

Analisis Prinsip Energi Konservatif dalam Lintasan *Loop the Loop* pada Roller Coaster

Awal Mulia Rejeki Tumanggor^{1)*}, Ishak Pawarangan²⁾, Berton Maruli Siahaan³⁾

¹Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

²Program Studi Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

³Program Studi Fisika, Universitas Sam Ratulangi, Kota Manado, 95115, Indonesia

*Corresponding author. E-mail: awaltumanggor@unima.ac.id

Diterima 15 Oktober 2024; Disetujui 30 Oktober 2024

ABSTRAK

Prinsip energi konservatif adalah salah satu konsep fundamental dalam fisika yang digunakan untuk memahami sistem mekanika tertutup. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan prinsip energi konservatif melalui pendekatan kualitatif dalam lintasan *loop the loop* pada roller coaster sederhana. Metode penelitian yang digunakan bersifat analisis deskriptif, dengan pengumpulan informasi melalui studi literatur tentang lintasan *loop the loop* serta analisis konsep dan rumusan hasil kajian. Hasil analisis menerangkan bahwa hukum kekekalan energi mampu menjelaskan bagaimana energi mekanik dalam sistem dipertahankan selama melalui lintasan *loop the loop*, dengan meninjau parameter penting seperti gaya normal, kecepatan minimal, jari-jari lintasan, dan ketinggian minimal.

Kata kunci : energi konservatif, roller coaster, *loop the loop*

ABSTRACT

The conservative energy principle is one of the fundamental concepts in physics used to understand closed mechanical systems. This research aims to analyze the application of the conservative energy principle through a qualitative approach in the loop trajectory on a simple roller coaster. The research method used is descriptive analysis, with information collected through literature study on the loop trajectory as well as concept analysis and formulation of study results. The analysis results explain that the law of conservative energy can explain how the mechanical energy in the system is maintained while going through the loop trajectory by reviewing important parameters such as normal force, minimum speed, radius of the loop trajectory, and minimum height.

Keywords : Conservative energy, roller coaster, *loop the loop*

1. PENDAHULUAN

Fisika adalah ilmu yang mempelajari tentang ciri-ciri dan sifat-sifat dasar materi, berbagai bentuk energi dan cara materi maupun energi berinteraksi dalam dunia di sekitar kita (Nirmala et al., 2021; Tumanggor et al., 2019). Prinsip konservasi energi adalah salah satu ide mendasar dalam ilmu fisika yang menyatakan bahwa di dalam sistem yang tertutup tanpa adanya pengaruh dari gaya eksternal, jumlah energi mekanik total akan tetap stabil (Halliday et al., 2010; Serway & Jewett, 2016). Konsep ini berfungsi sebagai landasan untuk berbagai fenomena fisika, termasuk dalam pergerakan roller coaster, yaitu suatu wahana hiburan yang digemari banyak orang, di mana *roller coaster* memanfaatkan hukum konservasi energi untuk merancang lintasan kereta yang efisien dan aman. Lintasan *loop the loop* pada *roller coaster* adalah salah satu elemen yang paling rumit dan menarik, di mana terjadi pergantian

energi potensial dan kinetik secara berkesinambungan pada pergerakan kereta (Afrianto et al., 2018). Fenomena ini membuka kesempatan untuk menjadikan *roller coaster* sebagai contoh praktis dalam pembelajaran fisika. Menggunakan situasi nyata dalam pengajaran sains dapat meningkatkan minat serta pemahaman konsep yang bersifat abstrak (Lengkong et al., 2021; Tumanggor & Supahar, 2020). Oleh karena itu, analisis lintasan *loop the loop* dapat menjadi cara tepat dan menarik untuk memperkenalkan konsep energi konservatif.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis prinsip konservasi energi terutama parameter yang mempengaruhi pergerakan *roller coaster* pada lintasan *loop the loop*. Diharapkan hasil dari studi ini dapat memberikan kontribusi terhadap pemahaman konsep serta hubungannya dengan pembelajaran fisika dan kehidupan sehari-hari.

2. KAJIAN LITERATUR

Energi Konservatif

Prinsip yang berguna dan penting mengenai energi mekanik total yaitu energi tersebut merupakan besaran yang kekal. Energi mekanik total E tetap konstan selama tidak ada gaya non-konservatif yang bekerja. Jika energi kinetik bertambah, maka energi potensial harus berkurang dengan besar yang sama untuk mengimbangnya. Hal itu dapat ditinjau dari Persamaan 1 di bawah ini (Bolivar, 2021).

$$E_{initial} = E_{final}$$

$$K_i + U_{g_i} + U_{s_i} = K_f + U_{g_f} + U_{s_f} + E_{thermal}$$

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + mgy_i + \frac{1}{2}kx_i^2 = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgy_f + E_{th}$$

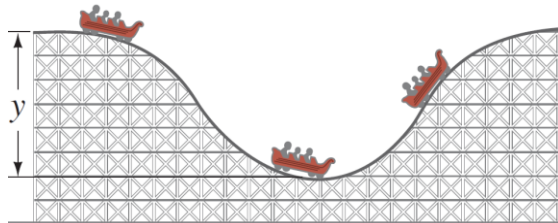
$$\dots(1)$$

K adalah energi kinetik; U_g adalah energi potensial; U_s adalah energi potensial pegas (spring); $E_{thermal}$ adalah energi panas; i (*initial*) yang menerangkan keadaan awal, dan f (*final*) yang menerangkan keadaan akhir.

Jika hanya gaya-gaya konservatif yang bekerja, energi mekanik total dari sebuah sistem tidak bertambah maupun berkurang pada proses apapun, hal ini yang menyatakan bahwa energi tersebut bersifat konstan/ kekal.

Roller Coaster

Roller coaster adalah salah satu wahana bermain yang mendebarkan di setiap taman hiburan, dengan lintasan tanjakan dan turunan curam yang membawa kereta melalui tikungan tajam dan perubahan kecepatan dan arah secara mendadak (Pendrill & Eager, 2020; Sukri et al., 2021). Pada awalnya, *roller coaster* hanya memiliki energi potensial. *Roller coaster* akan kehilangan energi potensial dan mendapat energi kinetik saat meluncur menuruni bukit, tetapi jumlah keduanya konstan. Energi kinetik maksimal saat posisi di kaki bukit, dan saat mendaki bukit berikutnya, energi kinetik berubah kembali menjadi energi potensial. Hal ini dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 1 (Giancoli, 2015).



Gambar 1. *Roller coaster* pada lintasan

Dengan mengetahui bahwa energi potensial sebanding dengan ketinggian vertikal,

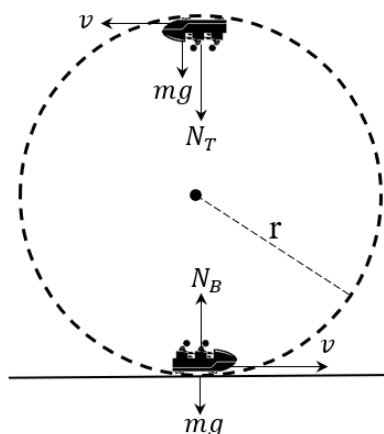
kekekalan energi menunjukkan pada kita bahwa (tanpa gaya gesekan) *roller coaster* berhenti pada ketinggian yang sama dengan ketinggian awalnya. Jika kedua bukit mempunyai ketinggian yang sama, *roller coaster* hampir tidak dapat mencapai puncak bukit kedua. Jika bukit kedua lebih rendah dari yang pertama, maka tidak semua energi kinetik *roller coaster* akan diubah menjadi energi potensial dan perjalanan dapat dilanjutkan melalui puncak dan menuruni sisi berikutnya (Pendrill & Eager, 2020; Young & Freedman, 2020). Jika bukit kedua lebih tinggi, *roller coaster* hanya akan mencapai ketinggian yang sama dengan ketinggian awalnya pada bukit pertama (Giancoli, 2015). Hal ini benar (jika tiada gesekan) tanpa bergantung pada kecuraman bukit, karena energi potensial hanya bergantung pada ketinggian vertikal.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif dengan pendekatan deskriptif (Devetak et al., 2010). Pengumpulan data dilakukan melalui kajian literatur dan analisis teoritis mengenai konsep energi konservatif. Fokus analisis meliputi konsep gaya normal pada titik dasar dan puncak lintasan melingkar, penurunan rumus matematis untuk meninjau kecepatan minimal di puncak lintasan *loop*, dan menganalisis penerapan hukum kekekalan energi terhadap parameter yang mempengaruhi lintasan *loop*. Sasaran penelitian adalah hasil rancangan *roller coaster* sederhana dengan lintasan *loop the loop* untuk mengkaji parameter utama yang mempengaruhi pergerakan *roller coaster*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Roller Coaster sederhana dapat didesain untuk dijadikan eksperimen pembelajaran dan meninjau konsep fisika serta mengukur parameter penting yang memengaruhi gerak *Roller Coaster* pada lintasan *loop the loop*. Parameter yang berperan menjaga kereta tetap berada di lintasan adalah Gaya Normal (N). Gaya normal diberikan oleh permukaan lintasan terhadap benda yang bersentuhan dengannya. Gaya normal diperlukan untuk mengimbangi gaya gravitasi dan memberikan gaya yang diperlukan untuk percepatan sentripetal, karena percepatan pada gerak melingkar beraturan selalu mengarah ke pusat lingkaran, hal ini dapat diilustrasikan pada Gambar 2 (Young & Freedman, 2020).



Gambar 2. Diagram Gaya Normal di atas dan bawah

Kita tinjau kondisi gaya normal saat posisi kereta di bawah dan di atas pada Gambar 2 dengan menggunakan Hukum II Newton, di mana jumlah gaya dalam arah radial ($\sum F_r$) sama dengan $\frac{mv^2}{r}$. Saat di posisi bawah, gaya normal mencapai nilai maksimal tepat di bagian dudukan kereta yang mendorong ke atas, karena harus menahan berat kereta (mg) sekaligus menyediakan gaya sentripetal ($\frac{mv^2}{r}$) yang diperlukan untuk melakukan gerak melingkar. Gaya normal (N_B) bernilai positif karena menuju pusat *loop* dan mg bertanda negatif karena menjauh dari pusat *loop*, sehingga diperoleh persamaan 2 (Halliday et al., 2010):

$$N_B - mg = \frac{mv^2}{r}$$

$$N_B = \frac{mv^2}{r} + mg \quad (2)$$

Persamaan 2 menjelaskan bahwa tubuh akan terasa lebih berat saat berada di dasar *loop* dikarenakan jumlah gaya yang bekerja secara bersamaan.

Posisi di puncak *loop* menunjukkan posisi kereta terbalik sehingga berat kereta (mg) dan gaya normal mengarah ke bawah menuju pusat *loop*. Kedua gaya tersebut bersama-sama menghasilkan gaya sentripetal, sehingga diperoleh persamaan 3 (Halliday et al., 2010):

$$N_T + mg = \frac{mv^2}{r}$$

$$N_T = \frac{mv^2}{r} - mg \quad (3)$$

Parameter penting lainnya yang berperan sebagai penentu *roller coaster* dapat melewati puncak *loop the loop* tanpa kehilangan kontak dengan lintasan adalah kecepatan minimal (v). Jika kecepatan di puncak *loop* terlalu kecil,

maka gaya normal (N_T) akan mendekati nilai nol, sehingga kereta tidak lagi memiliki gaya yang menahan kontak dengan lintasan yang menyebabkan kereta akan jatuh akibat gravitasi.

Kita dapat menentukan kecepatan minimal untuk dapat melewati puncak *loop* ketika kondisi gaya normal bernilai nol ($N_T = 0$), hal ini menimbulkan gaya sentripetal hanya dipengaruhi oleh gaya berat, sehingga dengan menggunakan Persamaan 3, maka kecepatan minimal dapat diperoleh, hal ini ditunjukkan pada Persamaan 4 (Giancoli, 2015):

$$\frac{mv^2}{r} - mg = N_T$$

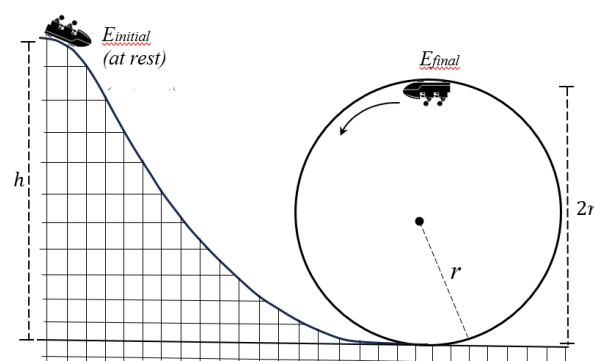
$$\frac{mv^2}{r} - mg = 0$$

$$\frac{mv^2}{r} = mg$$

$$v^2 = gr \rightarrow v = \sqrt{gr} \quad (4)$$

Persamaan 4 adalah kecepatan minimal dengan r adalah jari-jari lintasan *loop the loop* di mana kita merasa tidak berbobot saat berada di puncak *roller coaster*. Distribusi energi pada lintasan *loop the loop* menunjukkan bagaimana energi potensial berubah menjadi energi kinetik secara bergantian tanpa kehilangan energi mekanik total dalam sistem tertutup. Namun, kenyataan di lapangan menunjukkan gesekan dan hambatan udara dapat mempengaruhi energi total, sehingga diperlukan energi tambahan untuk mengatasi kehilangan ini agar kecepatan minimal tetap terjaga.

Kita mengetahui ketinggian awal *roller coaster* menjadi parameter yang perlu dipertimbangkan. Jika ketinggian awal *roller coaster* tidak mencukupi, kemungkinan besar kereta tidak memiliki energi kinetik yang memadai untuk melewati puncak lintasan *loop* dan akan menimbulkan masalah yang serius (Young & Freedman, 2015). Ketinggian *roller coaster* dapat diilustrasikan pada Gambar 3 berikut (Giancoli, 2015).



Gambar 3. Lintasan Loop the Loop

Gambar 3 menginterpretasikan bahwa ketinggian awal *roller coaster* harus lebih besar dari diameter *loop* ($h > 2r$), oleh karena itu, kita perlu meninjau energi konservatif yang mengatakan bahwa energi awal sama dengan energi akhir untuk dapat menentukan ketinggian minimal (h) kereta agar dapat melintasi *loop* tersebut (Giancoli, 2015). Berikut uraian konsep energi konservatif untuk memperoleh ketinggian awal (Bolivar, 2021):

$$\begin{aligned} E_{initial} &= E_{final} \\ mgh_i + \frac{1}{2}mv_i^2 &= mgh_f + \frac{1}{2}mv_f^2 \\ mgh_i &= mg(2r) + \frac{1}{2}mv_f^2 \\ h &= 2r + \frac{1}{2g}v^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Dengan menyubstitusikan persamaan 4 ke persamaan 5, maka diperoleh persamaan 6:

$$\begin{aligned} h &= 2r + \frac{1}{2g}v^2 \\ h &= 2r + \frac{1}{2g}(gr) \\ h &= 2r + \frac{1}{2}r \\ h &= \frac{5}{2}r \end{aligned} \quad (6)$$

Nilai hasil dari Persamaan 6 di atas tentu saja lebih besar dari diameter ($2r$) lintasan *loop*. *Roller coaster* selalu dimulai dari ketinggian tertentu untuk dapat meluncur, oleh karena itu tidak ada mekanisme tambahan untuk menggerakkan kereta itu selain energi potensial awal (Afrianto et al., 2018). Pada kenyataannya, ketinggian awal *roller coaster* biasanya jauh lebih tinggi dari Persamaan 6 karena mengalami gesekan di sepanjang lintasan dan kereta memiliki hambatan udara. Hal tersebut yang memicu perubahan energi menjadi energi termal. Sehingga penulis menetapkan ketinggian awal dalam merancang *roller coaster* sederhana sebaiknya lebih dari dua setengah kali jari-jari lintasan *loop* ($h = \frac{5}{2}r$) sebagai parameter utama *roller coaster* dapat melewati lintasan *loop the loop*.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan maka diperoleh gambaran deskriptif yang jelas, di mana prinsip energi konservatif menjadi konsep fundamental dalam menganalisis lintasan *loop the loop* pada *roller coaster*. Parameter seperti gaya normal, kecepatan minimal, jari-jari lintasan dan ketinggian minimal sangat mempengaruhi keberhasilan dari lintasan *loop the loop*. *Roller coaster* sederhana dapat dirancang untuk memperkuat pemahaman konsep fisika. Hal ini juga dapat

melatih kemampuan menganalisis parameter yang mempengaruhi gerak benda, mampu memecahkan masalah berbasis data dan persamaan matematis. Harapannya pada penelitian lebih lanjut dapat mengkaji efek gesekan dan hambatan udara, bentuk lintasan *roller coaster*, jenis model kereta pengganti *roller coaster* dengan momen inersia yang berbeda, serta perubahan energi yang terjadi terhadap gerak *roller coaster*.

6. REFERENSI

- Afrianto, F., Putra, D. J., Kurniawati, H., & Hasdi, A. (2018). Studi Analisis Mekanika Fisika dalam Lintasan Loop the Loop Berbentuk Clothoid pada Roller Coaster. *Prosiding SNIPS*, 247–253.
- Bolivar, N. (2021). *General Physics*. Arcler Press.
- Devetak, I., Glažar, S. A., & Vogrinc, J. (2010). The Role of Qualitative Research in Science Education. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 6(1), 77–84.
- Giancoli, D. C. (2015). *Physics: Principles with Applications, Global Edition* (Vol. 1). Pearson Education Limited. https://www.amazon.ca/Physics-Principles-Applications-GIANCOLI-DOUGLAS/dp/1292057122/ref=dp_ob_title_bk
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2010). *Fundamentals Of Physics* (Nineth). Wiley.
- Lengkong, M., Istiyono, E., Rampean, B. A. O., Tumanggor, A. M. R., & Nirmala, M. F. T. (2021). Development of Two-Tier Test Instruments to Detect Student's Physics Misconception. *Proceedings of the 7th International Conference on Research, Implementation, and Education of Mathematics and Sciences (ICRIEMS 2020)*, 528(Icriems 2020), 561–566. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.210305.082>
- Nirmala, M. F. T., Gebze, D. A., Tumanggor, A. M. R., Lengkong, M., & Wilujeng, I. (2021). Physics Learning with E-Book Using Problem Based Learning (PBL) Model to Improve Image Representation Ability of High School Students on Optical Material. *Proceedings of the 7th International Conference on Research, Implementation, and Education of Mathematics and Sciences (ICRIEMS 2020)*, 528(Icriems 2020), 547–554.

<https://doi.org/10.2991/assehr.k.210305.080>

- Pendrill, A. M., & Eager, D. (2020). Velocity, acceleration, jerk, snap and vibration: Forces in our bodies during a roller coaster ride. *Physics Education*, 55(6). <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aba732>
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2016). *Physics for Scientists and Engineers Volume 1* (Ninth Edit). CENGAGE Learning.
- Sukri, N. M., Nor-Al-Din, S. M., Razali, N. K., & Mazwin, M. A. A. (2021). Designing Roller Coaster Loop's By Using Extended Uniform Cubic B-Spline. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1176(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1176/1/012039>
- Tumanggor, A. M. R., Jumadi, J., Wilujeng, I., & Ringo, E. S. (2019). The Profile of Students' Physics Problem Solving Ability in Optical Instruments. *Jurnal Penelitian & Pengembangan Pendidikan Fisika*, 5(1), 29–40. <https://doi.org/10.21009/1.05104>
- Tumanggor, A. M. R., & Supahar, S. (2020). The development of diagnostic test instrument for mathematical representation ability (PhysDTRA) in high school physics learning. *Journal for the Education of Gifted Young Scientists*, 8(4), 1439–1453. <https://doi.org/10.17478/jegys.777425>
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2015). Sears & Zemansky's University Physics with Modern Physics. In *University Physics with Modern Physics*. Pearson Education, Inc.
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2020). *Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics*. Pearson Education Limited.