Studi Analisis Mekanika Fisika dalam Lintasan *Loop the Loop* Berbentuk *Clothoid* pada *Roller Coaster*

Fahrizal Afrianto [1,a)],Don Jaya Putra[2,b)], Hani Kurniawati[3,c)],Akfiny Hasdi Aimon[4,d),] dan Neny Kurniasih[5,e)]

[1,2,3]Program Studi Magister Pengajaran Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

[4]Laboratorium Fisika Material Elektronik,
Kelompok Keilmuan Fisika Material Elektronik,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

[5]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

[a)]fahrizal.afrianto@students.itb.ac.id (corresponding author)
[b)]don_jaya_putra@students.itb.ac.id
[c)]hanikurniawati@students.itb.ac.id
[d)] akfiny@fi.itb.ac.id (corresponding author)
[e)] neny@fi.itb.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji transformasi energi pada lintasan loop the loop pada roller coaster. Penelitian dikaji menggunakan beberapa persamaan yang telah diturunkan dan dengan mengubah beberapa perubahan variabel seperti ketinggian awal peluncuran, jari-jari serta kecepatan yang dibutuhkan untuk mencapai titik tertinggi. Hasilnya diperoleh bahwa lintasan berbentuk clothoid membutuhkan lebih sedikit energi daripada loop berbentuk melingkar. Dalam kajian ini kereta roller coaster dianggap sebagai sebuah bola pejal yang menghasilkan ketinggian awal 2,47R pada loop berbentuk clothoid, sementara loop berbentuk lingkaran membutuhkan ketinggian awal lebih besar yaitu 2,7R. Pada lintasan clothoid juga memungkinkan kita untuk mengatur batas percepatan dan g-force yang dialami pengendara, sehingga lebih aman tanpa mengurangi sensasi ketegangan dalam menaiki roller coaster.

Kata-kata kunci: roller coaster, kekekalan energi, loop the loop

PENDAHULUAN

Roller Coaster merupakan salah satu wahana permainan yang diminati banyak orang. Meski demikian, berbeda dengan wahana lainnya, *Roller Coaster* tidak dioperasikan dengan mesin. Sebuah kereta *Roller Coaster* yang bergerak meluncur, menukik dan berputar dengan sangat cepat pada dasarnya hanya memanfaatkan gaya dan potensial gravitasi bumi. Pada makalah ini akan dibahas variabel-variabel dalam lintasan *loop the loop* pada *roller coaster* yaitu radius, ketinggian, kecepatan awal dan g-force menggunakan prinsip hukum kekekalan energi dengan bahan dari lintasan *loop the loop roller coaster* dianggap sama yaitu baja.

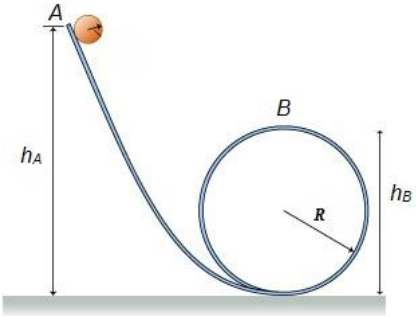
DASAR TEORI

Hukum Kekekalan Energi pada Lintasan *Loop the Loop*

Loop the loop adalah persoalan yang sangat populer pada permasalahan fisika klasik. Lintasan *loop the loop* telah ditambahkan pada lintasan *roller coaster* untuk memberikan sensasi yaang lebih menegangkan. Hukum kekelalan energi menjelaskan, bahwa total energi kinetik dan potensial yang dimiliki benda di setiap titik selalu konstan.

$$mgh_A + \frac{1}{2}mv_A{}^2 = mgh_B + \frac{1}{2}mv_B{}^2 \quad (1)$$

$$v_B{}^2 = 2g(h_A - 2R) \quad (2)$$



Gambar 1. Hukum kekekalan energi pada lintasan *loop the loop* [1]

dengan v_B adalah kecepatan benda pada titik tertinggi *loop*, h_A adalah ketinggian awal pelepasan benda dan R adalah jari-jari lintasan *loop the loop*. Selain itu dengan tinjauan gerak benda pada titik tertinggi, dengan menggunakan Hukum Newton diperoleh persamaan:

$$v_B{}^2 = gR \quad (3)$$

Dari persamaan (2) dan (3) didapatkan bahwa ketinggian minimum yang dibutuhkan untuk menempuh satu lintasan *loop the loop* adalah $h_A = 2{,}5R$. Persamaan (2) dan (3) dapat digunakan jika lintasan *loop the loop* yang digunakan berbentuk lingkaran dan licin sempurna. Namun, pada kenyataannya tidak ada permukaan yang benar-benar tanpa gesekan. Sehingga dibutuhkan tinjauan terhadap pengaruh dari gesekan yang bekerja pada benda. Misal sebuah kelereng (bola pejal) yang dilepaskan dari ketinggian tertentu menuju lintasan *loop the loop*, maka berlaku:

$$mg(h_A - h_B) = \frac{1}{2}mv_B{}^2 + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 \quad (4)$$

dengan mengetahui bahwa kecepatan benda di titik tertinggi $v_B{}^2 = gR$, maka dititik tertinggi lintasan *loop* diperoleh hubungan:

$$h_A = \frac{5gR + kr^2\dot{\theta}^2}{2g} \quad (5)$$

dengan hubungan $v = r\dot{\theta}$, benda yang digunakan merupakan bola pejal dengan tetapan $k = 2/5$, maka diperoleh ketinggian awal minimum agar bola pejal dapat menempuh satu lintasan penuh dari *loop the loop* adalah h_A= 2,7 R.

Bentuk *Clothoid* pada Lintasan *Loop the Loop*

Pada awalnya lintasan *loop the loop* pada *roller coaster* memang berbentuk lingkaran sempurna. Namun desain lingkaran sempurna ini memiliki banyak kelemahan. Pertama, gaya sentripetal yang dialami benda di setiap titik pada lintasan *loop the loop* adalah:

$$a_s = \frac{2g(\Delta h) + kr^2\dot{\theta}^2}{R} \quad (6)$$

dimana Δh adalah jarak dari titik tertinggi dalam lintasan dan R adalah jari-jari *loop*. Pada bentuk lingkaran, pengendara *roller coaster* akan merasakan gaya tekan yang begitu besar, khususnya di dasar lintasan *loop the loop*, karena di titik tersebut pengendara akan merasakan percepatan sebesar $5g$. Manusia normal rata-rata hanya mampu menoleransi percepatan gravitasi sebesar $3g$ sampai dengan $5g$, bergantung pada daya tahan dan tingkat toleransi terhadap percepatan pada tubuh setiap orang. Pada umumnya, asupan oksigen ke otak dapat terhenti sempurna saat seseorang mengalami percepatan *5g-6g* dan dapat mengakibatkan kehilangan kesadaran serta pingsan jika terjadi pada waktu yang cukup lama. *g-force* ini merupakan percepatan yang menyebabkan objek yang berakselerasi mengalami gaya yang bekerja berlawanan arah dengan arah akselerasi benda. Pada

 ISBN: 978-602-61045-4-0

roller coaster pengendara akan merasakan *g-force* maksimum di dasar dari lintasan *loop the loop*. Tabel 1 menunjukkan batas toleransi tubuh manusia terhadap *g-force*

Tabel 1. Batas toleransi tubuh manusia terhadap percepatan (*g-force*) pada selang waktu tertentu [2]

Percepatan yang dapat diterima	0,2 s		1,5 s		>12 s	
	min	max	min	max	min	max
a_x	-2,0 g	+6,0 g	-1,5 g	+5,0 g	-1,5 g	+2,5 g
a_y	-3,0 g	+3,0 g	-2,5 g	+2,5 g	-2,0 g	+2,0 g
a_z	-2,0 g	+6,0 g	-1,5 g	+5,0 g	-1,1 g	+2,0 g

Pada tabel 1 terlihat batas toleransi tubuh manusia terhadap *g-force* dalam sumbu *x, y* dan *z*. Namun untuk kajian ini penulis hanya meninjau percepatan pada arah sumbu *y* yaitu percepatan yang searah dengan arah percepatan gravitasi bumi.

Untuk alasan keamanan, perancang lintasan *roller coaster* harus menentukan batas percepatan maksimum yang dapat dirasakan pengendara *roller coaster*, kemudian memodifikasi lintasan untuk menjaga percepatan ini agar dapat bernilai konstan. Sebagaimana yang diketahui bahwa percepatan sentripetal sebanding dengan v^2/r, maka jika kecepatan berkurang nilai jari-jari juga harus berkurang agar percepatan dapat bernilai konstan. Bentuk *clothoid* dapat menghasilkan percepatan sentripetal yang relatif konstan di tiap titiknya. *Clothoid* yang juga dikenal dengan *Euler/Cornu Spiral* memiliki kelengkungan yang meningkat secara linier dengan jarak sepanjang kurva. Misalkan *s* adalah panjang busur sepanjang kurva, θ adalah sudut antara sumbu-x dan garis singgung pada kurva dan κ adalah kelengkungan kurva, yaitu laju perubahan dari θ terhadap *s*, maka akan didapatkan

$$d\theta = \kappa ds, \qquad dx = cos\theta ds, \quad dy = sin\theta ds$$

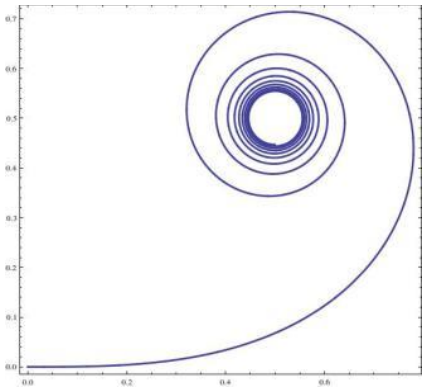
dengan diketahui bahwa kelengkungan kurva berubah secara linier terhadap panjang busur, maka dapat dituliskan $\kappa = cs$, dengan *c* adalah konstanta, sehingga didapatkan bahwa $\theta = \frac{1}{2}cs^2$. Maka *x* dan *y* dapat dituliskan dalam bentuk integral Fresnel sebagai berikut:

$$x = \int cos\frac{cs^2}{2}ds \text{ dan } y = \int sin\frac{cs^2}{2}ds \tag{7}$$

Jika $s = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{c}}t$, maka $ds = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{c}}dt$, sehingga didapatkan :

$$x = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{c}}\int_0^{\frac{\sqrt{c}}{\sqrt{\pi}}s} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^2\right)dt \text{ dan } y = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{c}}\int_0^{\frac{\sqrt{c}}{\sqrt{\pi}}s} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^2\right)dt \tag{8}$$

dengan menginput nilai x dan y dalam grafik, akan didapatkan *Cornu Spiral* yang merupakan dasar dari bentuk *clothoid*.



Gambar 2. Bentuk *Cornu Spiral* [3]

Kelebihan dari bentuk *clothoid* adalah jari-jari kelengkungannya secara bertahap berkurang dari atas menuju bawah. Meskipun jari-jari kelengkungan dari *clothoid* ini pada titik tertinggi lebih kecil daripada *loop* dengan bentuk lingkaran, *clothoid* memiliki jari-jari kelengkungan yang lebih besar di dasar lintasan. Jari-jari yang besar ini akan menurunkan percepatan sentripetal yang dialami pengendara di dasar *loop* sehingga gaya normal yang dibutuhkan di awal ketika memasuki *loop* dapat diminimalisir. Akibatnya, pengendara tidak akan merasakan peningkatan mendadak dari berat semu yang ia rasakan. Sehingga dapat memberikan waktu bagi pengendara untuk menyesuaikan diri tanpa menghilangkan sensasi ketegangan dan kesenangan ketika menaiki

roller coaster [4][5]. Oleh karenanya, bentuk lintasan *clothoid* dapat menjadi alternatif dalam desain *loop the loop* pada *roller coaster*.

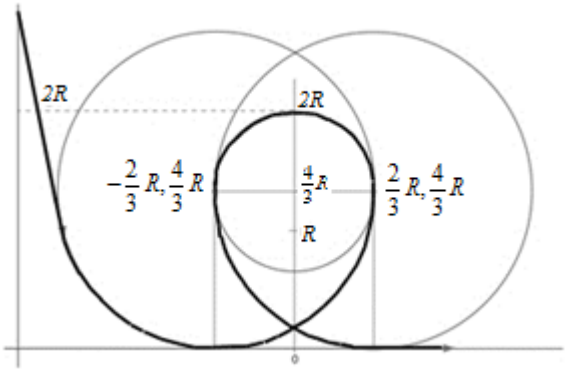
Gambar 3. Bentuk *Clothoid* pada lintasan *loop the loop* pada *Roller Coaster* Modern [6][7]

Jari-jari dari setiap titik pada lintasan *clothoid* dapat ditentukan dengan persamaan

$$R = \frac{v^2 - 2gh}{a - g\cos\theta} \tag{9}$$

dengan v adalah kecepatan benda ketika memasuki *loop*, h adalah posisi/ketinggian benda dari dasar *loop*, a adalah percepatan konstan yang ingin dicapai, g adalah percepatan gravitasi dan θ adalah posisi sudut benda dalam lintasan [7][8].

Perkiraan dari lintasan *clothoid* dijelaskan pada Gambar 4 di bawah ini. Tinggi total *loop* adalah $2R$. Hal ini diperkirakan dari perportongan lingkaran kecil dengan jari-jari $\frac{2}{3}R$ dan dua lingkaran yang lebih besar dengan jari-jari $\frac{4}{3}R$. Bagian lingkaran yang tumpang tindih adalah $\frac{4}{3}R$ di atas lingkaran bagian bawah. Lingkaran yang lebih kecil berpusat pada $(0, \frac{4}{3}R)$ dan lingkaran yang lebih besar dipusatkan pada $(-\frac{2}{3}R, \frac{4}{3}R)$ dan $(\frac{2}{3}R, \frac{4}{3}R)$.



Gambar 4. Bentuk *Clothoid loop* [9]

Dengan menggunakan metode perhitungan yang sama, yaitu dengan tinjauan hukum newton di puncak *loop* diperoleh bahwa:

$$v_B{}^2 = \frac{2}{3}gR \tag{10}$$

Berdasarkan hukum kekekalan energi dan dengan menggunakan Persamaan (4) dan (10), didapatkan informasi bahwa bola pejal membutuhkan ketinggian awal sebesar $h_A = 2{,}47R$ untuk dapat menempuh satu lintasan *loop* berbentuk *clothoid*.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah berupa studi literatur dengan menggunakan turunan rumus dan mengubah variabel pada lintasan *loop the loop* pada *roller coaster*. Hasil yang didapat lalu dibandingkan dengan data referensi *roller coaster*. Variabel yang dianggap konstan dalam studi ini adalah bahan dari lintasan yang merupakan *steel* dan sudut θ yang diambil yaitu 0° yang merupakan posisi saat kereta

roller coaster berada pada dasar *loop*, yaitu tepat saat akan masuk ke dalam *loop* dan saat titik tertinggi. Selain itu penulis juga hanya menggunakan bola pejal dengan momen inersia $I = \frac{2}{5}mR^2$ sebagai model dari *roller coaster*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk *g-force* sebesar 4g, 4,5g dan 5g berdasarkan literatur didapatkan sebagai berikut

Tabel 2. *g-force* 4g pada *roller coaster* [10]

Nama	Park	Negara	Tinggi *loop*(m)	Kecepatan (m/s)	*g-force*
Georgia Schorcer	Six Flags Over Georgia	US	26,67	24,14	4g
Golden Wings in Snowfield	Happy Valley	CH	26,52	24,01	4g
Black Mamba	Phantasialand	GE	19,99	22,21	4g
Batman the Ride	Six Flags Magic Mountain	US	23,47	22,35	4g

Tabel 3.*g-force* 4.5g pada *roller coaster* [10]

Nama	Park	Negara	Tinggi *loop*(m)	Kecepatan (m/s)	*g-force*
Sky Mountain	Mirabillandia	BR	31,08	29,32	4,5g
Full Throttle	Six Flags Magic Mountain	US	48,77	30,6	4,5g
Aftershock	Silverwood Theme Park	US	31,09	29,32	4,5g
Goliath	Six Flags New England	US	31,09	29,32	4,5g
Quantum Leap	Sochi Park Adventure Land	RU	31,09	29,32	4,5g
Stunt Fall	Parque Warner Madrid	ES	31,09	29,32	4,5g
Stealth	California's Great America	US	20,12	22,80	4,5g
Deja Vu	Six Flags Great America	US	31,09	29,32	4,5g

Tabel 4. *g-force* 5g pada *roller coaster* [10]

Nama	Park	Negara	Tinggi *loop*(m)	Kecepeatan (m/s)	*g-force*
Sky Wheel	Skyline Park	D	46,21	29,19	5g
Batman	Beto Carrero World	BR	43	31,29	5g
Robin	Beto Carrero World	BR	32	31,29	5g
Typhoon	Bobbejaanland	BE	19,02	22,22	5g

Dengan menggunakan persamaan (4) dan (7) serta dengan informasi bahwa dalam lintasan *loop* berbentuk *clothoid* dibutuhkan ketinggian awal $h_A = 2{,}47R$. Penulis menguji beberapa *roller coaster* untuk menentukan kecepatan yang dibutuhkannya agar bisa menempuh satu *loop*. Data ini kemudian disesuaikan dengan data referensi yang tersedia pada Tabel (2), (3) dan (4). Pada saat benda berada di dasar *loop*, diketahui $\theta = 0^0$ dan posisi benda dari dasar *loop* $h = 0$ m. Maka diperoleh data sebagai berikut:

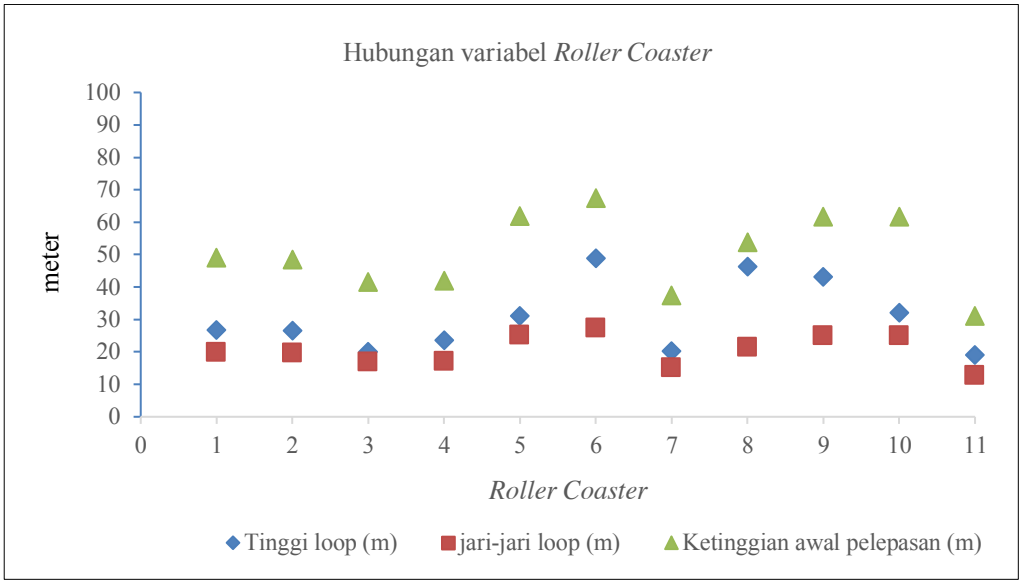
Tabel 5. Hasil perhitungan numerik variabel *roller coaster*

No	Nama	Data Referensi			Data Hasil Perhitungan		
		Tinggi *loop* (m)	*v* kecepatan (m/s)	*g-force*	*R* (m)	h_A (m)	*v* hitung (m/s)
1	Georgia Schorcer	26,67	24,14	4g	19,82	48,95	26,17
2	Golden Wings in Snowfield	26,52	24,01	4g	19,60	48,41	26,03

 ISBN: 978-602-61045-4-0

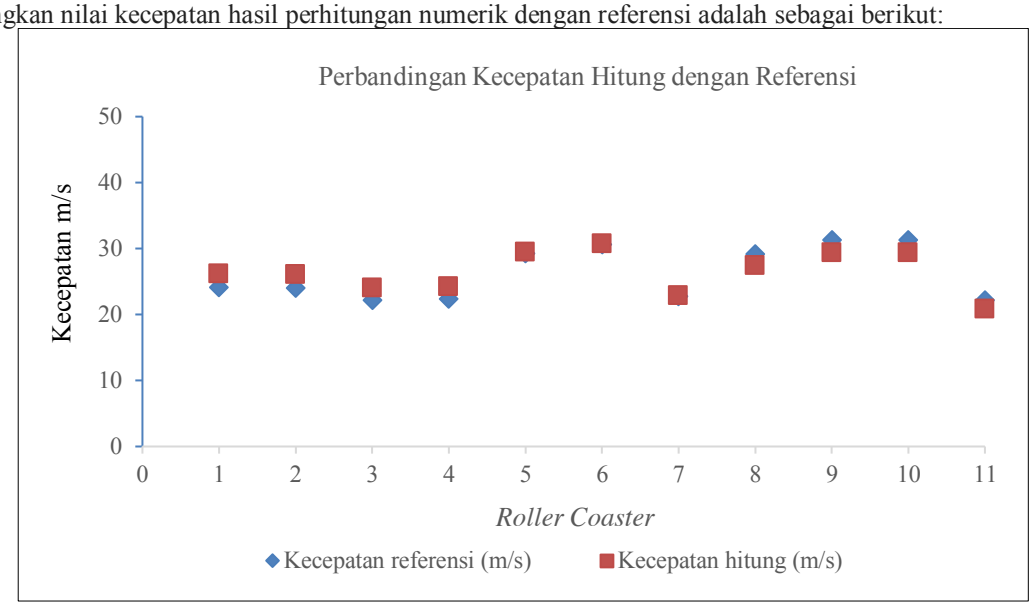
3	Black Mamba	19,99	22,21	4*g*	16,77	41,42	24,08
4	Batman the Ride	23,47	22,35	4*g*	16,99	41,96	24,23
5	Sky Mountain	31,08	29,32	4,5*g*	25,06	61,89	29,43
6	Full Throttle	48,77	30,6	4,5*g*	27,29	67,41	30,72
7	Stealth	20,12	22,80	4,5*g*	15,1	37,43	22,89
8	Sky Wheel	46,21	29,19	5*g*	21,37	53,69	27,41
9	Batman	43	31,29	5*g*	24,97	61,67	29,38
10	Robin	32	31,29	5*g*	24,97	61,67	29,38
11	Typhoon	19,02	22,22	5*g*	12,59	31,10	20,86

dimana R adalah jari-jari *loop*, h_A adalah ketinggian awal pelepasan, v hitung adalah kecepatan hasil perhitungan yang dibutuhkan *roller coaster* untuk menempuh satu lintasan *loop*. Dari data-data di atas dapat diperoleh hubungan antara jari-jari *loop*, ketinggian awal pelepasan dan tinggi *loop*, sebagaimana yang terlihat pada Gambar 5 berikut:



Gambar 5. Hubungan variabel *roller coaster*

Sedangkan nilai kecepatan hasil perhitungan numerik dengan referensi adalah sebagai berikut:



 ISBN: 978-602-61045-4-0

Gambar 6. Perbandingan kecepatan *roller coaster* hitung dengan referensi

Terlihat bahwa dari hasil perhitungan didapatkan bahwa nilai kecepatan yang dibutuhkan untuk menempuh *loop* tidak jauh berbeda dengan data referensi *roller coaster* yang terdapat di Tabel (2), (3) dan (4).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh informasi bahwa data kecepatan yang dibutuhkan *roller coaster* untuk menempuh satu *loop* sudah sesuai dengan perhitungan fisika. Selain itu dengan menggunakan *loop* berbentuk *clothoid* ini memungkinkan *roller coaster* untuk menggunakan lebih sedikit energi untuk mencapai satu lintasan penuh. Dari perhitungan diperoleh bahwa, bola pejal hanya membutuhkan ketinggian awal sebesar 2,47*R* yang nilainya lebih kecil daripada *loop* berbentuk melingkar yang membutuhkan ketinggian awal 2,7*R*. Selain itu dengan desain lintasan berbentuk *clothoid,* kita akan mampu mengontrol *g-force* sesuai batas yang diinginkan, sehingga pengendara akan lebih aman tanpa mengurangi sensasi ketegangan dalam menaiki *roller coaster*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak terkhusus kepada Program Studi Magister Pengajaran Fisika, Departemen Fisika Institut Teknologi Bandung.

REFERENSI

1. Unknown. Loop the Loop with a Twist. Diakses dari https://notendur.hi.is/emel/skoli/edl_h05/masteringphysics/9_10/looptheloop.htm pada tanggal 15 Maret 2018.
2. David Eager, Ann-Marie Pendrill, Nina Reistad. 2016. *Beyond Velocity and Acceleration : Jerk, Snap and Higher Derivatives*. European Journal of Physics. Eur. J. Phys. 37 (2016) 065008 (11pp)
3. Unknown. *Roller Coaster Loop*. diakses dari https://thatsmaths.com/2014/04/10/rollercoaster-loops.
4. Ann-Marie Pedrill. 2005. *Roller Caoster Loop Shape*. Department of Physics. Goteborg University. Sweden.
5. Connor Hain. 2016. *Roller Coaster Design*. Diakses dari https://www.slideshare.net/ConnorHain/rollercoaster-design-63377900 pada tanggal 18 Maret 2018
6. *Unkown*. *The Physics of Roller Coaster*. Diakses dari https://www.mrcaslickaltervista.org/SPH4U/TEXTBOOK/3.5.PDF pada tanggal 9 Maret 2018.
7. Nick Berry. 2014. *Why Roller Coaster Loops are Never Circular*. Diakses dari https://gizmodo.com/why-roller-coaster-loops-are-never-circular-1549063718 pada tanggal 18 maret 2018
8. Ken Brey. 2010. *Constant G-Force Coaster Loop*. diakses dari https://www.dmcinfo.com/latest-thinking/blog/id/228/geek-challenge-constant-g-force-coaster-loops pada tanggal 18 Maret 2018
9. James A. Musolino. 2014. *Teacher's Guide : Roller Coaster Physics*. K'NEX Education. Diakses dari http://media.knex.com/instructions/instruction-books/Education-Roller-Coaster-Physics-Teachers-Guide-78880.pdf pada tanggal 18 Maret 2018
10. Marden, D. 2016. *Roller Coaster Database*. Diakses dari https://rcdb.com pada tanggal 15 Maret 2018.