

## Pemodelan Lintasan Benda Titik Pada *Wall of Death* (Tong Setan)

Wenny Wahyuni<sup>1,a)</sup>, Rustan<sup>1,b)</sup>, Erika L. Y. Nasution<sup>2,c)</sup>,  
Miftahul Husnah<sup>2,d)</sup> dan Sparisoma Viridi<sup>3,e)</sup>

<sup>1</sup>Laboratorium Fisika Bumi,  
Kelompok Keilmuan Fisika Bumi dan Sistem Kompleks,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

<sup>2</sup>Laboratorium Material Energi dan Lingkungan,  
Kelompok Keilmuan Fisika Material dan Elektronik ,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

<sup>3</sup>Laboratorium Fisika Nuklir dan Biofisika,  
Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

a)wenny.wahyuni.zahda@gmail.com (corresponding author)

b)rustankabaro@yahoo.com

c)erika.lindanst@gmail.com

d)miftahulhusnah1403@gmail.com

d)dudung@fi.itb.ac.id

### Abstrak

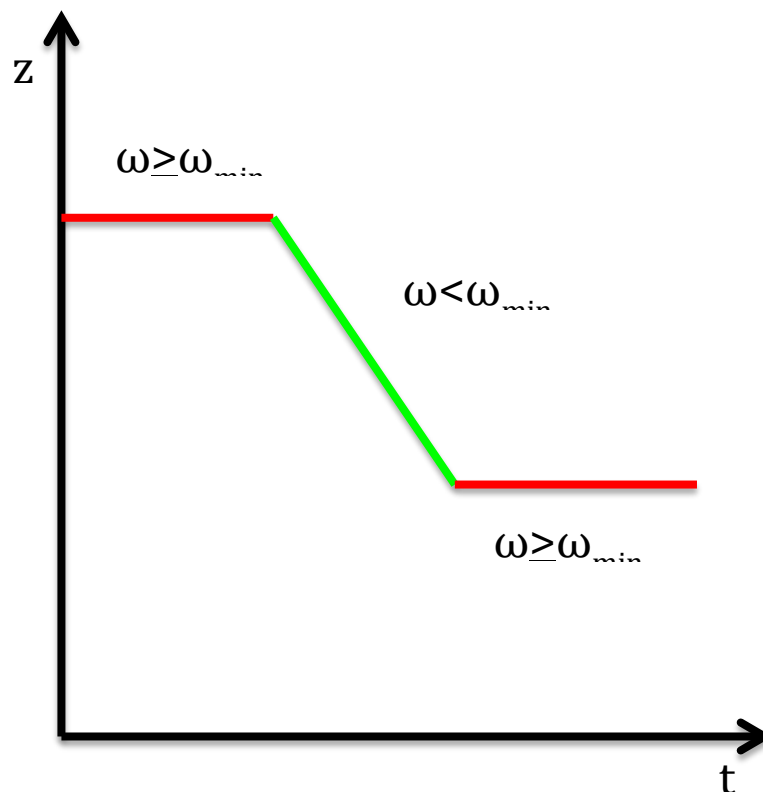
*Wall of death* adalah suatu wahana bermain dimana sipengendara sepeda motor mengelilingi tong yang berbentuk silinder tanpa terjatuh. Kebanyakan masyarakat awam mengira atraksi tersebut terjadi karena adanya sihir. Penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan fenomena ini secara fisika melalui pemodelan tiga dimensi yang menggunakan metode Euler pada program C++. Penelitian ini menunjukkan hasil bahwa atraksi ini dipengaruhi kecepatan sepeda motor, dimana semakin besar jari-jari tong maka kecepatan sepeda motor harus semakin besar juga, semakin besarnya kecepatan sepeda motor saat mengelilingi tong (silinder) maka energi yang dibutuhkan juga semakin besar. Apabila silinder memiliki bentuk yang dengan sudut yang konstan dari bawah hingga atas  $\theta = 90^\circ$  maka jika kecepatan sepeda motor diperlambat, motor akan jatuh kebawah, tetapi jika kecepatan terus bertambah maka sepeda motor akan tetap pada lintasannya. Jika sepeda motor tersebut diberikan waktu yang lebih cepat maka selisih ketinggian motor tersebut saat turun akan semakin besar yaitu dibandingkan dengan waktu turun motor lebih lama. Pada penelitian ini waktu turun motor ( $t$ ) ditentukan pada saat  $t = 1$  s,  $t = 2$  s,  $t = 3$  s dan  $t = 4$  s dengan selisih ketinggian masing-masing adalah 9,6 m, 9 m, 8,4 m dan 7,9 m.

*Kata-kata kunci:* Gaya sentripetal, gerak melingkar, *wall of death* dan pemodelan.

## PENDAHULUAN

Tong setan (*Wall of Death*) merupakan istilah untuk salah satu wahana permainan yang dapat dinikmati di pasar malam. *Wall of death* merupakan suatu atraksi mengendarai sepeda motor yang berputar mengelilingi sebuah tong silinder berukuran besar menggunakan motor bahkan mobil. Anehnya, meskipun dinding tong memiliki kemiringan hampir tegak lurus dengan tanah, pengendara dapat berputar-putar tanpa terjatuh. Banyak pendapat mengenai fenomena tersebut, ada berpendapat pemain atraksi menggunakan ilmu sihir, sulap, atau memang ada bantuan setan [1,2].

Fenomena tersebut menarik untuk dikaji dan dijelaskan secara fisika dan dimodelkan untuk meluruskan pendapat-pendapat tersebut. Simulasi pemodelan gerak benda ini dilakukan dengan menggunakan program C++, program ini digunakan karena memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan program yang lain [3]. Pada penelitian ini, sebuah motor diasumsikan sebagai sebuah benda titik, bergerak dengan kecepatan sudut  $\omega_{\min}$  bergerak mengelilingi dinding silinder. Untuk bergerak stabil dan tidak terjatuh, benda titik harus melewati kecepatan sudut  $\omega_{\min}$ . Persamaan gerak akan diturunkan secara analitik dan numerik menggunakan metode Euler.



Gambar 1. Model pergerakan dalam silinder dengan kecepatan sudut yang diinginkan

Dengan menentukan kecepatan sudut dari benda yang bergerak tersebut, maka akan di dapatkan bentuk lintasan yang terbentuk oleh benda terhadap dinding. Perubahan kecepatan sudut diakibatkan karena adanya perubahan waktu. Waktu yang digunakan merupakan variabel yang dapat diubah-ubah. Perubahan waktu disini bertujuan untuk melihat seberapa besar selisih penurunan benda selama turun dan kemudian kembali keposisi konstan dimana  $\omega \geq \omega_{\min}$ , pada keadaan ini dapat dikatakan benda (sepeda motor) dapat bergerak stabil pada lintasannya.

## KONSEP GERAK BENDA PADA WALL OF DEATH

### Gaya-gaya yang bekerja pada benda di dalam Wall of Death

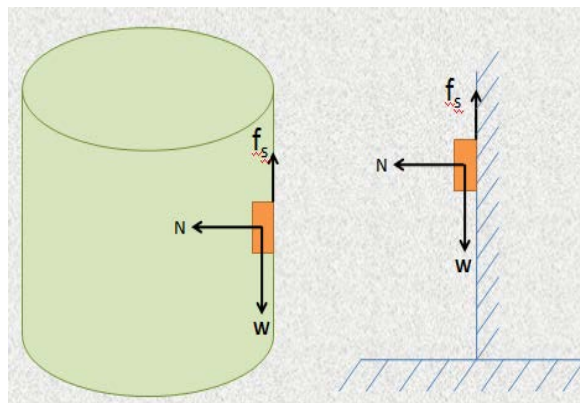
Suatu benda yang bergerak pada dinding vertikal kasar dipengaruhi oleh beberapa gaya yang bekerja pada benda dan dinding tersebut. Gaya-gaya yang bekerja antara lain gaya gravitasi, gaya gesek, dan gaya normal. Pada kasus tabung yang berbentuk silinder vertikal dengan kemiringan  $\theta = 90^\circ$  maka dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa gaya normal juga berlaku sebagai gaya sentripetalnya, dengan asumsi inilah dengan menurunkan rumus dari hukum Newton didapatkan nilai dari  $\omega_{\min}$ . Dengan sedikit operasi matematik maka nilai  $\omega_{\min}$  ini di dapatkan hanya bergantung terhadap jari-jari dari silinder atau tong tersebut.

Pada sumbu x

$$\begin{aligned} \sum F_x &= m \frac{v^2}{R}, \\ N &= m \frac{v^2}{R}. \end{aligned} \tag{1}$$

Pada sumbu y [4]

$$\begin{aligned} \sum F_z &= ma_z \\ W - f_s &= ma_z \\ mg - \mu_k N &= ma_z \\ a_z &= \frac{mg - \mu_k N}{m}. \end{aligned} \tag{2}$$



Gambar 2. Gaya-gaya yang bekerja pada wall of death

Substitusikan persamaan (1) ke persamaan (2) sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned} a_z &= \frac{mg - (\mu_k mv^2 / R)}{m} \\ a_z &= g - \frac{\mu_k v_s^2}{R} \\ a_z &= g - \mu_k \omega^2 R, \end{aligned} \tag{3}$$

Saat  $\omega > \omega_{\min}$  maka

$$a_z = 0 \tag{4}$$

### Syarat Batas

Suatu keadaan agar benda tetap berada pada lintasannya atau benda tetap dalam keadaan stabil dan tidak terjatuh, maka gaya gesek yang bekerja pada benda tersebut dalam arah vertikal  $f_s$  harus sama besar dengan gaya berat yang dimiliki oleh benda.

$$\begin{aligned} f_s &= mg \\ \mu_s N &= mg \\ N &= \frac{mg}{\mu_s} \end{aligned} \tag{5}$$

Dalam arah horizontal, gaya yang bekerja adalah gaya sentripetal. Gaya sentripetal merupakan resultan gaya yang arahnya menuju/keluar dari pusat silinder.

$$\Sigma F_x = \frac{mv^2}{R} \tag{6}$$

Pada kasus ini gaya sentripetal yang bekerja hanya gaya normal,  $N$  sehingga:

$$N = \frac{mv^2}{R} \tag{7}$$

substitusi persamaan (5) ke persamaan (7) maka diperoleh,

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\mu_s R}} \tag{8}$$

dimana  $\omega$  adalah kecepatan sudut minimal yang harus dilewati benda titik agar tetap pada lintasan (tidak terjatuh),  $g$  adalah percepatan gravitasi,  $\mu_s$  adalah koefisien gesek dinding tong, dan  $R$  adalah jari-jari silinder.

**Solusi Numerik dan Algoritma**

Dengan menggunakan metode Euler, maka persamaan (3) dapat memberikan kecepatan dan posisi setiap saat dalam arah  $z$  untuk  $\omega < \omega_{\min}$

$$a_z(t) = g - \mu_k \omega^2 R \tag{9}$$

$$v_z(t + \Delta t) = v_z(t) - a_z(t)\Delta t \tag{10}$$

Sedangkan persamaan posisi untuk sumbu  $x$ ,  $y$  dan  $z$  adalah:

$$x = R \sin \theta \tag{11}$$

$$y = R \cos \theta \tag{12}$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) - v_z(t)\Delta t \tag{13}$$

Untuk  $\omega \geq \omega_{\min}$  persamaan posisi pada sumbu  $x$ ,  $y$  dan  $z$  diberikan oleh:

$$x = R \sin \theta \tag{14}$$

$$y = R \cos \theta \tag{15}$$

$$z = z_0 \tag{16}$$

dimana hubungan  $\theta$  dan  $\omega$  adalah

$$\theta = \theta + \omega(t)\Delta t \tag{17}$$

Implementasi persamaan (9) sampai dengan persamaan (17) dapat dibuat dalam bentuk algoritma di bawah ini:

L01.  $t_0, t_1, t_2, \Delta t, \omega_0, \omega_1, \omega_3 ?$

L02.  $g, R, v_s, \mu, \theta ?$

L03.  $t = t_0$

$$L04. \omega(t) = \frac{\omega_1 - \omega_0}{t_1 - t_0} (t - t_0) + \omega_0$$

L05.  $\theta = \theta + \omega(t)\Delta t$

L06.  $t = t + \Delta t$

L07.  $t \leq t_1 \rightarrow L04$

$$L08. \omega(t) = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} (t - t_1) + \omega_1$$

L09.  $\theta = \theta + \omega(t)\Delta t$

L10.  $t = t + \Delta t$

L11.  $t \leq t_2 \rightarrow L08$

L12.  $\omega = \omega_0$

- L13.  $x = R \sin \theta$   
 L14.  $y = R \cos \theta$   
 L15.  $a_z = 0$   
 L16.  $v_z = 0$   
 L17.  $z = z_0$   
 L18.  $\omega(t) = \omega_0 - \Delta\omega$   
 L19.  $\omega(t) \geq \omega_{\min} \rightarrow L13$   
 L20.  $x = R \sin \theta$   
 L21.  $y = R \cos \theta$   
 L22.  $a_z = -0.5(g - \mu\omega^2 R)$   
 L23.  $v_z(t + \Delta t) = v_z(t) + a_z(t)\Delta t$   
 L24.  $z(t + \Delta t) = z(t) + v_z(t)\Delta t$   
 L25.  $\omega(t + \Delta t) = \omega(t) + \Delta\omega$   
 L26.  $\omega(t) < \omega_{\min} \rightarrow L20$

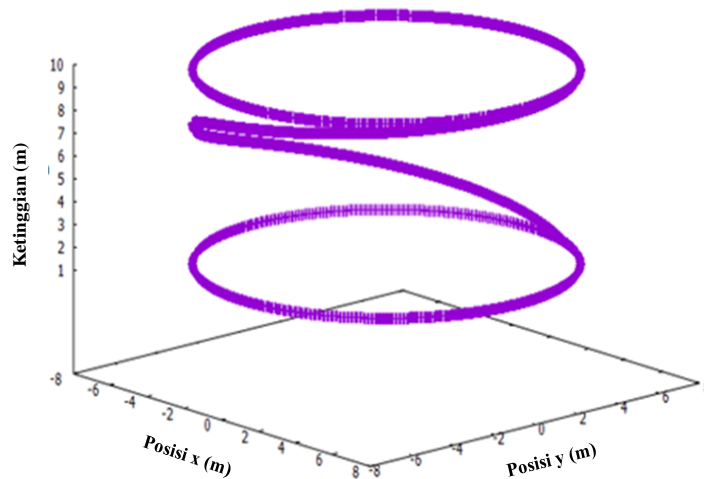
## HASIL PERHITUNGAN DAN PERBANDINGAN DENGAN DATA REFERENSI

Parameter-parameter beserta nilai yang digunakan dalam simulasi dapat dilihat dari Tabel 1 di bawah ini. Parameter-parameter ini digunakan mendekati dengan nilai sebenarnya.

Tabel 1. Parameter-parameter dalam simulasi

No	Parameter	Nilai
1	Jari-jari silinder ( $R$ )	7 m
2	Ketinggian awal ( $z_0$ )	10 m
3	Gaya gravitasi ( $g$ )	10 m/s
4	Kecepatan sudut minimum ( $\omega_{\min}$ )	5 rad/s
5	Kecepatan sudut awal ( $\omega_{\text{awal}}$ )	10 rad/s
6	Kecepatan sudut akhir ( $\omega_{\text{akhir}}$ )	1 rad/s
7	$t_{\text{awal}}$	0 s
8	$t_{\text{akhir}}$	5 s
9	Koefisien gesek ( $\mu$ )	0.04

Hasil simulasi yang dilakukan dengan menggunakan parameter-parameter di atas pada program C++ maka di dapatkan hasil berupa gambar yang ditampilkan menggunakan program gnuplot.



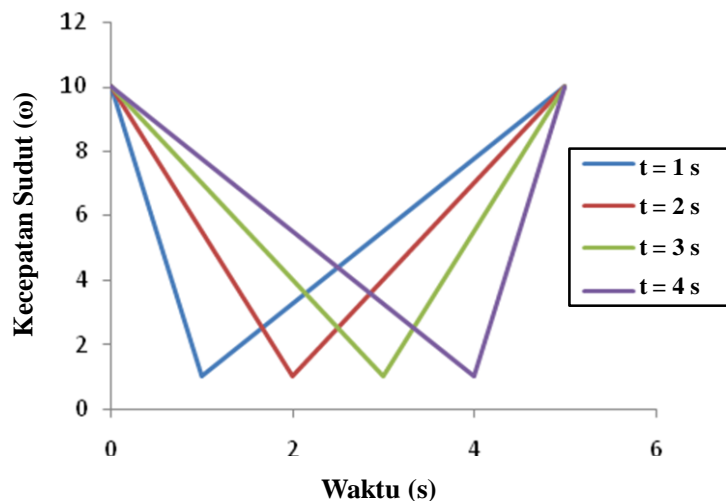
Gambar 3. Simulasi menggunakan program C++

Dari gambar di atas dapat dilihat pada keadaan awal dimana  $\omega \geq \omega_{min}$  maka benda tetap pada keadaan mula-mulanya, yaitu pada  $z = z_0$ , kemudian pada waktu tertentu benda mulai turun. Pada saat benda turun maka dapat dikatakan bahwa tersebut memiliki nilai  $\omega < \omega_{min}$ , kemudian saat  $\omega \geq \omega_{min}$  maka benda kembali bergerak stabil pada lintasannya.

Data yang diperoleh dari simulasi di atas maka dapat diplot dalam grafik kecepatan terhadap waktu yang diperlihatkan oleh Gambar 4 dan grafik ketinggian terhadap waktu pada Gambar 5

Grafik 4 dibawah memperlihatkan hubungan kecepatan sudut dan waktu yang dipengaruhi oleh perubahan waktu pada saat benda mulai jatuh  $t$ . Dari grafik di atas dapat dilihat saat kecepatan benda lebih kecil dari kecepatan minimum, maka benda tersebut akan jatuh sejauh jarak tertentu. Pada saat waktu turun  $t$  dikondisikan untuk  $t = 1 s$ ,  $t = 2 s$ ,  $t = 3 s$  dan  $t = 4 s$  dapat dilihat bahwa benda mulai turun pada ketinggian yang berbeda, dimana benda dengan  $t = 1 s$  maka akan lebih cepat turun dibandingkan dengan  $t = 2 s$ ,  $t = 3 s$  dan  $t = 4 s$

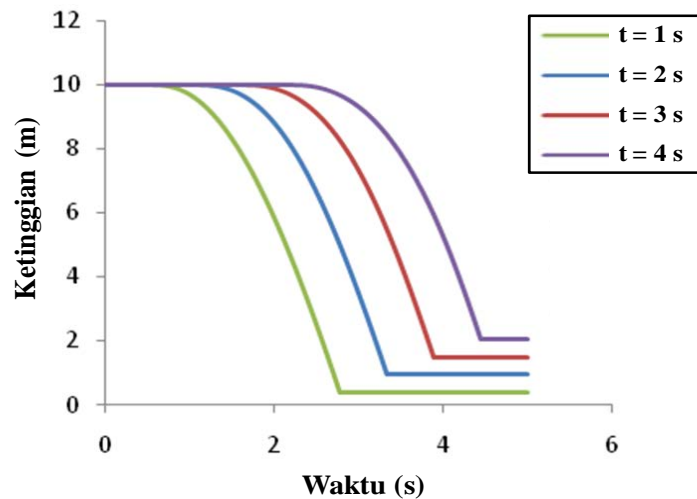
### Grafik Kecepatan sudut Vs Waktu



Gambar 4. Grafik Kecepatan sudut terhadap waktu

Dari grafik 5 dibawah dapat di lihat waktu turun pada saat  $t = 1 s$  akan memiliki selisih ketinggian yang lebih besar dibandingkan dengan waktu turun pada saat  $t = 2 s$ ,  $t = 3 s$  dan  $t = 4 s$ . Pada saat  $t = 1 s$  maka benda akan mulai turun pada  $t = 0,559 s$  dengan ketinggian 9,999 m sampai konstan kembali pada  $t = 2,778 s$  dengan ketinggian 0,395 m dan perubahan ketinggian 9,6 m. Pada saat  $t = 2 s$  maka benda akan mulai turun pada  $t = 1,115 s$  dengan ketinggian 9,999 m sampai konstan kembali pada  $t = 3,340 s$  dengan ketinggian 0,946 m dan perubahan ketinggian 9 m. Pada saat  $t = 3 s$  maka benda akan mulai turun pada  $t = 1,670 s$  dengan ketinggian 9,999 m sampai konstan kembali pada  $t = 3,889 s$  dengan ketinggian 1,50 m dan perubahan ketinggian 8,4 m. Pada saat  $t = 4 s$  maka benda akan mulai turun pada  $t = 2,226 s$  dengan ketinggian 9,999 m sampai konstan kembali pada  $t = 4,446 s$  dengan ketinggian 2.052 m dan perubahan ketinggian 7,9 m.

**Grafik Ketinggian (z) Vs Waktu (t)**

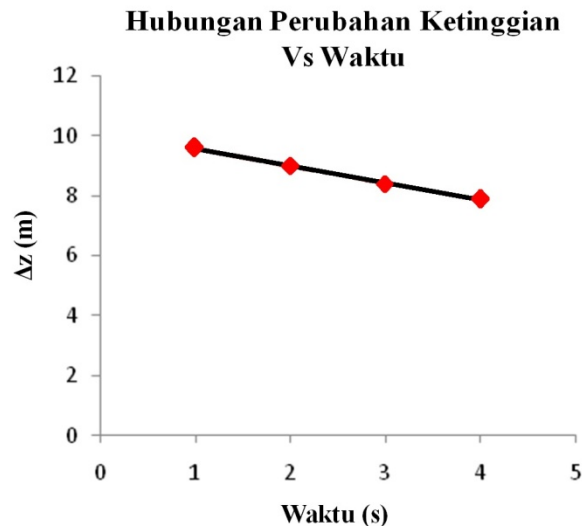


Gambar 5. Grafik ketinggian terhadap waktu

Dari data di atas maka dapat dibuat tabel dan grafik perubahan ketinggian terhadap waktu turun  $t$ .

Tabel 2. Selisih ketinggian terhadap waktu

No	Waktu turun $t$ (s)	Perubahan Ketinggian (m)
1	1	9,6
2	2	9
3	3	8,4
4	4	7,9



Gambar 6. Grafik selisih ketinggian terhadap waktu

Dari tabel dan grafik di atas dapat dengan jelas dilihat bahwa semakin lama pengaturan waktu turun dari benda pada dinding silinder yang vertikal maka perubahan ketinggian akan semakin kecil, artinya penurunan benda akan semakin kecil.

## KESIMPULAN

Benda yang bergerak pada dinding vertikal akan dapat bergerak stabil apabila benda tersebut memiliki kecepatan sudut yang lebih besar dibandingkan dengan kecepatan minimum yang dimilikinya. Kecepatan minimum benda ini dipengaruhi oleh jari-jari tong yang akan dilewatinya, tetapi jika benda tersebut memiliki kecepatan sudut kurang dari kecepatan minimumnya, maka benda akan jatuh. Dari hasil yang diperoleh maka dapat disimpulkan waktu benda saat dibuat mulai turun mempengaruhi ketinggian dan kecepatan sudut yang dibuat oleh benda itu sendiri. Semakin cepat waktu benda tersebut turun maka semakin besar selisih ketinggian yang akan dihasilkan, begitu juga sebaliknya.

## REFERENSI

1. Abramowicz, M.A. dan Szuskiewicz, E. *The Wall of Death*. American Journal of Physics (1993) <http://dx.doi.org/10.1119/1.17349>
2. Ahmed, M. *Methods in Computational Physics*. North Carolina University (2012)
3. Sparisoma Viridi. *Visualisasi Data dengan Gnuplot: Modul Praktikum FI2283 Pemrograman dan Simulasi Fisika*. Versi 29 September 2013 (2013)
4. Resnick, Haliday, dkk. *Fisika Jilid 1 Edisi Ketiga*. Erlangga (1985)