$\sum F_{La} = F_{x1} \cos \delta - F_{y1} \sin \delta + F_{x2} - F_{airdrag} \quad (4)$$

$$\sum F_{Lo} = F_{x1} \sin \delta + F_{y1} \cos \delta + F_{y2} \quad (5)$$

$$\sum M = a(F_{x1} \sin \delta + F_{y1} \cos \delta) - bF_{y2} \quad (6)$$

Dimana δ adalah sudut *steer* ban, a dan b adalah jarak pusat ban depan dan belakang terhadap pusat massa dari kendaraan, serta $F_{airdrag}$ adalah gaya tahanan aerodinamis yang dihasilkan udara[2].

$$F_{airdrag} = \frac{1}{2} \rho A u^2 C_d \quad (7)$$

Pada Persamaan (7), ρ adalah densitas dari udara. Kondisi standar udara yang biasa digunakan untuk melakukan pengujian kendaraan mengacu pada udara dengan suhu 25°C dan tekanan 101.32 kPa [1]. Dengan mengacu pada kondisi tersebut, maka densitas dari udara ditentukan sebesar $1,225 \text{ kg} / \text{m}^3$. C_d adalah *drag coefficient* yang besarnya $0.311-0.445$ untuk kendaraan penumpang. A adalah luasan frontal

dari kendaraan. Luasan frontal dari kendaraan ini terdapat pada *range* 79-84% dari luasan yang dihitung dari perkalian dimensi lebar dan tinggi untuk kendaraan penumpang[8]. Mengacu pada hal tersebut, maka untuk menghitung luasan frontal dari kendaraan dengan *range* massa 800 – 2000 kg adalah sebagai berikut:

$$A = 1.6 + 0.00056(m - 765) \quad (8)$$

Untuk mencari besarnya komponen gaya-gaya ban, digunakan *Magic Formula Tyre Model* atau yang lebih dikenal dengan *Pajecha Tyre Model*. Formula ini menggunakan variabel berupa sudut *slip* untuk menghitung gaya pada arah lateral, serta menggunakan *slip ratio* untuk menghitung gaya pada arah lateral. Untuk model dengan 3 derajat kebebasan ini, sudut *slip* dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut[5]:

$$\alpha_1 = \delta - \frac{v+ar}{u} \quad (9)$$

$$\alpha_2 = - \frac{v-br}{u} \quad (10)$$

$$K_i = \frac{u - r_{tyre} \Omega_i}{u} \quad (11)$$

Pada Persamaan (9) sampai dengan Persamaan (11), Ω_i adalah kecepatan *angular* dari ban dan r_{tyre} adalah radius dari ban. Perhitungan nilai *slip* gabungan digunakan untuk mencari gaya-gaya ban dengan menggunakan *Magic Formula Tyre Model*[5]. Untuk menghitung nilai gabungan dari *slip* ini digunakan rumus sebagai berikut:

$$\sigma_x = \frac{K}{1+K} \quad (12)$$

$$\sigma_y = \frac{\tan \alpha}{1+K} \quad (13)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (14)$$

Hasil dari *combined slip*, σ , digunakan untuk menghitung nilai dari gaya-gaya ban. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan dua *magic formula* untuk masing-masing ban. Satu formula untuk gaya longitudinal, $F_x(\sigma)$, dan satu lagi untuk menghitung gaya lateral, $F_y(\sigma)$, formula tersebut adalah sebagai berikut:

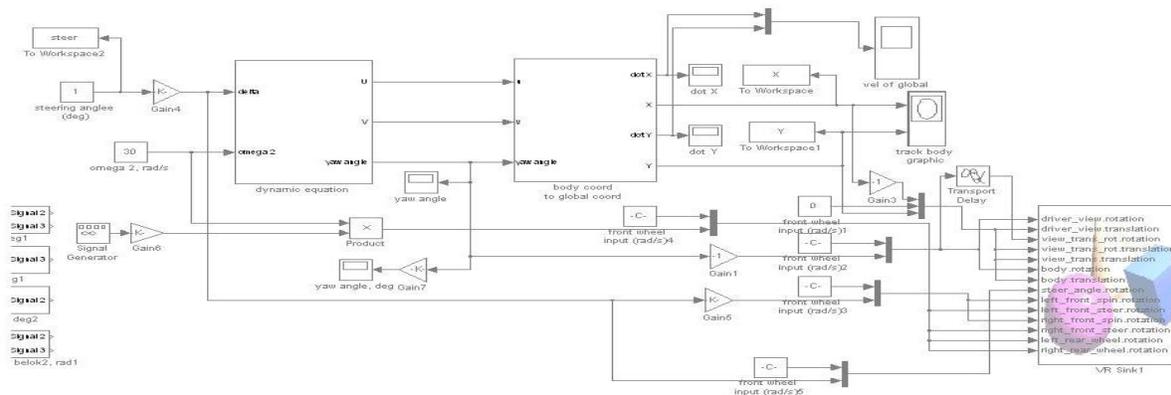
$$F(\sigma) = D \sin [C \arctan \{B\sigma - E(B\sigma - \arctan (B\sigma))\}] \quad (15)$$

Pada persamaan di atas, B , C , D , dan E adalah parameter-parameter seperti halnya yang di sebutkan pada Bagian 4. Dengan menggunakan *magic formula* tersebut dan juga variabel *combined slip*, σ , besarnya nilai dari gaya-gaya ban baik longitudinal atau pun lateral dapat dihitung sebagai berikut:

$$F_x = \frac{\sigma_x}{\sigma} F_{x0}(\sigma) \quad (16)$$

$$F_y = \frac{\sigma_y}{\sigma} F_{y0}(\sigma) \quad (17)$$

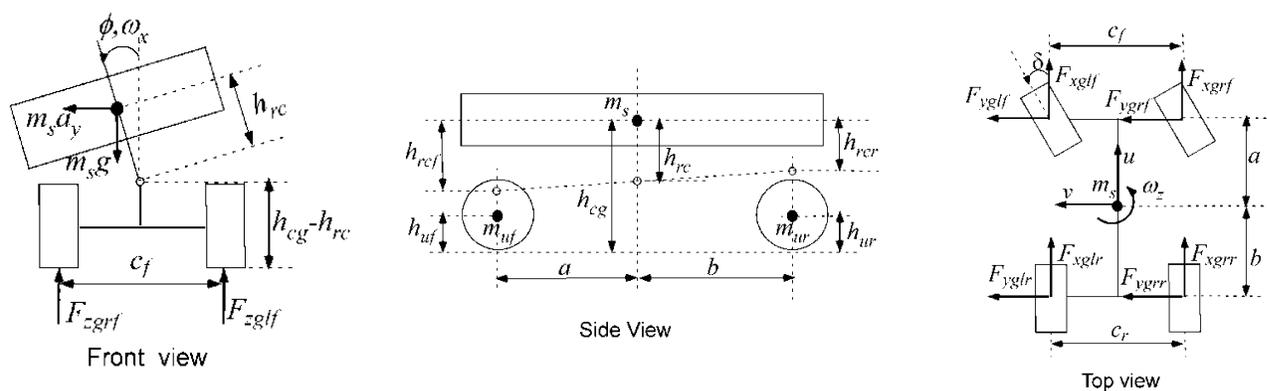
Gambar 2 menunjukkan model kendaraan dengan 3 derajat kebebasan yang dibuat menggunakan Matlab/Simulink.



Gambar 2 Model kendaraan tiga derajat kebebasan dengan menggunakan Matlab/Simulink.

3. Pemodelan dengan 8 Derajat Kebebasan

Model kendaraan dengan 8 derajat kebebasan sering digunakan sebagai penyederhanaan model dengan orde rendah untuk bahan pembelajaran dalam hal *handling* kendaraan dengan asumsi tidak melibatkan *longitudinal acceleration*. Pada Bagian 3 ini, rumus-rumus yang digunakan untuk memodelkan kendaraan dengan 8 derajat kebebasan diambil dari berbagai referensi yang hasil simulasinya tidak jauh berbeda dengan model kendaraan 14 derajat kebebasan dalam hal akurasi dan batasan-batasannya. Gambar 3 menunjukkan skema dari model kendaraan dengan 8 derajat kebebasan.



Gambar 3 Skema dari model kendaraan dengan 8 derajat kebebasan.[7]

Model tersebut memiliki empat derajat kebebasan untuk kecepatan pada *chassis* dan satu derajat kebebasan untuk tiap-tiap ban yang merepresentasikan *wheel spin dynamics*. Kecepatan pada *chassis* meliputi kecepatan longitudinal, u ,

kecepatan lateral, v , kecepatan sudut *roll*, ω_x , dan kecepatan sudut *yaw*, ω_z . Pada model ini, suspensi ban depan dan ban belakang disederhanakan dengan nilai ekuivalen dari kekakuan untuk gerak *roll* (k_{ϕ_f}/k_{ϕ_r}) dan koefisien dari *roll damping* (b_{ϕ_f}/b_{ϕ_r}).[7]

Persamaan diferensial untuk kecepatan pada *chassis* menggunakan rumus-rumus sebagai berikut[7]:

$$m_t(\dot{u} - \omega_z v) = \sum F_{xgij} + (m_{uf}a - m_{ur}b)\omega_z^2 - 2h_{rc}m\omega_z\omega_x \quad (18)$$

$$m_t(\dot{v} + \omega_z u) = \sum F_{ygi j} + (m_{ur}b - m_{uf}a)\dot{\omega}_z + h_{rc}m\dot{\omega}_x \quad (19)$$

$$J_z\dot{\omega}_z + J_{xz}\dot{\omega}_x = (F_{yglf} + F_{ygrf})a - (F_{yglr} + F_{ygrr})b + \frac{(F_{xgrf} - F_{xglf})c_f}{2} + \frac{(F_{xgrr} - F_{xglr})c_r}{2} + (m_{ur}b - m_{uf}a)(\dot{v} + \omega_z u) \quad (20)$$

$$(J_x + mh_{rc}^2)\dot{\omega}_x + J_{xz}\dot{\omega}_z = mgh_{rc}\Phi - (k_{\phi_f} + k_{\phi_r})\Phi - (b_{\phi_f} + b_{\phi_r})\dot{\Phi} + h_{rc}m(\dot{v} + \omega_z u) \quad (21)$$

Dimana,

$$h_{rc} = \frac{h_{rcf}b + h_{rcr}a}{a+b} \quad (22)$$

Pada Persamaan (18) sampai dengan Persamaan (22), gaya-gaya F_{xgij} dan $F_{ygi j}$ merupakan gaya-gaya longitudinal dan lateral pada keempat *contact patch* dari ban kendaraan tersebut dan subskrip ‘ij’ menotasikan *lf* (*left front*), *rf* (*right front*), *lr* (*left rear*), dan *rr* (*right rear*). h_{rcf} dan h_{rcr} adalah jarak vertikal pusat *roll* depan dan belakang dengan pusat gravitasi dari *sprung mass*, sehingga h_{rc} merupakan jarak vertikal dari pusat gravitasi dari *sprung mass* ke pusat *roll* dari kendaraan. *Roll inertia* dari *sprung mass* pada daerah pusat *roll* dari kendaraan adalah $J_x + mh_{rc}^2$. [7]

Untuk dinamika ban, kecepatan longitudinal maupun lateral, sebagai contoh, untuk kecepatan ban depan kanan pada *contact patch* dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut[7]:

$$u_{grf} = u + \frac{\omega_z c_f}{2} \quad (24)$$

$$v_{grf} = u + \omega_z a \quad (23)$$

Untuk gaya-gaya normal yang terdapat pada masing-masing ban, dihitung dengan menggunakan rumus-rumus sebagai berikut[7]:

$$F_{zglf} = \frac{mgb}{2(a+b)} + \frac{m_{uf}g}{2} + \left(\frac{m_{uf}h_{uf}}{C_f} + \frac{mb(h_{cg}-h_{rcf})}{C_f(a+b)} \right) (\dot{v} + \omega_z u) - \frac{(k_{\phi f}\Phi + b_{\phi f}\dot{\Phi})}{C_f} - \frac{(mh_{cg} + m_{uf}h_{uf} + m_{ur}h_{ur})(\dot{u} - \omega_z v)}{2(a+b)} \quad (24)$$

$$F_{zgrf} = \frac{mgb}{2(a+b)} + \frac{m_{uf}g}{2} + \left(\frac{m_{uf}h_{uf}}{C_f} + \frac{mb(h_{cg}-h_{rcf})}{C_f(a+b)} \right) (\dot{v} + \omega_z u) + \frac{(k_{\phi f}\Phi + b_{\phi f}\dot{\Phi})}{C_f} - \frac{(mh_{cg} + m_{uf}h_{uf} + m_{ur}h_{ur})(\dot{u} - \omega_z v)}{2(a+b)} \quad (25)$$

$$F_{zglr} = \frac{mga}{2(a+b)} + \frac{m_{ur}g}{2} - \left(\frac{m_{ur}h_{ur}}{C_r} + \frac{ma(h_{cg}-h_{rcr})}{C_r(a+b)} \right) (\dot{v} + \omega_z u) - \frac{(k_{\phi r}\Phi + b_{\phi r}\dot{\Phi})}{C_r} + \frac{(mh_{cg} + m_{uf}h_{uf} + m_{ur}h_{ur})(\dot{u} - \omega_z v)}{2(a+b)} \quad (26)$$

$$F_{zgrr} = \frac{mga}{2(a+b)} + \frac{m_{ur}g}{2} + \left(\frac{m_{ur}h_{ur}}{C_r} + \frac{ma(h_{cg}-h_{rcr})}{C_r(a+b)} \right) (\dot{v} + \omega_z u) + \frac{(k_{\phi r}\Phi + b_{\phi r}\dot{\Phi})}{C_r} + \frac{(mh_{cg} + m_{uf}h_{uf} + m_{ur}h_{ur})(\dot{u} - \omega_z v)}{2(a+b)} \quad (27)$$

Gambar 4 menunjukkan model kendaraan dengan 8 derajat kebebasan yang dibuat dengan menggunakan Matlab/Simulink.

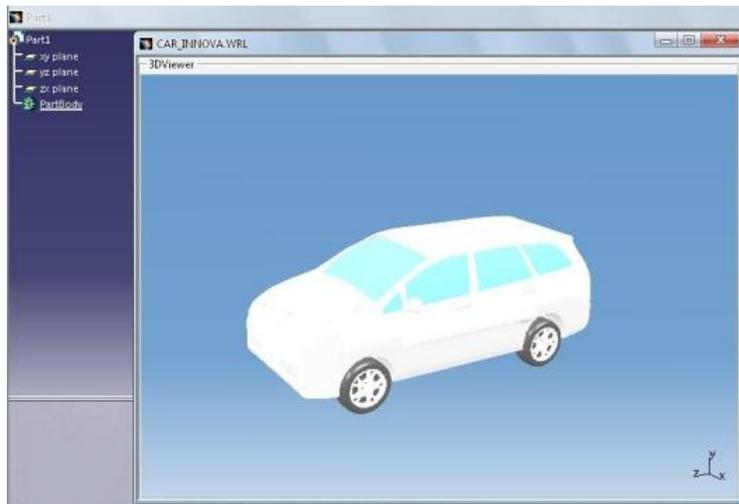
4. Pemodelan Visual Kendaraan dan Track

Model visual dari kendaraan jalan raya ini, dimaksudkan untuk memudahkan pembaca melihat hasil simulasi secara nyata pada kendaraan. Ketika istilah *virtual reality* pertama kali mulai digunakan, hal ini menimbulkan harapan yang besar tentang sebuah teknologi yang mampu menciptakan sebuah dunia khayalan yang tidak jauh berbeda dengan dunia nyata.

Virtual reality menggunakan komputer untuk membuat lingkungan tiga dimensi yang mana seseorang dapat menjelajah dan berinteraksi dengan lingkungan tersebut[4].

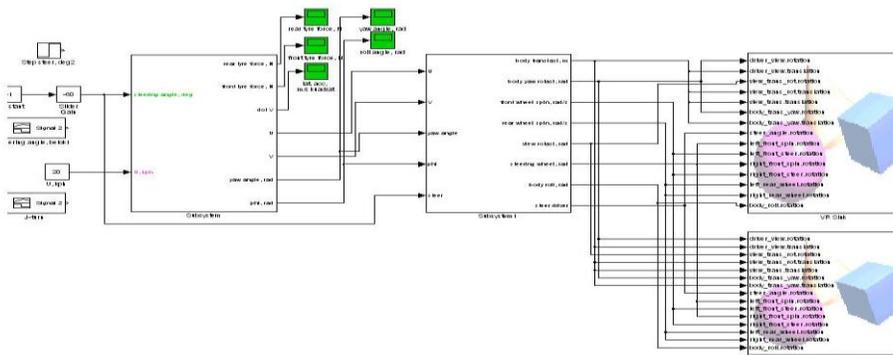
Dalam laporan tugas akhir ini, kami membuat sebuah *virtual environment* sederhana yang mampu menampilkan hasil simulasi yang pada awalnya bersifat grafik dua dimensi menjadi wujud nyata seperti halnya pada kendaraan sungguhan. Untuk membuat visualisasi hasil simulasi dengan menggunakan *virtual reality*, berikut adalah langkah-langkahnya.

Untuk membuat gambar kendaraan dalam bentuk tiga dimensi, digunakan *software CAD*. Dalam hal ini, penulis menggunakan *software Catia V5R10* untuk membantu penulis menggambar model visual dari kendaraan yang dimaksud. Gambar 5 menunjukkan gambar pembuatan model visual kendaraan dengan menggunakan *software CAD*.



Gambar 5 Model visual kendaraan menggunakan *software Catia V5R10*.

Untuk menunjang model kendaraan *virtual* seperti dijelaskan di atas, maka perlu dibangun pula sebuah lingkungan *virtual* dimana kendaraan tersebut akan disimulasikan. Tujuan dari pembuatan lingkungan ini adalah untuk menciptakan kesan nyata terhadap simulasi yang dilakukan, terutama jika akan melakukan simulasi interaktif menggunakan fasilitas *driving simulator* yang memungkinkan kita untuk berinteraksi dengan kendaraan yang kita bangun dengan menggunakan *virtual reality*.



Gambar 4 Model kendaraan 8 derajat kebebasan dengan Menggunakan *Matlab/Simulink*.

5. Parameter-parameter Kendaraan

Untuk menjalankan simulasi pada model yang telah dibuat menggunakan *Matlab/Simulink*, diperlukan parameter-parameter dari kendaraan untuk menghitung setiap model persamaan kendaraan tersebut. Parameter-parameter di sini dapat diubah sesuai dengan jenis kendaraan yang akan disimulasikan. Dalam pengerjaan tugas akhir ini, terdapat dua model yang dibuat dengan menggunakan *Matlab/Simulink*, yaitu model kendaraan dengan tiga derajat kebebasan dan model kendaraan dengan 8 derajat kebebasan. Pada kedua model tersebut diperlukan adanya parameter-parameter yang dibutuhkan untuk melakukan perhitungan. Namun demikian, kedua model tersebut memerlukan parameter yang berbeda dikarenakan adanya perbedaan kompleksitas model.

Untuk model dengan tiga derajat kebebasan, parameter yang dibutuhkan lebih sederhana jika dibandingkan dengan parameter yang dibutuhkan pada model dengan 8 derajat kebebasan. Pada dasarnya, parameter yang digunakan pada kedua model tidak jauh berbeda, namun dalam hal ini, model dengan 8 derajat kebebasan memiliki parameter-parameter yang lebih banyak dibandingkan dengan model dengan tiga derajat kebebasan. Hal ini dipengaruhi oleh banyaknya derajat kebebasan yang mampu dianalisa oleh kedua model tersebut. Semakin banyak orde dari derajat kebebasan model, maka akan semakin banyak pula parameter-parameter yang digunakan untuk menjalankan simulasi dari model tersebut.

Untuk melakukan simulasi model dengan tiga derajat kebebasan, parameter-parameter yang digunakan untuk kendaraan Toyota Kijang Innova adalah sebagai berikut:

Tabel 1 Parameter-parameter kendaraan Toyota Kijang Innova 3 DOF[9]

No.	Parameter Kendaraan	Nilai	satuan
1	Panjang total (L)	4580	mm
2	Lebar total (d)	1770	mm
3	Tinggi total (t)	1745	mm
4	Panjang <i>wheelbase</i> (l)	2750	mm
5	Jari-jari ban (r_{tyre})	315	mm
6	Massa total (m)	2210	mm
7	Jarak ban depan dengan CoG (a)*	937	mm
8	Jarak ban belakang dengan c.g (b)*	1813	mm
9	Moment inersia (I_z)*	5387	kg.m ²
10	Luasan frontal (A)	2,409	m ²

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

*nilai hasil estimasi

Untuk model kendaraan dengan 8 derajat kebebasan, parameter-parameter kendaraan yang digunakan lebih banyak dari parameter kendaraan dengan tiga derajat kebebasan di atas. Untuk model dengan 8 derajat kebebasan, parameter yang digunakan sebagai berikut:

Tabel 2 Parameter-parameter kendaraan Toyota Kijang Innova 8 DOF[9]

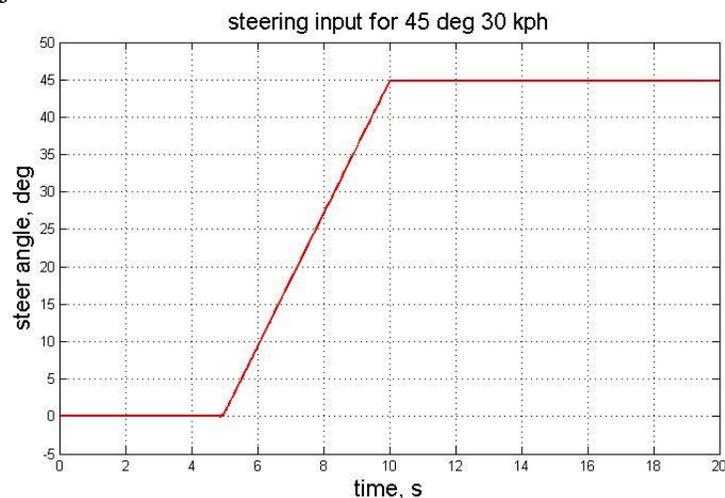
No.	Parameter Kendaraan	Nilai	satuan
1	Panjang total (L)	4580	mm
2	Lebar total (d)	1770	mm
3	Tinggi total (t)	1745	mm
4	Panjang <i>wheelbase</i> (l)	2750	mm
5	Jari-jari ban (r_{tyre})	315	mm
6	Massa total (m)	2210	mm
7	Jarak ban depan dengan c.g (a)*	937	mm
8	Jarak ban belakang dengan CoG (b)*	1813	mm
9	<i>Yaw moment of inersia</i> (I_z)*	5387	kg.m ²
10	Luasan frontal kendaraan (A)	2,409	m ²
11	<i>Unsprung mass</i> (m_{uf}, m_{ur})*	150	kg
12	<i>Sprung mass</i> (m_s)*	1910	kg
13	Jarak antara kedua ban depan (cf)	1510	mm
14	Jarak antara kedua ban belakang (cr)	1510	mm
15	<i>Roll moment of inersia</i> (j_x)*	1793	kg.m ²
16	Kekakuan suspensi	45000	N/m

	depan (k_{ϕ_f})*		
17	Kekakuan suspensi belakang (k_{ϕ_r})*	40000	N/m
18	Koefisien <i>damping</i> depan (b_{ϕ_f})*	3500	Ns/m
19	Koefisien <i>damping</i> belakang (b_{ϕ_r})*	3000	Ns/m
20	Jarak dari pusat gravitasi ke <i>roll center</i> depan (h_{rcf})*	405	mm
21	Jarak dari pusat gravitasi ke <i>roll center</i> belakang (h_{rcf})*	405	mm

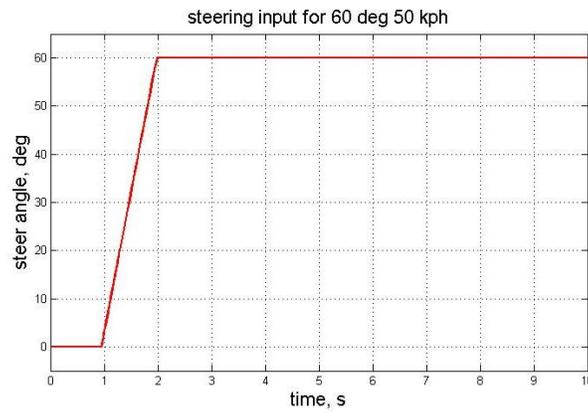
*nilai hasil estimasi

6. Hasil Simulasi

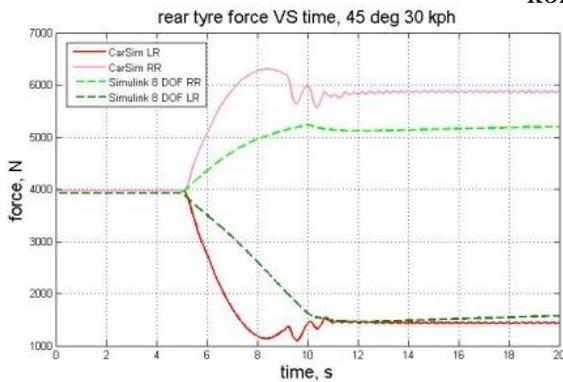
Simulasi yang dilakukan menggunakan dua variasi *input* berupa sudut *steer* sebesar 45 dan 60 derajat dengan kecepatan longitudinal konstan masing-masing 30 dan 50 km/jam. Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan *input* untuk simulasi dengan sudut *steer* masing-masing sebesar 45 derajat dan 60 derajat.



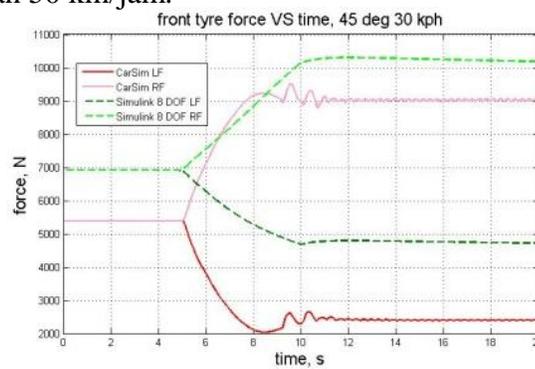
Gambar 6 *Steering input* untuk simulasi dengan sudut *steer* 45 derajat dan kecepatan longitudinal konstan 30 km/jam



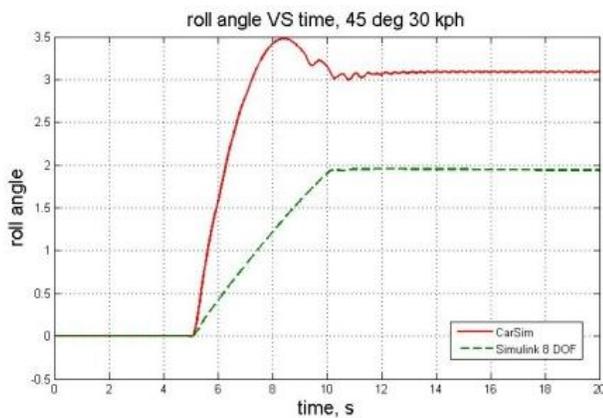
Gambar 7 *Steering input* untuk simulasi dengan sudut *steer* 60 derajat dan kecepatan longitudinal konstan 50 km/jam.



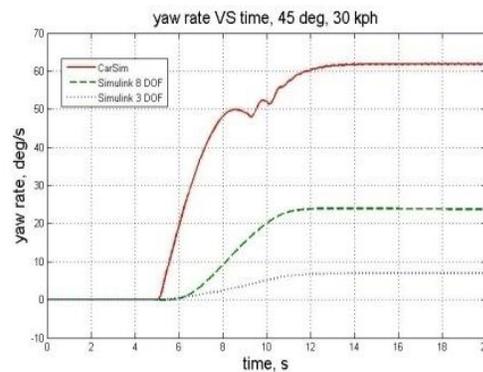
(a)



(b)



(c)

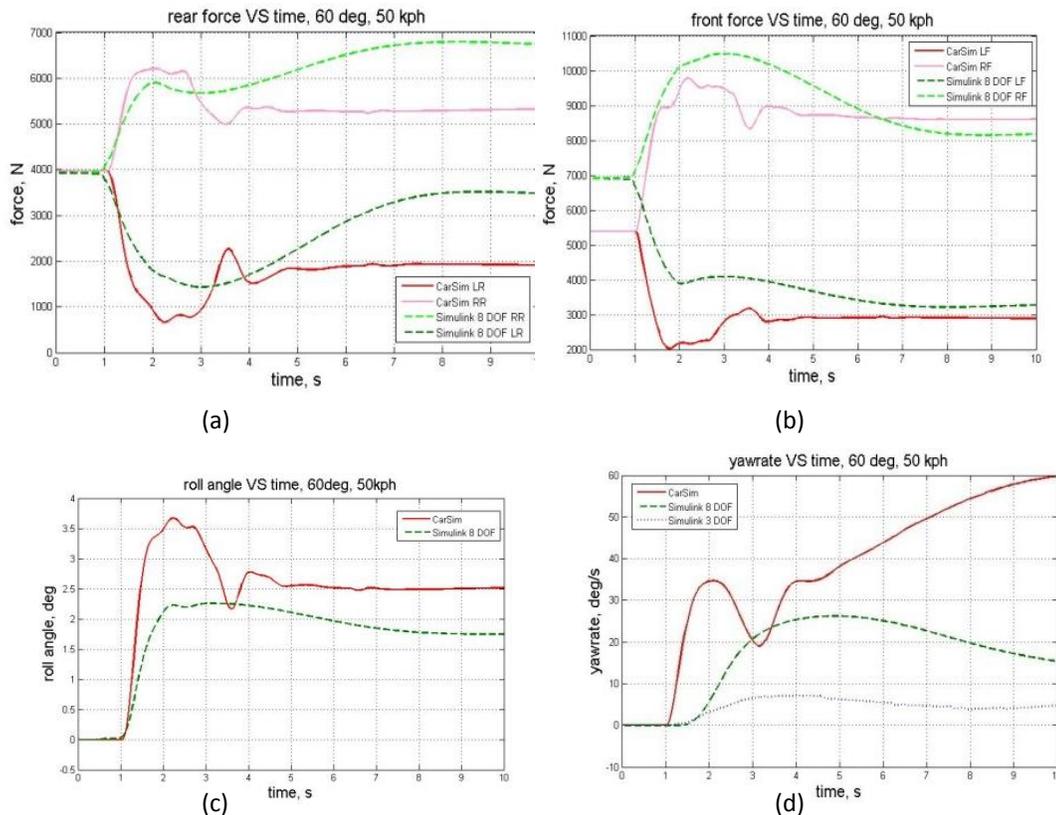


(d)

Gambar 8 (a) *rear tyre force VS time*, (b) *front tyre force VS time*, (c) *Roll anglw VS time*, (d) *Yawrate VS time*.

Gambar 8 menunjukkan hasil simulasi untuk kasus sudut *steer* 45 derajat dengan kecepatan longitudinal konstan 30 km/jam.

Pada Gambar 8 (a), terlihat bahwa gaya-gaya ban belakang hasil dari simulasi menggunakan *Matlab/Simulink* tampak berhimpit dan mendekati nilai dari hasil simulasi dengan menggunakan CarSim. Namun untuk Gambar 8 (b), (c), dan (d), grafik hasil simulasi menggunakan *Matlab/Simulink* tampak terjadi perbedaan nilai yang cukup besar, namun memiliki bentuk dan *trend* grafik yang sama seperti hasil simulasi dengan menggunakan CarSim.



Gambar 9 (a) *rear tyre force VS time*, (b) *front tyre force VS time*, (c) *Roll anglw VS time*, (d) *yaw rate VS time*.

Gambar 9 menunjukkan hasil simulasi untuk kasus sudut *steer* 60 derajat dengan kecepatan longitudinal konstan 50 km/jam. Pada Gambar 9 (a), terlihat bahwa grafik berhimpit untuk selang waktu antara 0 sampai 2 detik, kemudian pada detik ke 4 sampai ke 10 grafik hasil simulasi dengan menggunakan *Matlab/Simulink*, memiliki nilai yang lebih besar daripada grafik yang dibuat dengan menggunakan CarSim, namun dapat dibilang memiliki *trend* yang sesuai. Pada Gambar 9 (b), grafik hasil simulasi *Matlab/Simulink* memiliki nilai lebih besar daripada grafik hasil CarSim pada detik ke 1 sampai dengan detik ke 3, namun pada detik ke 6 sampai dengan detik ke 10 kedua grafik berhimpit. Sedangkan untuk Gambar 9 (c) dan (d), grafik hasil simulasi menggunakan *Matlab/Simulink* nampak memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan

dengan grafik hasil simulasi dengan menggunakan CarSim, namun demikian masih memiliki pola dan *trend* yang sama.

7. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang didapatkan, dapat disimpulkan bahwa pemodelan dinamika kendaraan Toyota Kijang Innova menggunakan *Matlab/Simulink*, mampu memberikan hasil yang cukup mewakili terhadap dinamika dari kendaraan itu sendiri. Grafik hasil simulasi juga memiliki pola atau *trend* grafik yang sama walaupun terdapat perbedaan nilai. Perbedaan tersebut dikarenakan perbedaan kompleksitas antara model yang dibuat dengan menggunakan *Matlab/Simulink* dengan model pada CarSim. Penyederhanaan model yang dibuat dengan menggunakan *Matlab/Simulink* juga merupakan faktor menentukan terhadap perbedaan nilai yang terjadi pada hasil simulasi, dalam hal ini persamaan untuk ban serta suspensi menjadi faktor yang sangat penting. Namun demikian, secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa model yang dibuat dengan menggunakan *Matlab/Simulink*, baik yang 8 ataupun 3 derajat kebebasan.

Daftar Pustaka

1. Bakker, E., Nyborg, L., and Pacejka, H.B., *Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies*, Society of Automotive Engineers, paper 870421, USA, 1987.
2. Criens, C.H.A., Dam, T.T., Luijten, H.C.J., and Rutjes, T., *Building a MATLAB based formula student simulator*, project report DCT 2006.069, Mechanical Engineering Dept., TU Eindhoven, 20 June 2006.
3. Gillespie, T.D., *Fundamental of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers Inc. USA, 1994.
4. Gutierrez, M.A., Vexo, F., Thalmann, D., *Stepping into Virtual Reality*, Springer-Verlag, London, 2008.
5. Pacejka, H.B., *Tyre and vehicle dynamics*, Elsevier Butterworth Heinemann, 2nd edition, 2006.
6. Rajamani, R. *Vehicle Dynamics and Control*, Springer Science+Business Media, Inc., 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, 2006.
7. Shim, T. and Ghike, C., *Understanding the limitations of different vehicle models for roll dynamics study*, Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2006.
8. Wong, J.Y., *Theory of Ground Vehicles*. Third Edition, John Wiley & Sons, Inc. Canada, 2001.
9. www.toyotabarua.com/2009/03/specification-kijang-innova, diakses 10 Juli 2009.
10. www.toyota.astra.co.id/company/mediarelations/media/article.php?article_id=2420, diakses 10 Juli 2009.