

IMPLEMENTASI RIGID BODY PADA RIGGING TERHADAP ANIMASI DINAMIS MODEL KENDARAAN TIGA DIMENSI

Salam Aryanto¹, Ema Utami², Amir Fatah Sofyan³

Teknik Informatika, Magister Teknik Informatika

Universitas Amikom Yogyakarta

salamori@yahoo.com¹, emma@nrar.net², amir@amikom.ac.id³

Abstract

As technology grows, modeling process in three dimensions now becomes much easier than ever. But before animate a three dimensional object requires manual rigging to determine its internal frame structure. The researcher will experiment with several experimental scenarios of rigging process to produce dynamic vehicle animation by utilizing rigid body. In this case the implementation of rigid body on rigging done because rigid body very similar to object in real world. It has the force of gravity and other forces, as can collide with other objects and can push each other between objects. In particular rigging system by implementing rigid body on three dimensional vehicle model used as input will produce rigging that can be used to create mass and force so that three dimensional motion animation movement more dynamic. The results of this research indicate that the Implementation of rigid body on rigging of three dimensional vehicle model produces dynamic animation because the rigid body can be dynamically simulated with regard to contact and collision, as well as dynamically controlled objects responding to movements and collisions with other objects.

Keyword: rigid body, rigging, animation, vehicle, dynamic

Abstrak

Semakin berkembangnya teknologi, proses pemodelan dalam tiga dimensi saat ini menjadi jauh lebih mudah dari sebelumnya. Namun sebelum menganimasikan sebuah objek tiga dimensi memerlukan *rigging* secara manual untuk menentukan struktur kerangka internalnya. Peneliti akan melakukan eksperimen dengan beberapa skenario percobaan terhadap proses *rigging* untuk menghasilkan animasi kendaraan yang dinamis dengan memanfaatkan *rigid body*. Dalam hal ini implementasi *rigid body* pada *rigging* dilakukan karena *rigid body* sangat mirip dengan objek di dunia nyata. Memiliki gaya gravitasi dan gaya lainnya, seperti bisa bertumbukan dengan objek lain dan bisa saling mendorong antar objek. Secara khusus sistem *rigging* dengan mengimplementasikan *rigid body* pada model kendaraan tiga dimensi yang digunakan sebagai masukan akan menghasilkan *rigging* yang dapat digunakan untuk menciptakan massa dan gaya sehingga gerakan animasi kendaraan tiga dimensi lebih dinamis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Implementasi *rigid body* pada *rigging* model kendaraan tiga dimensi menghasilkan animasi yang dinamis karena *rigid body* dapat disimulasikan secara dinamis berkaitan dengan kontak dan tumbukan, serta objek yang dikendalikan secara dinamis merespon gerakan dan tumbukan dengan benda lain.

Kata Kunci : *rigid body, rigging, animasi, kendaraan, dinamis*

1. Latar Belakang Masalah

Pemodelan dalam tiga dimensi saat ini menjadi jauh lebih mudah dari sebelumnya. Namun sebelum menganimasikan sebuah objek tiga dimensi memerlukan *rigging* secara manual untuk menentukan struktur kerangka internalnya dan untuk menentukan bagaimana menghasilkan gerakan objek yang dinamis. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Yu, Yang, Zan, Huang, & Zhang, (2017) Menjelaskan bahwa dalam simulasi gerakan animasi, metode dinamis pertama-tama memberi objek pada sifat fisik dan menggunakan berbagai gaya kemudian menggunakan hukum *Newton* untuk melakukan kalkulasi terhadap karakteristiknya. Kegunaan metode ini adalah untuk menghitung percepatan suatu benda berdasarkan gaya yang muncul.

Berdasarkan uraian diatas peneliti akan melakukan eksperimen dengan beberapa skenario percobaan terhadap proses *rigging* untuk menimbulkan tumbukan, gaya, dan massa pada model kendaraan sehingga menghasilkan animasi kendaraan yang dinamis dengan memanfaatkan *rigid body*. Karena hasil identifikasi parameter inersia dan gaya pada objek *rigid body* dapat berinteraksi dengan lingkungan melalui kontak fisik. selain itu juga menunjukkan bahwa gaya (selain gaya gravitasi) dapat bekerja pada objek selama fase kontak fisik (Fazeli, Tedrake, & Rodriguez, 2018).

Oleh karena itu penelitian ini berfokus untuk mengimplementasikan *rigid body* pada *rigging* terhadap animasi dinamis model kendaraan tiga dimensi. Pendekatan ini berfokus untuk meminimalkan kerangka kendali animasi model kendaraan tiga dimensi. Secara khusus sistem *rigging* dengan mengimplementasikan *rigid body* pada model kendaraan tiga dimensi yang digunakan sebagai masukan akan menghasilkan *rigging* yang dapat digunakan untuk menciptakan tumbukan, massa dan gaya sehingga gerakan animasi kendaraan tiga dimensi lebih dinamis.

2. Landasan Teori

2.1. Rigging

Rigging merupakan sebuah proses di dalam sebuah animasi dimana sebuah geometri statis ditanamkan dengan berbagai mekanisme untuk bergerak, seperti struktur kerangka yang kemudian dibungkus dengan kontrol untuk animator (Holden, Saito, & Komura, 2015). *Rigging* adalah proses yang digunakan dalam komputer grafis sebagai penghubung antara modeling dan animasi. Biasanya, objek animasi dibangun dengan menggunakan serangkaian alat untuk memanipulasi geometri virtual menjadi bentuk tertentu. Ini yang umumnya dikenal sebagai *modeling*. Selanjutnya, tahap *rigging* dilakukan dan dihubungkan dengan objek geometri. Unsur-unsur ini memungkinkan animator untuk memanipulasi bentuk dan posisi objek geometri (Griffin, 2010).

2.2. Rigid body

Rigid body merupakan sebuah sifat material (padat, kaku, keras) dalam tiga dimensi. *Rigid body* yang ideal memiliki aturan yang jelas dan terdefinisi dengan baik untuk bagaimana sebuah objek bergerak di bawah aksi kekuatan dan momen, serta bagaimana batasan ideal seperti bergulir dengan sempurna, bergeser, dalam sistem pergerakan sebuah objek. Dalam hukum tumbukan inkremental, percepatan gaya *rigid body* dan persamaan keseimbangan momentum digunakan untuk menggambarkan dinamika selama tumbukan (Chatterjee & Ruina, 1998). *Rigid body* dapat disimulasikan secara dinamis berkaitan dengan kontak dan tumbukan, serta badan yang dikendalikan secara dinamis merespon gerakan sendi dan tumbukan dengan benda lain (Weinstein, Teran, & Fedkiw, 2006). Objek *rigid body* dapat berinteraksi dengan lingkungan melalui kontak fisik. selain itu juga menunjukkan bahwa gaya (selain gaya gravitasi) dapat bekerja pada objek selama fase kontak fisik (Fazeli, Tedrake, & Rodriguez, 2018).

Dengan adanya *rigid body* maka menimbulkan gerakan setelah terjadi tumbukan antar objek. Maka bisa digambarkan momen tumbukan tersebut dengan perhitungan hukum momentum yaitu hasil kali antara massa dan kecepatan. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut $P = mv$ (Sheth, Lu, Yu, & Fedkiw, 2015). Dalam peristiwa tumbukan, momentum total sistem sesaat sebelum tumbukan sama dengan momentum total sistem sesaat sesudah tumbukan.

2.3. Animasi kendaraan

Implementasi *rigid body* pada *rigging* model kendaraan tiga dimensi ini dilakukan untuk mengetahui apakah dengan adanya *rigid body* akan menghasilkan animasi yang dinamis untuk model kendaraan tiga dimensi. Karena dari hasil pengujian dengan gaya gravitasi, ada simulasi suspensi di kendaraan. Melalui simulasi mobil dan lingkungan sekitarnya dari berbagai parameter yang ditetapkan, dapat dilakukan berbagai gerakan animasi berbasis simulasi fisika (Yu et al., 2017).

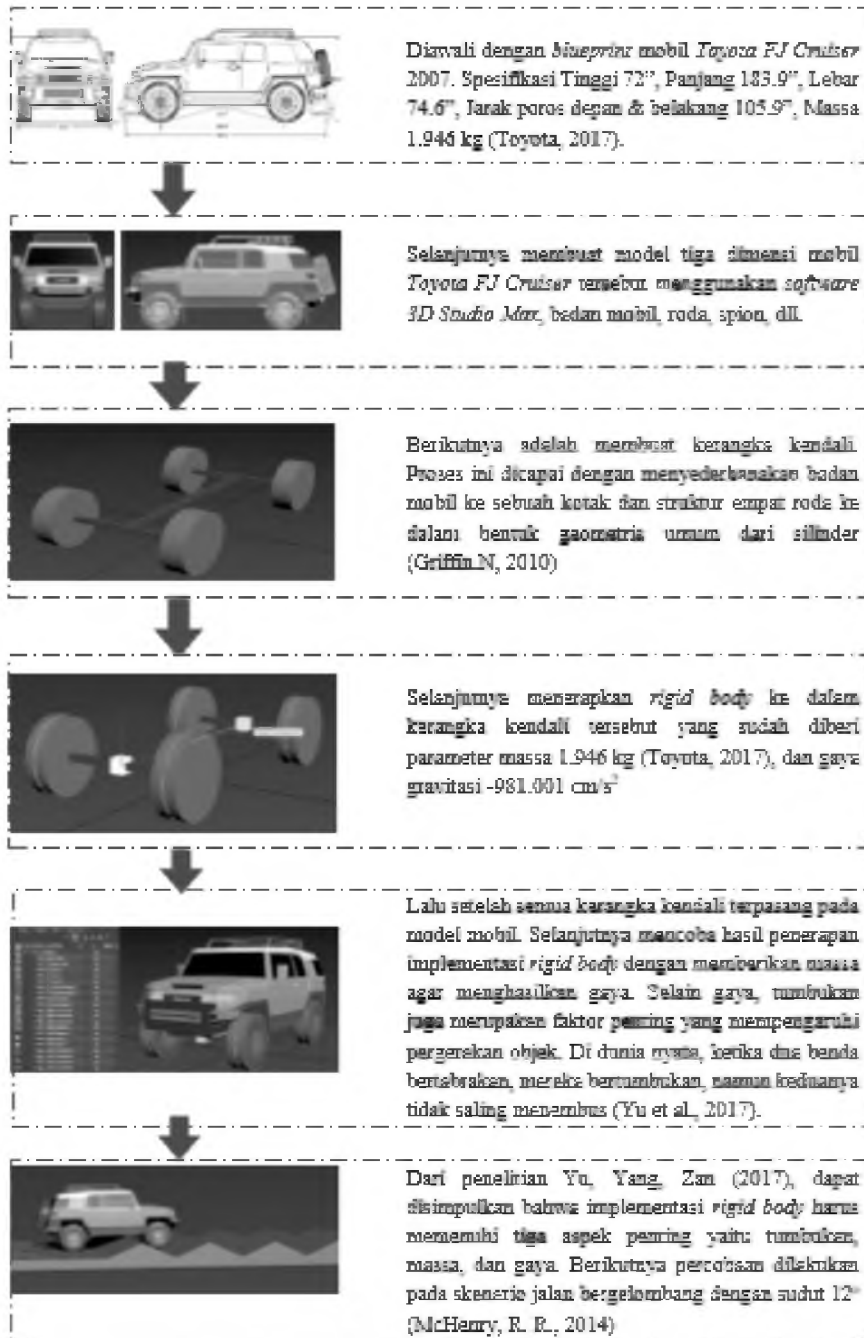
2.4. Dinamis

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (2017) Dinamis adalah penuh semangat dan tenaga sehingga cepat bergerak dan mudah menyesuaikan diri dengan keadaan dan sebagainya; mengandung dinamika. Selanjutnya dinamika sendiri merupakan bagian ilmu fisika yang berhubungan dengan benda yang bergerak dan tenaga yang menggerakkan.

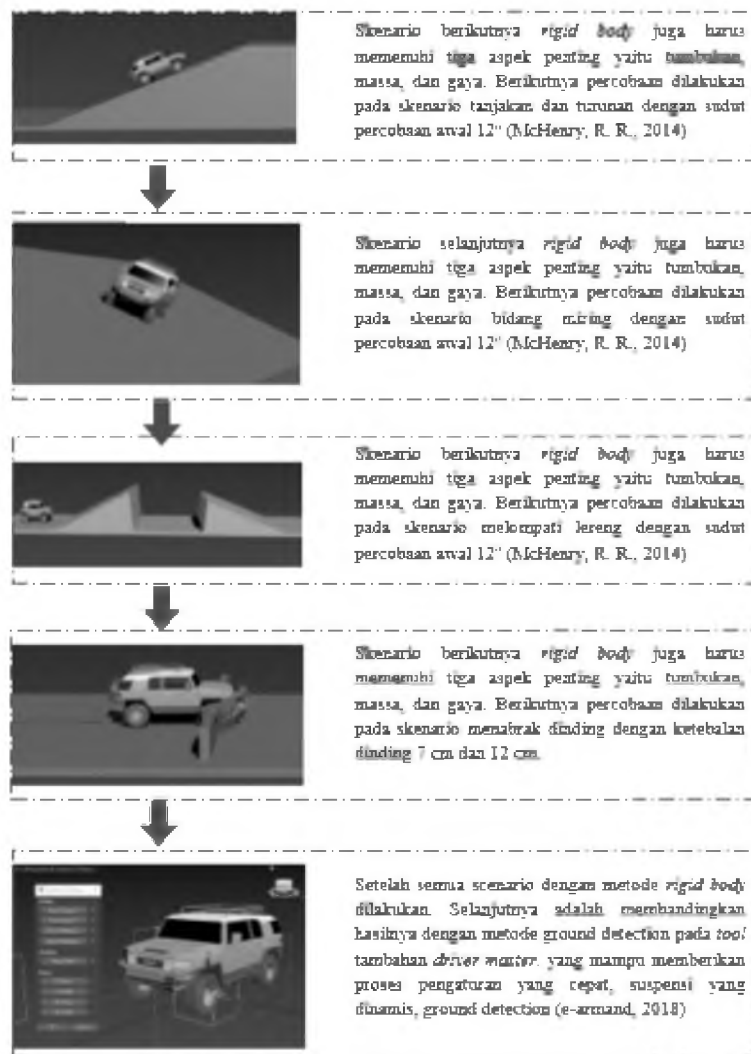
3. Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang penulis gunakan adalah eksperimental. terdapat empat prinsip dasar yang terdapat dalam desain eksperimen ini, antara lain sebagai berikut: *Replication*, yang merupakan pengulangan dari metode *rigging* dasar pada model kendaraan tiga dimensi tanpa implementasi *rigid body*. Selanjutnya yaitu *randomization*, prinsip ini digunakan pada pengujian hasil *rigging* yang sudah diimplementasikan *rigid body* dengan beberapa skenario percobaan. Pengujian ini valid bila pengamatan didistribusikan secara bebas yang dilakukan dengan pengambilan sampel secara random atau acak. Berikutnya *blocking*, merupakan prinsip yang digunakan untuk mengisolasi hasil yang sudah baik dan sesuai dengan indikator yang ada dari pengaruh faktor lain supaya hasil eksperimen menjadi lebih akurat. Selanjutnya yang terakhir adalah *validation*, merupakan suatu tindakan untuk membuktikan bahwa metode implementasi *rigid body* pada *rigging* dapat memberikan hasil yang sesuai dengan indikator keberhasilan serta memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode lain.

Prinsip Kerja Sistem



Gambar 1 Visual Olah Animasi



Gambar 1 Visual Olah Animasi (lanjutan)

Pada gambar 1 merupakan tahapan pertama dalam mengumpulkan data yang dilakukan dengan studi dari video, *website*, buku, jurnal nasional dan internasional. Data yang digunakan adalah model kendaraan tiga dimensi *Toyota FJ Cruiser 2007*. Model kendaraan tiga dimensi tersebut disesuaikan dengan data jenis, model, dan ukuran kendaraan yang sebenarnya.

Tahap selanjutnya adalah *replication* dimana dilakukan proses *rigging* model kendaraan tiga dimensi. Pada tahap ini dilakukan pemasangan kerangka dan kendali untuk menggerakkan model kendaraan. Kendali dipasang pada bagian-bagian kendali utama model kendaraan, seperti pada roda depan, roda belakang, dan badan kendaraan.

Pada tahap *randomization* dilakukan implementasi *rigid body*, yang pertama dilakukan adalah menentukan bagian-bagian model kendaraan yang bertumbukan langsung dengan lingkungan saat dilakukan uji coba. Bagian-bagian tersebut meliputi roda depan, roda belakang, dan badan kendaraan. Dimana roda depan dan belakang bertumbukan langsung dengan permukaan landasan tempat model kendaraan berjalan. Selanjutnya badan model kendaraan bertumbukan dengan dinding saat proses uji coba.

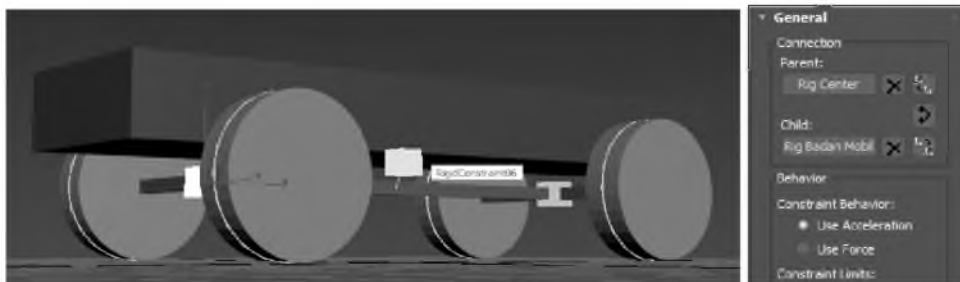
Untuk *blocking* dilakukan analisis terhadap gerakan animasi dinamis model kendaraan tiga dimensi dilakukan beberapa skenario percobaan. Skenario tersebut dipilih berdasarkan

penelitian tentang simulasi kendaraan dinamis oleh McHenry (2014). Di dalam penelitiannya dijelaskan bahwa ada beberapa uji coba untuk mengetahui suatu kendaraan dikatakan dinamis yaitu : *single vehicle accident*; misalnya bergerak di jalan bergelombang, *ramp to ramp*, berjalan di bidang miring, tanjakan dan turunan, dan menabrak dinding. fokus utama yang diperhatikan disesuaikan dengan latar belakang masalah dalam penelitian ini yaitu massa dan gaya yang ditimbulkan model kendaraan tiga dimensi tersebut saat dianimasikan. Artinya dengan adanya perbedaan massa yang dimasukkan ke dalam *rigid body* pada model kendaraan maka menghasilkan gaya yang berbeda. Dengan adanya massa maka deteksi tumbukan antar objek mempengaruhi dinamika gerakan animasi pada model kendaraan tiga dimensi. Oleh karena itu dilakukan berbagai percobaan pengaturan secara random pada *rigid body* agar setiap gerakan bisa memenuhi indikator keberhasilan animasi dinamis.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Skenario Jalan Bergelombang

Pada bagian *rig* badan kendaraan juga diberikan penghubung agar saat terjadi pergerakan pada model kendaraan, setiap bagian dari kendaraan tersebut tidak terpisah. Dalam hal ini antara *rig* badan mobil dengan *rig* center harus diberi penghubung diantara objek *rigid*. Berikut gambar 2 yang menunjukkan proses menghubungkan *rig* badan mobil dengan *rig* center.



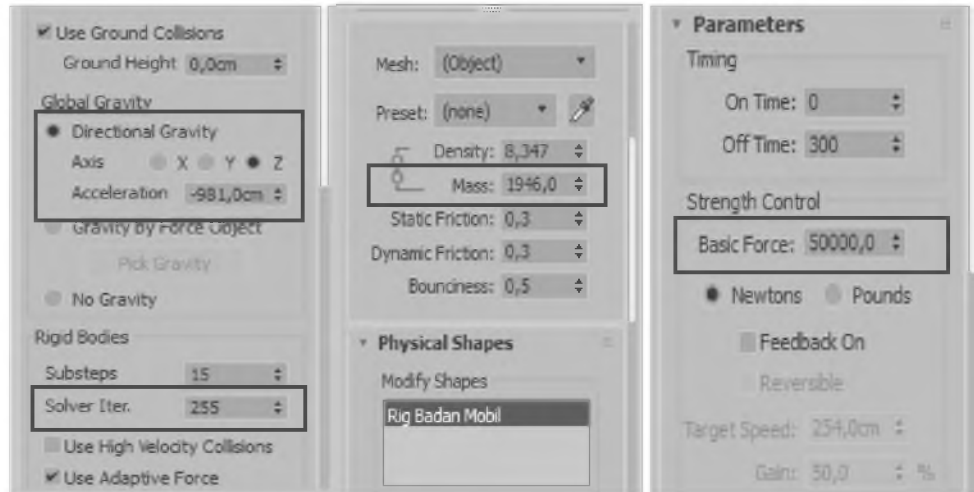
Gambar 2 Implementasi *Rigid Body* Badan Kendaraan

Berikut gambar 3 yang menunjukkan hasil keseluruhan dari setiap proses *rigging* dan implementasi *rigid body*. Pada gambar tersebut terlihat jelas keseluruhan bagian serta daftar bagian-bagian model, bagian *rigging*, dan bagian dari implementasi *rigid body* yang menempel pada model kendaraan.

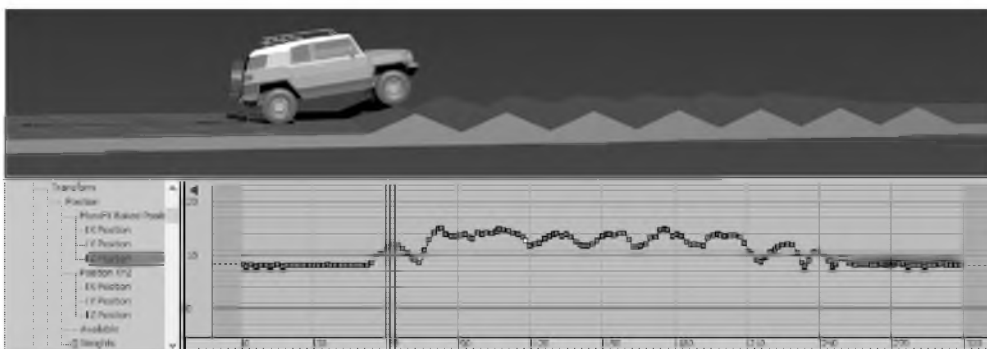


Gambar 3 Implementasi *Rigid Body* Model Kendaraan

Untuk menghasilkan jarak tumbukan antara lintasan dengan model kendaraan yang baik maka dilakukan eksperimen dengan merubah parameter dari solver iteration, ditunjukkan pada gambar 4. Dimana parameter ini merupakan pengaturan toleransi jarak tumbukan yang terjadi di antara dua buah objek rigid. Angka yang semakin besar akan sangat berguna pada objek dengan rangkaian yang saling terhubung.



Gambar 4 Parameter Gravitasi, Massa, dan Toleransi Tumbukan



Gambar 5 Skenario Jalan Bergelombang

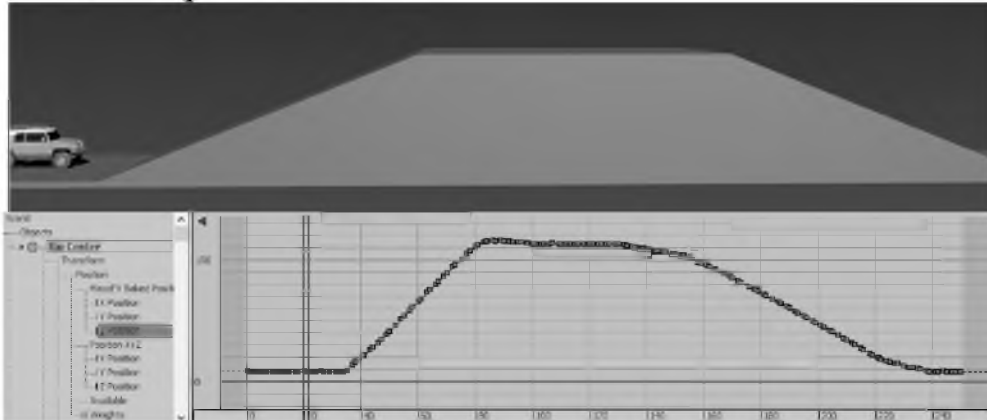
Tabel 1 Perbandingan Koordinat Lintasan dan Gerakan Kendaraan

Key Frame	Koordinat Lintasan	Koordinat Kendaraan	Selisih
Frame 30	8 cm	7,995 cm	0,005 cm
Frame 60	12 cm	11,833 cm	0,167 cm
Frame 90	14 cm	13,626 cm	0,374 cm
Frame 120	12 cm	11,693 cm	0,307 cm
Frame 150	14 cm	13,672 cm	0,328 cm
Frame 180	14 cm	13,796 cm	0,204 cm
Frame 210	12 cm	11,353 cm	0,647 cm
Frame 240	12 cm	10,488 cm	1,512 cm
Frame 270	8 cm	7,900 cm	0,100 cm
		Rata - rata	0,405 cm

Pada tabel 1 menunjukkan hasil untuk setiap frame gerakan animasi pada model kendaraan tiga dimensi sudah terjadi tumbukan. Dimana dalam tabel tersebut sudah ada

implementasi rigid body pada model kendaraan. Hal tersebut ditunjukkan pada koordinat kendaraan yang berubah mengikuti koordinat lintasan. Untuk hasil koordinat kendaraan yang ditunjukkan dalam tabel tidak sama persis dengan angka yang ditunjukkan pada koordinat lintasan. Hal ini disebabkan adanya gerakan naik turun dari suspensi yang bekerja pada model kendaraan tiga dimensi.

4.2. Skenario Tanjakan dan Turunan



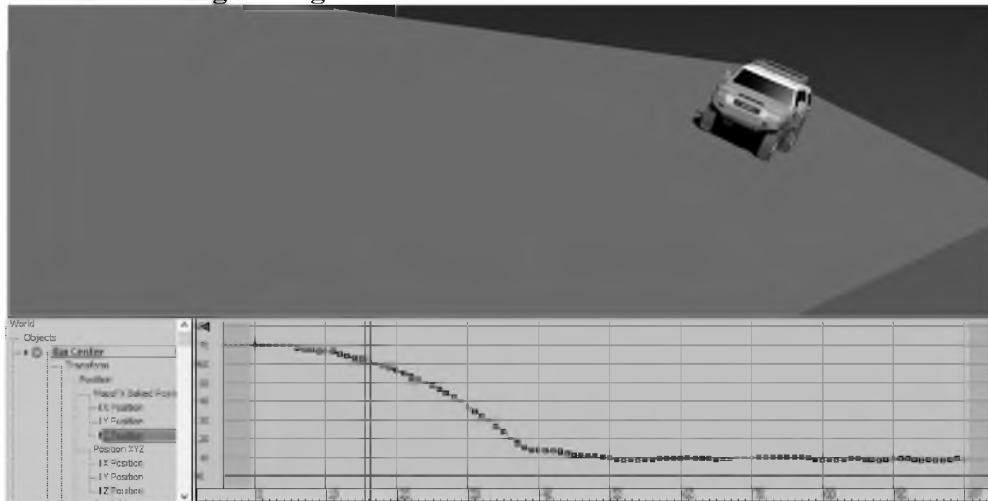
Gambar 6 Skenario Tanjakan dan Turunan

Tabel 2 Perbandingan Koordinat Lintasan dan Gerakan Kendaraan

Key Frame	Koordinat Lintasan	Koordinat Kendaraan	Selisish
Frame 20	9 cm	8,154 cm	0,846 cm
Frame 40	22 cm	21,432 cm	0,568 cm
Frame 60	68 cm	67,712 cm	0,288 cm
Frame 80	112 cm	111,917 cm	0,083 cm
Frame 100	114 cm	113,174 cm	0,826 cm
Frame 120	114 cm	113,082 cm	0,918 cm
Frame 140	110 cm	108,224 cm	1,776 cm
Frame 160	96 cm	95,657 cm	0,343 cm
Frame 180	72 cm	71,946 cm	0,054 cm
Frame 200	46 cm	45,964 cm	0,036 cm
Frame 220	18 cm	17,807 cm	0,193 cm
Frame 240	9 cm	8,043 cm	0,957 cm
		Rata - rata	0,574 cm

Pada tabel 2 menunjukkan hasil untuk setiap frame gerakan animasi pada model kendaraan tiga dimensi sudah terjadi tumbukan. Dimana dalam tabel tersebut sudah ada implementasi rigid body pada model kendaraan. Hal tersebut ditunjukkan pada koordinat kendaraan yang berubah mengikuti koordinat lintasan. Untuk hasil koordinat kendaraan yang ditunjukkan dalam tabel tidak sama persis dengan angka yang ditunjukkan pada koordinat lintasan. Hal ini disebabkan adanya gerakan naik turun dari suspensi yang bekerja pada model kendaraan tiga dimensi.

4.3. Skenario Bidang Miring



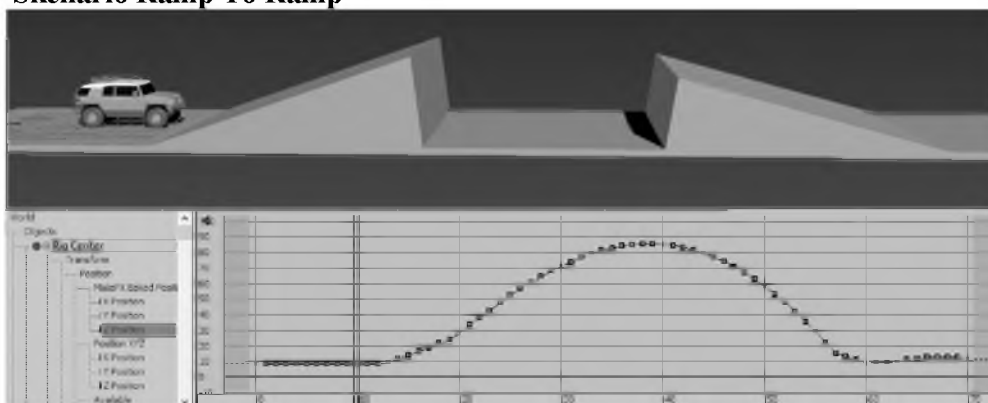
Gambar 7 Skenario Bidang Miring

Tabel 3 Perbandingan Koordinat Lintasan dan Gerakan Kendaraan

Key Frame	Koordinat Lintasan	Koordinat Kendaraan	Selisih
Frame 10	67 cm	66,401 cm	0,599 cm
Frame 20	57 cm	56,165 cm	0,835 cm
Frame 30	37 cm	36,811 cm	0,189 cm
Frame 40	14 cm	13,440 cm	0,560 cm
Frame 50	10 cm	9,134 cm	0,866 cm
Frame 60	9 cm	8,959 cm	0,041 cm
		Rata - rata	0,515 cm

Pada tabel 3 menunjukkan hasil untuk setiap frame gerakan animasi pada model kendaraan tiga dimensi sudah terjadi tumbukan. Dimana dalam tabel tersebut sudah ada implementasi rigid body pada model kendaraan. Hal tersebut ditunjukkan pada koordinat kendaraan yang berubah mengikuti koordinat lintasan. Untuk hasil koordinat kendaraan yang ditunjukkan dalam tabel tidak sama persis dengan angka yang ditunjukkan pada koordinat lintasan. Hal ini disebabkan adanya gerakan naik turun dari suspensi yang bekerja pada model kendaraan tiga dimensi.

4.4. Skenario Ramp To Ramp



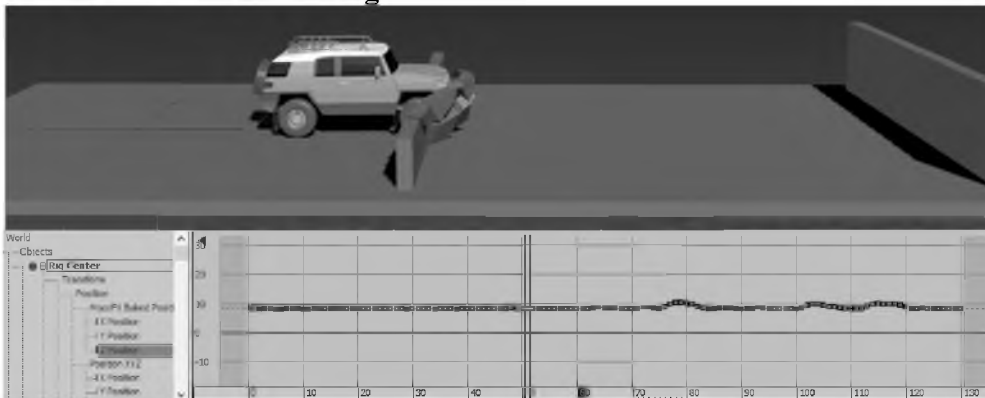
Gambar 8 Ramp To Ramp

Tabel 4 Perbandingan Koordinat Lintasan dan Gerakan Kendaraan

Key Frame	Koordinat Lintasan	Koordinat Kendaraan	Selisih
Frame 10	9 cm	8,033 cm	0,967 cm
Frame 20	29 cm	28,298 cm	0,702 cm
Frame 30	71 cm	70,640 cm	0,36 cm
Frame 40	85 cm	84,866 cm	0,134 cm
Frame 50	58 cm	57,890 cm	0,11 cm
Frame 60	9 cm	8,706 cm	0,294 cm
		Rata - rata	0,43 cm

Pada tabel 4 menunjukkan hasil untuk setiap frame gerakan animasi pada model kendaraan tiga dimensi sudah terjadi tumbukan. Dimana dalam tabel tersebut sudah ada implementasi *rigid body* pada model kendaraan. Hal tersebut ditunjukkan pada koordinat kendaraan yang berubah mengikuti koordinat lintasan. Untuk hasil koordinat kendaraan yang ditunjukkan dalam tabel tidak sama persis dengan angka yang ditunjukkan pada koordinat lintasan. Hal ini disebabkan adanya gerakan naik turun dari suspensi yang bekerja pada model kendaraan tiga dimensi.

4.5. Skenario Menabrak Dinding



Gambar 9 Menabrak Dinding

Tabel 5 Perbandingan Koordinat Lintasan dan Gerakan Kendaraan

Key Frame	Koordinat Lintasan	Koordinat Kendaraan	Selisih
Frame 10	8 cm	7,906 cm	0,91 cm
Frame 20	8 cm	7,906 cm	0,91 cm
Frame 30	8 cm	7,906 cm	0,91 cm
Frame 40	8 cm	7,906 cm	0,91 cm
Frame 50	8 cm	7,906 cm	0,91 cm
Frame 60	8 cm	7,906 cm	0,91 cm
Frame 70	8 cm	8,045 cm	0,045 cm
Frame 80	8 cm	10,168 cm	2,168 cm
Frame 90	8 cm	7,856 cm	0,144 cm
Frame 100	8 cm	7,937 cm	0,063 cm
Frame 110	8 cm	8,173 cm	0,173 cm
		Rata - rata	0,73 cm

Pada tabel 5 menunjukkan hasil untuk setiap frame gerakan animasi pada model kendaraan tiga dimensi sudah terjadi tumbukan. Dimana dalam tabel tersebut sudah ada implementasi *rigid body* pada model kendaraan. Hal tersebut ditunjukkan pada koordinat kendaraan yang berubah mengikuti koordinat lintasan.. Untuk hasil koordinat kendaraan yang ditunjukkan dalam tabel tidak sama persis dengan angka yang ditunjukkan pada koordinat lintasan. Hal ini disebabkan adanya gerakan naik turun dari suspensi yang bekerja pada model kendaraan tiga dimensi.

Tabel 6 Rata – Rata Jarak Tumbukan Lintasan dengan Kendaraan

Skenario	Rata – Rata Jarak Lintasan dengan Kendaraan	
	Sebelum Implementasi Rigid Body	Sesudah Implementasi Rigid Body
Jalan Bergelombang	4,44 cm	0,405 cm
Tanjakan dan Turunan	56,83 cm	0,574 cm
Bidang Miring	13,76 cm	0,515 cm
<i>Ramp to Ramp</i>	35,5 cm	0,43 cm
Menabrak Dinding	0 cm	0,73 cm

Pada tabel 6 dapat dilihat bahwa pada skenario jalan bergelombang, tanjakan dan turunan, bidang miring, *ramp to ramp* memiliki jarak lintasan dengan kendaraan sebelum implementasi *rigid body* menghasilkan nilai yang sangat besar dikarenakan tidak ada tumbukan sama sekali sedangkan sesudah implementasi *rigid body* menghasilkan nilai yang kecil untuk jarak antara lintasan dengan model kendaraan. Namun berbeda pada skenario saat kendaraan menabrak dinding. Sebelum implementasi menghasilkan nilai 0 dikarenakan model kendaraan hanya bergerak datar menembus dinding tanpa adanya tumbukan dengan objek dinding. Sedangkan sesudah implementasi *rigid body* justru menghasilkan angka yang lebih besar. Hal tersebut dikarenakan setelah model kendaraan menabrak dinding terjadi tumbukan lain antara model kendaraan dengan pecahan dinding.

5. Kesimpulan Dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal mengenai Implementasi *Rigid body* Pada *Rigging* Terhadap Animasi Dinamis Model Kendaraan Tiga Dimensi.

1. Untuk menghasilkan animasi model kendaraan tiga dimensi yang dinamis diperlukan implementasi *rigid body* agar menghasilkan tumbukan, massa, dan gaya pada objek tiga dimensi. Adapun proses yang dilakukan :
 - *Rigid body* pada kendaraan diberikan parameter agar memenuhi tiga aspek penting pada animasi dinamis yaitu massa = 1946 kg dan gaya gravitasi = -981.001 cm/s^2
 - Menghasilkan gerakan model kendaraan tiga dimensi yang sesuai dengan koordinat lintasan yang dilalui. Artinya jarak tumbukan antara lintasan dengan model kendaraan sangat kecil atau sama dengan 0.
2. Dari setiap skenario percobaan pada *rigging* terhadap model kendaraan tiga dimensi memberikan hasil gerakan animasi yang dinamis pada model kendaraan untuk setiap skenario lingkungan yang berbeda. Adapun perubahan koordinat pada kurva, menunjukkan perubahan pada sumbu Z sesuai dengan bentuk jalan yang dilalui model kendaraan.
3. Implementasi *rigid body* pada *rigging* terhadap animasi dinamis model kendaraan tiga dimensi memberikan hasil gerakan animasi yang dinamis.

4. seperti terjadi tumbukan antara objek rigid, gerakan model kendaraan mengikuti bentuk permukaan jalan karena adanya massa dan gaya gravitasi. Selain itu meminimalkan kerangka kendali pada model kendaraan untuk menghasilkan gerakan animasi.

5.2. Saran

Untuk penelitian berikutnya sebaiknya melakukan skenario percobaan yang lebih spesifik, seperti material jalan yang dilalui. Melakukan perhitungan untuk gerakan animasi yang akan dihasilkan, serta analisis penilaian hasil gerakan animasi yang lebih akurat.

Daftar Pustaka

- Chatterjee, A., & Ruina, A. (1998). Two Interpretations of Rigidity in Rigid-Body Collisions. *Journal of Applied Mechanics*, 65(4), 894–900. <https://doi.org/10.1115/1.2791929>
- Fazeli, N., Tedrake, R., & Rodriguez, A. (2018). Identifiability Analysis of Planar Rigid-Body Frictional Contact. In *Robotics Research* (pp. 665–682). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60916-4_38
- Griffin, N., (2010). Retrieved from <http://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/ETD-TAMU-2010-128857/GRIFFINTHESIS.pdf>
- McHenry, R. R. (2014). The Role of Vehicle Dynamics Simulation in Highway Safety Research . ASME 16th International Conference on Advanced Vehicle Technologies , 1-16.
- Sheth, R., Lu, W., Yu, Y., & Fedkiw, R. (2015). Fully Momentum-conserving Reduced Deformable Bodies with Collision, Contact, Articulation, and Skinning. In *Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation* (pp. 45–54). New York, NY, USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/2786784.2786787>
- Yu, Y., Yang, J., Zan, X., Huang, J., & Zhang, X. (2017). Research of Simulation in Character Animation Based on Physics Engine [Research article]. <https://doi.org/10.1155/2017/4815932>