

PEMODELAN DAN SIMULASI DINAMIKA KENDARAAN RODA 4 DENGAN METODE BONDGRAPH UNTUK PENGEMBANGAN SIMULATOR DINAMIK

Rianto Adhy Sasongko, Ardhesa Suhilman, Leonardo Gunawan

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132
sasongko@ae.itb.ac.id

Abstrak

Pada makalah ini dibahas tentang dinamika kendaraan roda 4 dan pemodelannya dengan menggunakan metode bondgraph. Metode bondgraph adalah suatu metode pemodelan sistem dinamik yang menggunakan pendekatan manunggal. Dengan metode ini, model suatu sistem dinamik dibentuk dengan memperhatikan aliran pertukaran energi yang terjadi di anatar komponen sistem. Pendekatan manunggal yang digunakan pada metode ini memungkinkan sistem dengan domain yang berbeda dapat dimodelkan secara terintegrasi. Pada pengembangan model dinamik kendaraan roda empat, persamaan dinamika pada dua bidang, yaitu lateral dan longitudinal, dimodelkan dengan komponen bondgraph, dan dilengkapi dengan suatu persamaan kinematik pada bidang direksional. Model bondgraph ini kemudian dapat disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak SIMULINK. Untuk keperluan pengembangan suatu simulator kendaraan roda 4, suatu jenis kendaraan roda 4 dimodelkan dengan menggunakan pendekatan ini dan disimulasikan. Hasil yang diperoleh menunjukkan kesetaraan dengan fenomena fisik yang diharapkan. Pada langkah lebih lanjut, suatu konfigurasi awal platform simulator dirancang dengan memperhatikan derajat kebebasan utama yang dimodelkan oleh persamaan dinamik sistem. Platform mekanik ini kemudian dimodelkan dengan perangkat lunak SIMMECHANICS untuk dievaluasi kemampuannya dalam merekonstruksi gerak utama kendaraan roda 4 yang dikaji. Dengan simulasi ini, kemampuan dan keterbatasan konfigurasi platform dapat dianalisis.

Keywords: bondgraph, platform mekanik, simulator kendaraan

1. Pendahuluan

Karakteristik dinamik sangat mempengaruhi kinerja dan kenyamanan suatu kendaraan. Dinamika kendaraan roda empat sangat dipengaruhi oleh konfigurasi dan harga parameter, terutama yang terkait dengan sistem suspensi sifat inersia kendaraan tersebut.

Untuk mengkaji sifat dinamik kendaraan dapat dilakukan simulasi secara fisik, di mana manusia sebagai pengendara dapat langsung dilibatkan pada proses simulasi. Simulasi fisik secara langsung ini memiliki keuntungan antara lain bahwa hasil simulasi yang diperoleh tidak hanya berupa data kuantitatif, tetapi juga dapat berupa data kualitatif yang terkait dengan interaksi antara pengendara (manusia) dengan kendaraan (mesin), sebagai contohnya adalah 'feel' tentang tingkat kenyamanan yang pada beberapa aspek bersifat subyektif. Informasi kualitatif ini pada beberapa aplikasi sangat berguna, seperti pada proses desain sistem suspensi kendaraan, di mana kenyamanan pengendara

menjadi salah satu target utama yang ingin dicapai.

Untuk melakukan simulasi fisik tersebut tentunya diperlukan adanya sebuah simulator dengan platform mekanik yang dapat merekonstruksi gerakan dinamik kendaraan serealistik mungkin sesuai dengan karakteristik kendaraan tersebut, sehingga pengguna simulator ini dapat langsung merasakan gerakan/respon tersebut. Simulator dinamik ini memiliki potensi pemanfaatan yang sangat luas, antara lain sebagai sarana bantu untuk proses desain pada industri kendaraan, sebagai alat untuk mengevaluasi kemampuan mengemudi (misal untuk uji SIM), ataupun sebagai alat penelitian untuk mengkaji karakteristik dinamik kendaraan ataupun untuk meneliti interaksi antara pengendara kendaraan (manusia) dengan kendaraannya (mesin).

Penelitian yang dibahas pada makalah ini terkait dengan aktivitas untuk membangun simulasi dinamik kendaraan roda empat ini. Aktivitas ini dilakukan dalam beberapa tahap, dimulai dengan pembentukan model



representasi dinamika dan kinematika kendaraan roda empat, seperti yang telah dibahas oleh Jazar [3] dan Rajamani [7]. Untuk tahap awal, prinsip-prinsip pemodelan dinamik yang dapat ditemui pada banyak literatur adalah [4], [6], dan [8], dapat diterapkan dengan beberapa asumsi untuk menyederhanakan masalah, seperti asumsi benda kaku (*rigid*) dan pengabaian pengaruh kekakuan ban.

Pada penelitian ini pemodelan ini dilakukan dengan metode bondgraph sebagai satu metode pemodelan *multi-domain*. Penggunaan metode Bondgraph untuk keperluan pemodelan dinamik dapat dijumpai pada [4] dan aplikasinya untuk pemodelan dinamika kendaraan dikaji pada [1]. Dari hasil pemodelan ini, selanjutnya akan dibangun suatu model simulasi numerik yang akan digunakan sebagai pembangkit variabel respon dinamika kendaraan.

Sejalan dengan aktivitas pembentukan model dinamik kendaraan, kajian tentang konfigurasi platform mekanik yang dapat digunakan untuk simulator ini juga dilakukan. Beberapa konfigurasi yang telah ada, [2], [5], dan [12] dapat digunakan sebagai bahan kajian untuk mengembangkan platform simulator ini. Platform ini nantinya akan menerima informasi variabel gerak dari simulator numerik, dan bertugas menerjemahkan informasi tersebut menjadi respon fisik sebagai rekonstruksi gerak mobil yang sebenarnya. Karena itu, platform mekanik yang akan digunakan harus didesain sedemikian hingga konfigurasi platform tersebut dapat melakukan semua gerak yang terdefinisi pada model dinamik kendaraan, dengan tetap memperhatikan aspek praktikal seperti ketersediaan aktuator, sensor, antar muka, dan perangkat pendukung lainnya.

Perlu pula diperhatikan, karena platform ini berdomain mekanik, tentunya sistem ini akan memiliki sifat dinamik yang dipengaruhi oleh parameter-parameter fisiknya. Sifat dinamik ini perlu dikaji dan dipertimbangkan pada proses desain simulator secara keseluruhan. Untuk mengkaji sifat dinamik platform, pada penelitian ini sebuah model numerik dinamika platform juga akan dibangun dan disimulasikan. Selanjutnya sistem simulasi numerik dinamika kendaraan akan diintegrasikan dengan model numerik platform mekanik untuk dievaluasi secara keseluruhan. Dengan cara ini, kinerja suatu konfigurasi platform dapat dievaluasi, sehingga jika diperlukan, konfigurasinya dapat diperbaiki sebelum sistem fisik yang sesungguhnya dibuat.

Makalah ini akan membahas pemodelan dinamik kendaraan dan proses desain awal serta simulasi numerik dinamika platform mekanik, sebagai tahap awal pengembangan simulator kendaraan roda empat. Untuk itu, makalah ini akan disajikan dengan sistematika sebagai berikut.

Setelah latar belakang masalah dan tujuan penelitian dipaparkan pada bagian pendahuluan, maka

pada bagian kedua akan dibahas secara singkat teori pemodelan dengan teknik bondgraph. Pembahasan ini akan dilanjutkan dengan deskripsi tentang proses pemodelan dinamika kendaraan pada bagian ketiga. Pada bagian keempat suatu konfigurasi platform sederhana akan dipaparkan sebagai konfigurasi awal platform yang akan digunakan. Pada bagian ini akan dibahas pula tentang pemodelan numerik sistem platform ini. Pada bagian kelima, akan disajikan beberapa hasil simulasi terintegrasi yang telah dilakukan. Selanjutnya bagian keenam, yang berisi kesimpulan dan saran akan menutup makalah ini.

2. Teknik Bondgraph

Teknik bondgraph adalah suatu metode pemodelan sistem dinamik dengan menggunakan prinsip pertukaran energi antara bagian sistem yang dikaji [4]. Metode ini menggunakan pendekatan manunggal yang dapat diartikan bahwa tanpa memperhatikan domain suatu sistem, sifat dinamik sistem tersebut akan ditentukan oleh 3 parameter utama, yaitu inersia, kekakuan, dan redaman. Tiap domain (mekanikal, elektrik, hidrolis, dll) akan memiliki representasi yang berbeda terkait ketiga parameter tersebut, tetapi hubungan pertukaran energi yang direpresentasikan akan tetap sama. Dengan pendekatan ini, maka teknik bondgraph dapat mengintegrasikan sistem dengan domain yang berbeda dengan efektif.

Metode ini menggunakan notasi berupa diagram yang hampir sama seperti susunan rantai karbon pada bidang kimia. Hubungan atau arus pertukaran energi dinyatakan sebagai hubungan kausalitas, di mana arah "effort" dan "flow" selalu berlawanan, sebagaimana ditunjukkan oleh gambar di bawah.



Gambar 1. Hubungan Kausalitas: Energi mengalir dari A ke B (kiri : effort A ke B, flow B ke A; kanan : effort B ke A, flow A ke B)

Variabel energi yang digunakan pada metode ini adalah "effort (e)" sebagai representasi gaya/tekanan/beda tegangan, "flow (f)" sebagai representasi kecepatan/arus/fluid flow, "displacement (q)", dan "momentum (p)". Beberapa contoh variabel energi pada beberapa domain dapat dilihat pada Tabel 1.

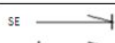
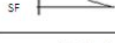

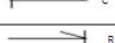



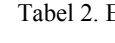
Metode ini menggunakan beberapa tipe elemen untuk mendeskripsikan komponen dinamik dengan sifat relasi energi yang berbeda. Komponen pengakumulasi, pendisipasi, ataupun sumber energi dimodelkan dengan komponen yang disebut elemen "1-port". Komponen yang bersifat mentransformasi energi disebut sebagai



elemen "2-port", sedangkan komponen yang meneruskan atau mengkonservasi energi disebut sebagai elemen "multi-port". Beberapa contoh elemen "1-port" dapat dilihat pada Tabel 2.

Variabel	Notasi	Mekanik Translasi	Mekanik Rotasi	Hidraulik	Elektrik
Effort	$e(t)$	$F(t)$: gaya	$T(t)$: torsi	$P(t)$: tekanan	$v(t)$: tegangan listrik
Flow	$f(t)$	$V(t)$: kecepatan	$\omega(t)$: kecepatan rotasi	$Q(t)$: laju aliran fluida	$i(t)$: arus listrik
Integrasi effort	$p = \int e(t).dt$	$p = \int F(t).dt$: Momentum	$H = \int \tau(t).dt$: momentum sudut	$P_p = \int P(t).dt$: integrasi tekanan	$\lambda = \int v(t).dt$: flux linkage
Integrasi flow	$q = \int f(t).dt$	$x = \int V(t).dt$: perpindahan	$\theta = \int \omega(t).dt$: sudut	$V = \int Q(t).dt$: volume	$q = \int i(t).dt$: muatan listrik
Daya	$P(t) = e(t).f(t)$	$F(t).V(t)$	$\tau(t).\omega(t)$	$P(t).Q(t)$	$v(t).i(t)$
Energi kinetik	$E(p) = \int f.dp$	$E(p) = \int V.dp$	$E(H) = \int \omega.dH$	$E(P_p) = \int Q.dP_p$	$E(\lambda) = \int i.d\lambda$
Energi potensial	$E(q) = \int e.dq$	$E(x) = \int F.dx$	$E(p) = \int f.dp$	$E(V) = \int P.dV$	$E(q) = \int v.dq$

Tabel 1. Variabel energi pada teknik Bondgraph

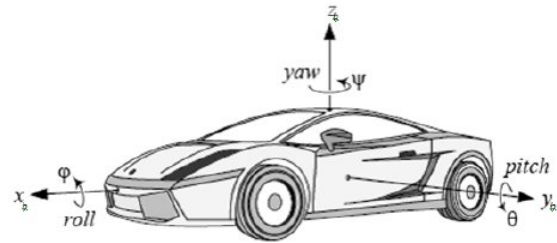
Elemen	Symbol	Formulasi	Contoh
Source	SE  SF 		Baterai, pompa
Kapasitor	 C  C	$e = \frac{1}{C} \int f dt$	Kapasitor, pegas, akumulator
Resistor	 R  R	$e = Rf$	Resistor, damper
Inersia	 I  I	$f = \frac{1}{I} \int e dt$	Massa, induktan

Tabel 2. Elemen 1-port

Dengan metode ini, maka suatu sistem dapat dimodelkan dengan memperhatikan sifat-sifat "keenergian" komponennya dan aliran/interaksi energi yang terjadi di antara komponen-komponen tersebut. Penjelasan lebih detil tentang teknik bondgraph dapat dilihat pada [4].

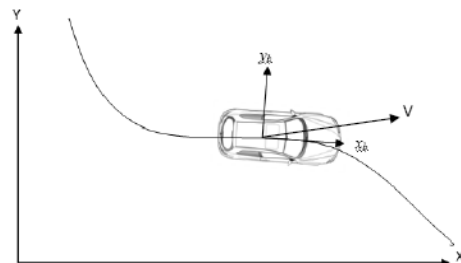
3. Pemodelan Kinematik dan Dinamik Kendaraan Roda 4

Untuk memperoleh representasi dinamik kendaraan roda empat maka perlu dilakukan evaluasi dinamika pada tiap bidang gerak kendaraan tersebut. Dengan asumsi benda rigid, maka gerakan sebuah mobil dapat didefinisikan pada bidang direksional (X-Y), lateral (Y-Z), dan longitudinal (X-Z), sesuai deskripsi tata acuan koordinat yang digunakan.



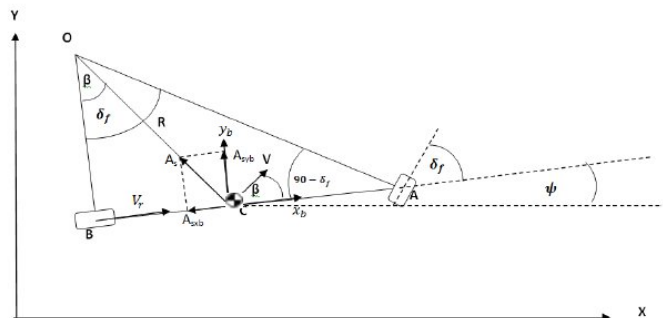
Gambar 2. Tata Acuan Koordinat Benda

Sedangkan gerak mobil pada ruang inersial dapat didefinisikan dengan menggunakan TAK inersial.



Gambar 3. Tata Acuan Koordinat Inersial (XYZ)

Pada bidang direksional, didefinisikan hubungan kinematik variabel gerak mobil, dalam hal ini dengan mengasumsikan bahwa digunakan penggerak roda belakang, kemudi roda depan, dan bahwa sudut kemudi adalah besar sudut rata-rata roda kanan dan kiri.



Gambar 4. Kinematika Mobil pada bidang direksional

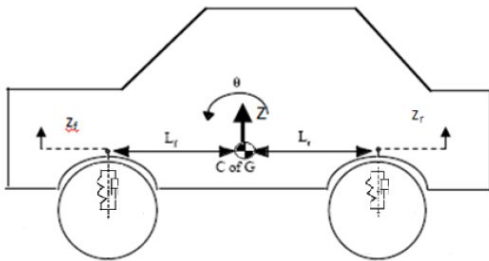
Dari diagram kinematika di atas [7], dapat diperoleh hubungan variabel kecepatan kendaraan sebagai berikut:

$$V_x = \frac{V_r \cos(\psi + \tan^{-1} \frac{BC \tan \delta_f}{AB})}{\cos(\tan^{-1} \frac{BC \tan \delta_f}{AB})} \quad (1a)$$

$$V_y = \frac{V_r \sin(\psi + \tan^{-1} \frac{BC \tan \delta_f}{AB})}{\cos(\tan^{-1} \frac{BC \tan \delta_f}{AB})} \quad (1b)$$

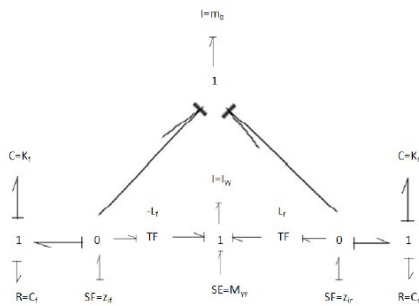
$$\dot{\psi} = \frac{V_r \tan \delta_f}{AB} \quad (1c)$$

di mana Persamaan (1a), (1b), dan (1c) berturut-turut merepresentasikan harga komponen kecepatan pada sumbu inersial x, sumbu inersial y, dan kecepatan sudut. Perpindahan posisi ataupun percepatan dengan mudah dapat diperoleh dengan mengintegralkan atau menurunkan terhadap waktu persamaan di atas. Selanjutnya, pada bidang longitudinal, persamaan dinamik kendaraan didefinisikan dengan menggunakan metode bondgraph, di mana sudut pitch θ dan perpindahan vertikal z menjadi variabel yang ditinjau.



Gambar 5. Skema dinamik pada bidang longitudinal

Dengan memperhatikan diagram pada Gambar 5, model bondgraph dinamika longitudinal dapat diperoleh secara grafis sebagaimana terlihat pada gambar di bawah



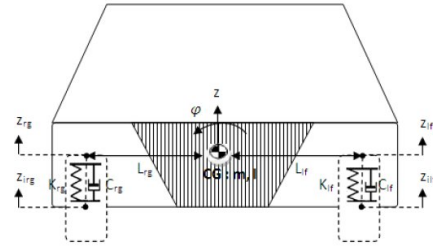
Gambar 6. Model bondgraph dinamika longitudinal

Model bondgraph di atas setara dengan persamaan gerak berikut :

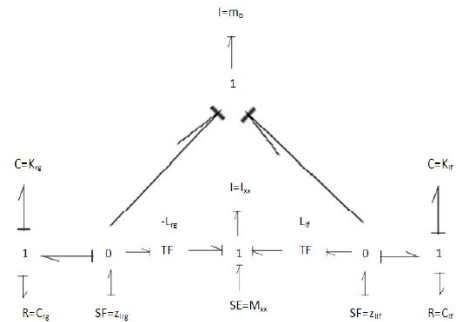
$$m_b \ddot{z} + C_f (-L_f \dot{\theta} + \dot{z} - \dot{z}_{lf}) + K_f (-L_f \theta + z - z_{lf}) + C_r (L_r \dot{\theta} + \dot{z} - \dot{z}_{lr}) + K_r (L_r \theta + z - z_{lr}) = 0 \quad (2a)$$

$$I_{y_b} \ddot{\theta} - L_f C_f (-L_f \dot{\theta} + \dot{z} - \dot{z}_{lf}) - L_f K_f (-L_f \theta + z - z_{lf}) + L_r C_r (L_r \dot{\theta} + \dot{z} - \dot{z}_{lr}) + L_r K_r (L_r \theta + z - z_{lr}) - M_{y_b} = 0 \quad (2b)$$

Dengan prosedur yang sama, dinamika pada bidang lateral dapat dimodelkan dengan metode bondgraph.



Gambar 7. Skema dinamik pada bidang lateral



Gambar 8. Model bondgraph dinamika lateral

Model bondgraph pada Gambar 8 setara dengan persamaan gerak lateral berikut, di mana variabel geraknya adalah sudut roll ϕ dan perpindahan vertikal z :

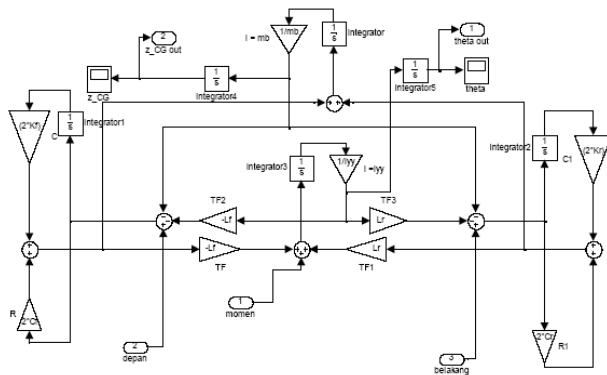
$$m_b \ddot{z} + C_{rg} (-L_{rg} \dot{\phi} + \dot{z} - \dot{z}_{irg}) + K_{rg} (-L_{rg} \phi + z - z_{irg}) + C_{lf} (L_{lf} \dot{\phi} + \dot{z} - \dot{z}_{ilf}) + K_{lf} (L_{lf} \phi + z - z_{ilf}) = 0 \quad (3a)$$

$$I_{x_b} \ddot{\phi} - L_{rg} C_{rg} (-L_{rg} \dot{\phi} + \dot{z} - \dot{z}_{irg}) - L_{rg} K_{rg} (-L_{rg} \phi + z - z_{irg}) + L_{lf} C_{lf} (L_{lf} \dot{\phi} + \dot{z} - \dot{z}_{ilf}) + L_{lf} K_{lf} (L_{lf} \phi + z - z_{ilf}) - M_{x_b} = 0 \quad (3b)$$

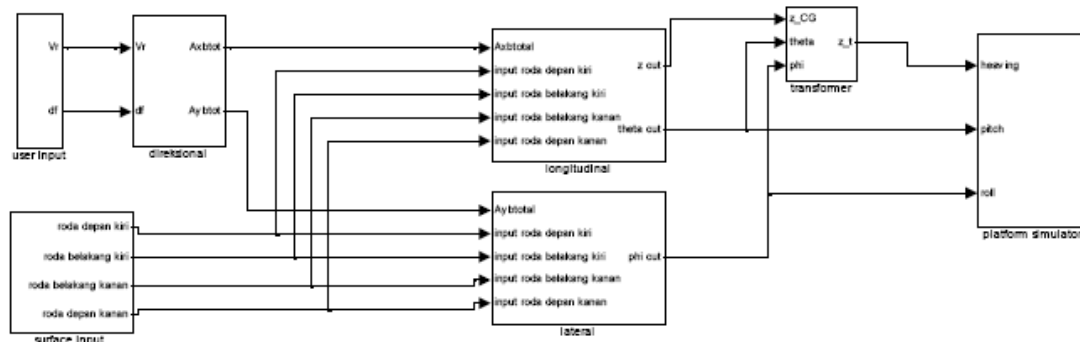
Perhatikan bahwa parameter pada persamaan (2) dan (3) memiliki arti fisis sebagaimana diindikasikan pada Gambar 5 dan 7.

Model kinematik dan model bondgraph dinamika kendaraan yang telah diperoleh selanjutnya digabungkan dan ditransformasikan menjadi suatu model simulasi numerik dengan bantuan perangkat lunak MATLAB/SIMULINK [9]. Dengan perangkat lunak ini, maka dinamika pada ketiga bidang gerak kendaraan dapat disimulasikan secara simultan. Blok diagram SIMULINK untuk dinamika kendaraan pada ketiga bidang tersebut dapat dilihat pada Gambar 10.





Gambar 9. Representasi SIMULINK model bondgraph dinamika longitudinal



Gambar 10. Model SIMULINK dinamika dan kinematika kendaraan pada 3 bidang gerak

4. Konfigurasi Awal Platform Mekanik

Untuk dapat merekonstruksi secara fisik gerak mobil berdasarkan harga variabel dihasilkan oleh simulator numerik, dirancang suatu desain mekanik simulator. Berdasarkan model matematika dan hasil simulasi, sebuah rancangan platform simulator dapat dibangun dengan mempertimbangkan derajat kebebasan utama benda yang akan disimulasikan..

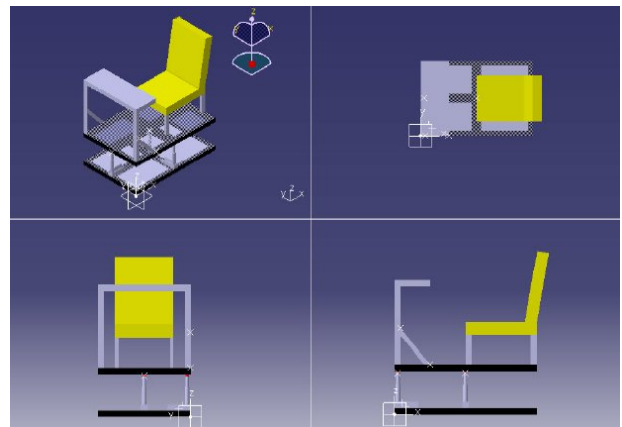
Pada tahap desain awal ini, suatu konfigurasi platform mekanik yang sederhana dipilih dengan memperhatikan gerak utama kendaraan yang akan disimulasikan. Konfigurasi yang dirancang ini memiliki tiga bagian utama, yaitu bagian bawah yang terletak di lantai disebut *base floor*, tiga buah aktuator disebut *leg*, dan bagian yang berada di atas *leg* disebut dengan *platform*.

Base floor dengan *leg* dihubungkan dengan sambungan yang tidak memungkinkan terjadinya gerakan (*fixed*), sedangkan bagian *leg* dengan *platform* dihubungkan dengan sambungan yang memungkinkan terjadinya gerakan. Untuk *leg 1*, yang berada di tengah, disambung dengan engsel yang memungkinkan terjadinya rotasi pada tiga sumbu (x, y, z). Untuk *leg 2*, yang berada di depan, disambung dengan engsel yang

memungkinkan terjadi rotasi tiga sumbu (x, y, z) serta translasi arah sumbu x . Sedangkan untuk *leg 3*, yang berada di samping, disambung dengan engsel yang memungkinkan terjadi rotasi pada tiga sumbu (x, y, z) dan translasi arah sumbu y . Dengan konfigurasi sambungan tersebut, diharapkan *platform* dapat merekonstruksi gerak *heaving*, *rolling* dan *pitching* yang diinstruksikan oleh simulator numerik.

Berdasarkan konfigurasi sederhana tersebut selanjutnya dibangun suatu model numerik dinamika platform mekanik dengan bantuan perangkat lunak MATLAB/ SIMMECHANICS. Dengan perangkat lunak ini, suatu sistem mekanik dapat dimodelkan dengan mendefinisikan jenis linkage dan joint yang terdapat pada sistem tersebut melalui perantaraan blok-blok

elementer yang sudah tersedia. Untuk platform mekanik yang dibangun, bentuk blok diagram yang diperoleh terlihat pada Gambar 12.



Gambar 11. Konfigurasi awal platform mekanik

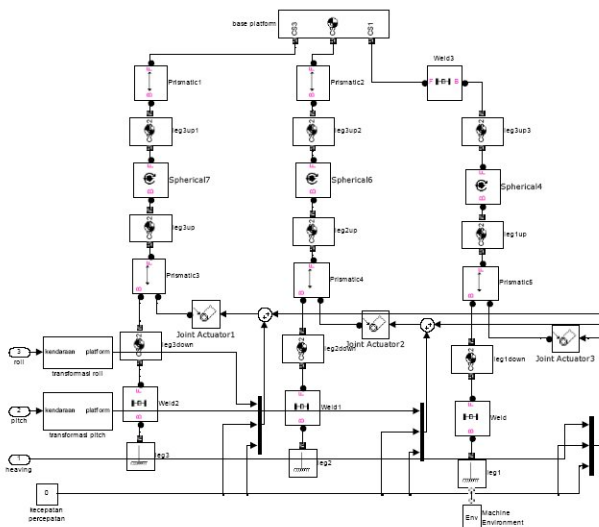
5. Simulasi Numerik Model Sistem Simulator



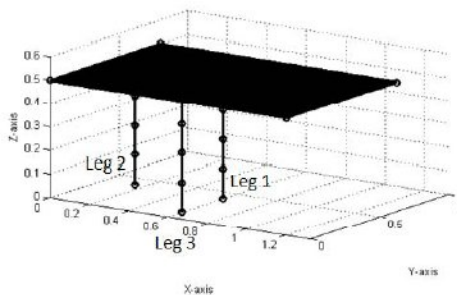
Setelah model dinamika kendaraan dan model dinamika platform diperoleh dan diintegrasikan, maka selanjutnya dilakukan pengujian dengan menyimulasikan beberapa skenario operasi/manuver kendaraan.

Beberapa contoh kasus yang disimulasikan antara lain adalah :

- (a) Kasus dengan input $V_r = 5 \text{ m/s}$ (konstan) dan sudut kemudi δ_f berubah seperti ditunjukkan pada gambar 14. Pada kasus ini akibat perubahan sudut kemudi maka akan terjadi perubahan komponen percepatan pada sumbu benda a_x dan a_y selama δ_f berubah. Hal ini juga akan mempengaruhi lintasan kendaraan, karena selama terjadi perubahan sudut kemudi, maka lintasan akan membentuk spiral ke arah dalam. Saat sudut kemudi menjadi konstan, maka komponen percepatan pada sumbu benda akan menjadi konstan (Gambar 14), dan lintasan menjadi lingkaran berjari-jari konstan (Gambar 15).



Gambar 12. Blok diagram SIMMECHANICS platform mekanik simulator



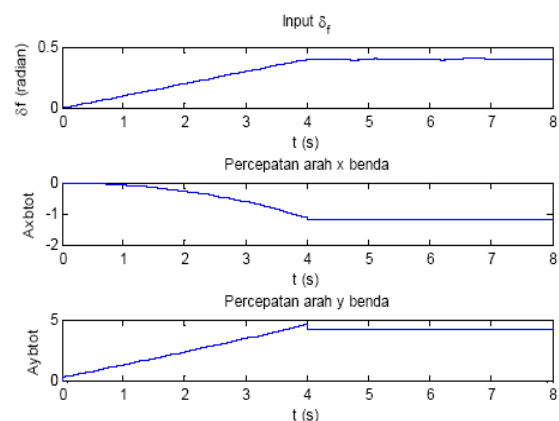
Gambar 13. Visualisasi platform mekanik pada perangkat lunak SIMMECHANICS

Hasil simulasi kasus (a) menunjukkan hubungan kinematik yang terdapat pada model numerik kendaraan. Terlihat bahwa perubahan sudut kemudi, sebagai salah satu variabel input pada bidang direksional akan mempengaruhi besar komponen kecepatan pada sumbu benda, dan sebagai akibatnya juga akan mempengaruhi variabel posisi kendaraan pada ruang inersial, sebagaimana direpresentasikan oleh Persamaan 1.

- (b) Kasus dengan input sudut kemudi $\delta_f = 0^\circ$, dan V_r mengikuti profil pada Gambar 16. Pada kasus ini kendaraan akan mengalami percepatan arah sumbu x_b yang mengakibatkan munculnya momen pitch pada sumbu y_b , sehingga θ bernilai negatif, dan z_{CG} akan memberikan respon osilatori. Hasil simulasi pada bidang longitudinal ini dapat dilihat pada Gambar 16.

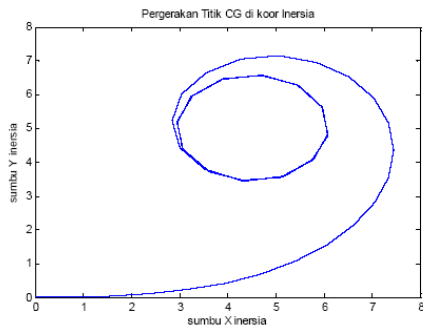
No	Simbol	Nilai	Satuan	Keterangan
1	L_f	0.916	m	jarak sumbu roda depan ke CG
2	L_r	1.556	m	jarak sumbu roda belakang ke CG
3	L_{lf}	0.825	m	jarak roda kiri ke CG pada bidang direksional
4	L_{rg}	0.825	m	jarak roda kanan ke CG pada bidang direksional
5	h	0.6	m	jarak CG ke permukaan jalan
6	I_y	2443.26	kg m^2	kekakuan putar sumbu y
7	I_x	637.26	kg m^2	kekakuan putar sumbu x
8	m_b	825.68	kg	massa benda
9	K_r	14900	N/m	kekakuan suspensi belakang
10	K_f	14900	N/m	kekakuan suspensi depan
11	K_{lf}	14900	N/m	kekakuan suspensi kiri
12	K_{rg}	14900	N/m	kekakuan suspensi kanan
13	C_r	475	Ns/m	redaman suspensi belakang
14	C_f	475	Ns/m	redaman suspensi depan
15	C_{lf}	475	Ns/m	redaman suspensi kiri
16	C_{rg}	475	Ns/m	redaman suspensi kanan

Tabel 3. Parameter kendaraan yang disimulasikan [11]



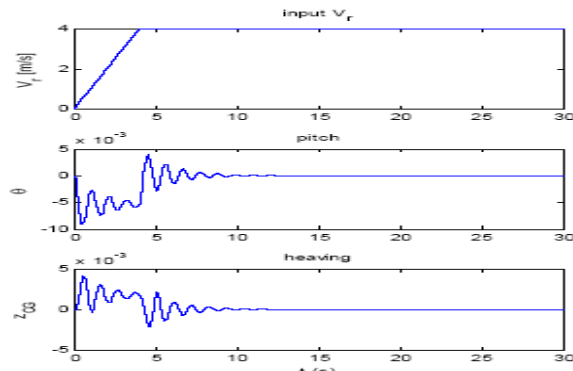
Gambar 14. Hasil simulasi kasus (a)





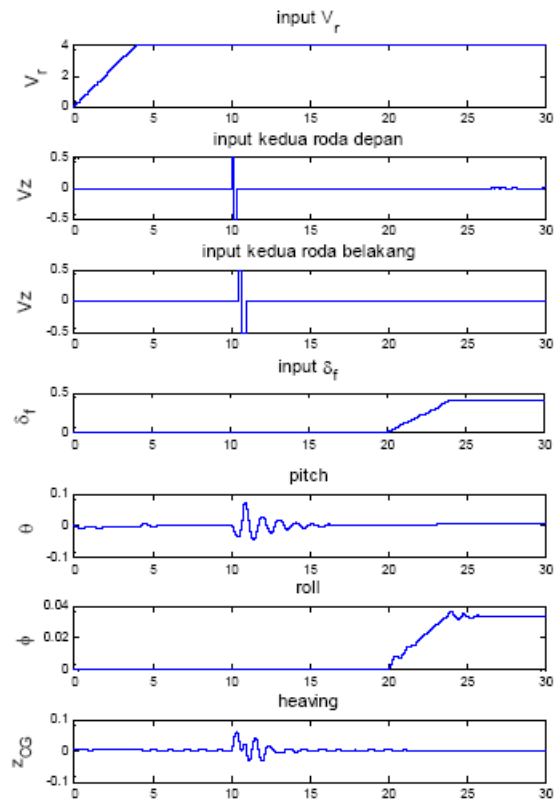
Gambar 15. Hasil simulasi kasus (a) : lintasan kendaraan

Hasil simulasi kasus (b) menunjukkan bagaimana model numerik dinamika kendaraan yang dibangun dapat merepresentasikan respon pada bidang longitudinal, dalam hal ini bagaimana perubahan kecepatan (percepatan) mengintroduksi gaya kelembaman yang kemudian membangkitkan respon sudut pitch



Gambar 16. Hasil simulasi kasus (b)

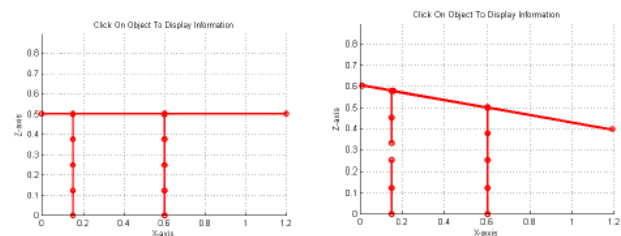
- (c) Kasus yang diberikan adalah kombinasi variasi input δ_f dan V_r , serta gangguan pada kedua roda depan dan belakang, seperti terlihat pada Gambar 17. Terlihat bahwa kendaraan akan mengalami eksitasi pada ketiga bidang gerakanya secara beruntun.



Gambar 17. Hasil simulasi kasus (c)

Hasil simulasi kasus (c) menghasilkan respon yang menunjukkan adanya kopling antara beberapa input dan respon pada bidang gerak yang berbeda.

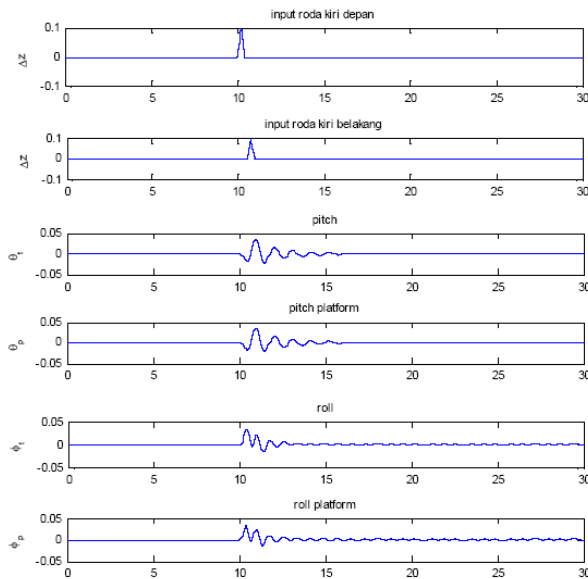
Selanjutnya, dilakukan pula simulasi pada model numerik platform mekanik melalui perangkat lunak SIMMECHANICS [10]. Beberapa hasil yang diperoleh dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 18. Simulasi Platform mekanik untuk input referensi sudut pitch $\theta = -10^\circ$

Selain itu dapat pula diamati hasil simulasi dari gabungan antara model numerik dinamik kendaraan dengan model numerik platform, di mana untuk suatu kasus gangguan tertentu (gangguan pada roda), dapat dilihat bahwa respon platform dapat mengikuti sinyal referensi dari simulator numerik.





Gambar 19. Respon gerak platform terhadap input gangguan pada roda

Hasil pada Gambar 19 menunjukkan bahwa konfigurasi platform yang digunakan mampu merekonstruksi variabel gerak fisik yang dihasilkan oleh simulator dinamik dengan baik.

6. Kesimpulan dan Saran

Proses desain simulator dengan menggunakan pendekatan pemodelan matematik dan simulasi mampu memberikan tingkat fleksibilitas baik untuk memperbaiki ataupun melakukan perubahan desain, karena dengan teknik ini kinerja dan karakteristik konfigurasi platform yang akan dikembangkan dapat dievaluasi secara efektif dan efisien.

Model numerik dinamika kendaraan yang dibangun pada penelitian ini, dapat mengolah dan menghasilkan variabel gerak kendaraan dengan baik, dan secara kualitatif cukup realistis. Selain itu kopling respon dinamik antara bidang gerak yang berbeda dapat diwujudkan dan teramati pada hasil simulasi. Selain itu dapat dilihat bahwa konfigurasi awal platform yang dipilih dapat merekonstruksi respon dinamik sistem secara fisik dengan baik.

Pada tahap pengembangan selanjutnya akan studi pengaruh parameter platform mekanik terhadap kinerja simulator secara keseluruhan perlu dilakukan. Model dinamika kendaraan perlu juga disempurnakan, dengan mengurangi asumsi/penyederhanaan yang terlibat dalam pemodelan, sehingga hasil yang lebih realistis dapat diperoleh. Kajian tentang sistem aktuator, sensor, dan

sistem pendukung lainnya, harus dilakukan, agar suatu arsitektur simulator yang lengkap dapat diperoleh. Penggunaan teknik *real-time simulation* juga harus dikaji, agar simulator yang dihasilkan menjadi lebih realistis dan aplikatif.

Referensi

- [1] German, Filipini., et.al, Vehicle Dynamics Simulation Using Bondgraph. : Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Universidad Nacional de Rosario, 2007
- [2] Jalil, Mohammad Hasim Abdul., Design and Development of 6-DOF Motion Platform for Vehicle Driving Simulator : Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2008.
- [3] Jazar, R. N., Vehicle Dynamics : Theory and Applications, New York: Springer, 2008
- [4] Karnopp, Dean. C., dan Donal L. Margolis, System Dynamics : A Unified Approach , Canada : John Wiley & Sons, Inc. , 1990
- [5] Lee, Ji-Young, dan Woon-Sung Lee., A Symbolic Computation Method for Automatic Generation of Full Vehicle Model Simulation Code for Driving Simulator : Journal of Mechanical Science and Technology, Vol 19, No 1., 2005
- [6] Meriam, J.L., dan G. Kraige,. Engineering Mechanics Dynamics : John Wiley & Sons, Inc., 2005
- [7] Rajamani R., Vehicle Dynamics and Control, New York: Springer, 2006
- [8] Sasongko R. A., Diktat Kuliah Dinamika Sistem, Bandung : Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung, 2002
- [9] Using SIMULINK Version 3, The Mathworks, Inc. , 1999
- [10] User Guide SIMMECHANICS Version 1, The Mathworks, Inc., 2002
- [11] Alfa Romeo 147 3-Door [Online Article]. 2010. available at http://www.the-Blueprints.com/vectordrawings/show/720/alfa_romeo_147_3-door/
- [12] Driving Simulators [Online Article]. 2010. Available at <http://www.carsim.com/products/ds/index.php>

