

Simulasi Numerik Alat Pelontar Bola Berbasis Jungkat-Jungkit

1st Dino Widian Firmansyah
Program Studi Teknik Fisika
Telkom University
Bandung, Indonesia
dinowidianf@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Shabrina Izzatunnisa
Program Studi Teknik Fisika
Telkom University
Bandung, Indonesia
shabrinaizzatunnisa@student.telkomuniversity.ac.id

Ringkasan— Dalam proyek tugas besar ini, kami mencoba merancang sebuah simulasi untuk memahami cara kerja alat pelontar bola yang menggunakan sistem jungkat-jungkit sederhana. Fokus utama kami adalah melihat bagaimana energi potensial dari beban yang dijatuhkan bisa diubah menjadi energi kinetik untuk melontarkan bola bekel. Dengan menggunakan prinsip dasar kekekalan energi dan rumus gerak parabola, kami menghitung kecepatan awal bola dan memetakan lintasannya dalam ruang dua dimensi. Simulasi ini kami jalankan secara numerik menggunakan bahasa C dengan metode Euler, yang hasilnya kemudian kami olah melalui Python agar visualisasinya lebih mudah dipahami. Meskipun kami masih menggunakan beberapa penyederhanaan, seperti mengabaikan hambatan udara, hasil simulasi ini sudah cukup baik dalam menggambarkan perilaku sistem pelontar secara fisis. Proyek ini bukan hanya sekadar tugas pemrograman, tetapi juga menjadi cara kami untuk belajar bagaimana konsep mekanika klasik bisa diterapkan langsung ke dalam sebuah kode program yang fungsional.

Keywords—alat pelontar mekanik, jungkat-jungkit, konservasi energi, gerak parabola, simulasi numerik.

I. PENDAHULUAN

Sistem pelontar proyektil merupakan salah satu bentuk dari aplikasi mekanika klasik yang banyak digunakan dalam berbagai bidang rekayasa, baik untuk keperluan pendidikan maupun pengembangan sistem mekanik. Analisis gerak proyektil penting karena berkaitan dengan penentuan kecepatan awal, sudut pelepasan, serta karakteristik lintasan benda yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Studi terkini menunjukkan bahwa pemodelan dan analisis sistem pelontar dapat dilakukan secara efektif melalui pendekatan mekanika dan optimasi parameter desain [1].

Dalam pengembangan sistem pelontar mekanik, parameter desain dan kondisi awal dapat berpengaruh performa pelontaran. Penelitian mengenai mekanisme pelontar proyektil menunjukkan bahwa analisis numerik dan simulasi mampu memprediksi perilaku proyektil secara akurat sebelum dilakukan pengujian eksperimental, sehingga dapat meningkatkan efisiensi perancangan sistem pelontar [1], [2]. Pendekatan ini banyak digunakan pada sistem pelontar skala laboratorium karena mampu memberikan gambaran kuantitatif mengenai lintasan dan kecepatan proyektil.

Selain itu, simulasi numerik gerak proyektil juga digunakan untuk menganalisis lintasan dan interaksi proyektil dalam berbagai kondisi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model numerik dapat menggambarkan lintasan proyektil dengan baik dan mendukung analisis teoritis gerak parabola [2]. Pendekatan ini relevan untuk mengevaluasi pengaruh kondisi awal terhadap hasil pelontaran secara sistematis.

Pada konteks alat pelontar sederhana, penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem pelontar mekanik dapat dikembangkan sebagai media praktikum yang efektif untuk mempelajari konsep mekanika, khususnya gerak parabola dan transfer energi [3]. Berdasarkan hal tersebut, paper ini menyajikan rancangan serta implementasi simulasi gerak bola pada pelontar sederhana tanpa mempertimbangkan hambatan udara. Hal ini disebabkan karena bola yang digunakan memiliki massa relatif kecil sehingga pengaruh hambatan udara terhadap gerak parabola yang terjadi dianggap sangat kecil secara teoretis. Perumusan pada pelontar sederhana ini didasarkan pada Hukum Kekekalan Energi yang menjelaskan secara rinci mekanisme kerja alat tersebut.

II. METODE ANALITIK DAN SIMULASI

Bagian ini membahas penurunan model matematis gerak parabola bola yang dilontarkan menggunakan alat pelontar berbasis jungkat-jungkit dengan beban jatuh sebagai sumber energi. Analisis diawali dengan pemodelan energi mekanik sistem melalui pendekatan usaha-energi, dengan meninjau konversi energi potensial gravitasi beban menjadi energi kinetik bola sesaat setelah bola terlepas dari wadah. Selanjutnya, dilakukan analisis gerak parabola bola berdasarkan kecepatan awal yang dihasilkan, serta pemodelan simulasi numerik untuk memetakan lintasan bola secara diskret terhadap waktu.

A. Model Usaha-Energi Alat Pelontar Berbasis Jungkat-Jungkit

Alat pelontar yang digunakan pada penelitian ini bekerja berdasarkan prinsip jungkat-jungkit, di mana sebuah beban digantung pada salah satu ujung jungkat-jungkit dan wadah bola berada pada ujung lainnya. Pada kondisi awal, sistem berada dalam keadaan diam dan ditahan oleh mekanisme pengunci. Ketika pengunci dilepas, beban jatuh akibat gaya gravitasi dan menghasilkan momen gaya yang memutar tuas sehingga bola terlepas dari wadah dan bergerak sebagai proyektil.

Karena sistem berada dalam keadaan diam sebelum dilepaskan dan tidak ada kerja eksternal yang dilakukan selama pelepasan, maka sistem dianalisis menggunakan prinsip konservasi energi mekanik. Secara umum, hubungan usaha dan perubahan energi mekanik dirumuskan sebagai:

$$W = \Delta EM \quad (1)$$

Karena kerja eksternal seperti gesekan udara dan rugi energi pada poros diabaikan, maka sistem dianggap sebagai sistem tertutup. Dengan demikian, energi mekanik total sistem sebelum dan sesudah pelepasan adalah konstan.

$$W = 0 \Rightarrow \Delta EM = 0 \quad (2)$$

Sehingga diperoleh hubungan:

$$EM_1 = EM_2 \quad (3)$$

Dimana E_{M1} merupakan energi mekanik sistem sebelum dilepaskan dan E_{M2} merupakan energi mekanik sistem sesaat setelah bola keluar dari alat pelontar.

B. Energi Mekanik Awal dan Akhir Sistem

1. Energi Mekanik Awal

Pada kondisi awal, sistem berada dalam keadaan diam dan energi mekanik sistem didominasi oleh energi potensial gravitasi beban. Energi potensial gravitasi beban dirumuskan sebagai:

$$Ep_{1 \text{ beban}} = m_b gh \quad (4)$$

Keterangan:

- m_b = massa beban (kg)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h = tinggi jatuh beban (m)

Karena tidak terdapat energi kinetik pada kondisi awal, maka energi mekanik awal sistem adalah:

$$EM_1 = Ep_{1 \text{ beban}} = m_b gh \quad (5)$$

2. Energi Mekanik Sesaat Bola Terlepas

Sesaat setelah bola terlepas dari wadah, bola memiliki kecepatan awal v_0 dan ketinggian awal terhadap permukaan tanah. Energi mekanik bola pada kondisi ini terdiri dari energi kinetik dan energi potensial gravitasi.

Energi kinetik bola dirumuskan sebagai:

$$EK = \frac{1}{2} m_k v_0^2 \quad (6)$$

Energi potensial gravitasi bola dirumuskan sebagai:

$$Ep_{bola} = m_k gh_0 \quad (7)$$

Keterangan:

- m_k = massa bola (kg)
- h_0 = ketinggian awal bola saat terlepas (m)

Energi mekanik akhir sistem dinyatakan sebagai:

$$EM_2 = EK + Ep_{bola} \quad (8)$$

Substitusi Persamaan (6) dan (7) ke dalam Persamaan (8) memberikan:

$$EM_2 = \frac{1}{2} m_k v_0^2 + m_k gh_0 \quad (9)$$

C. Penurunan Persamaan Kecepatan Awal Bola

Dengan menggunakan prinsip konservasi energi mekanik dari Persamaan (3), diperoleh:

$$E_{M1} = E_{M2} \quad (10)$$

Substitusi Persamaan (5) dan (9) ke dalam Persamaan (10) memberikan:

$$m_b gh = \frac{1}{2} m_k v_0^2 + m_k gh_0 \quad (11)$$

Mengalikan kedua ruas dengan faktor 2 diperoleh:

$$2m_b gh = m_k v_0^2 + 2m_k gh_0 \quad (12)$$

Menyederhanakan persamaan menghasilkan:

$$m_k v_0^2 = 2m_b gh - 2m_k gh_0 \quad (13)$$

Sehingga kecepatan awal bola dapat dirumuskan sebagai:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2m_b gh - 2m_k gh_0}{m_k}} \quad (14)$$

D. Penentuan Ketinggian Awal Bola

Ketinggian awal bola saat terlepas dari wadah dipengaruhi oleh panjang lengan tuas dan sudut elevasi pelepasan bola. Secara geometris, ketinggian awal bola dapat ditentukan menggunakan hubungan trigonometri:

$$h_0 = L \sin \theta \quad (15)$$

Jika terdapat ketinggian tambahan dari kedudukan alat, maka ketinggian awal total dirumuskan sebagai:

$$h_0 = L \sin \theta + h_{tambahan} \quad (16)$$

Substitusi Persamaan (16) ke dalam Persamaan (14) menghasilkan persamaan kecepatan awal bola yang mempertimbangkan seluruh parameter sistem:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2m_b gh - 2m_k g(L \sin \theta + h_{tambahan})}{m_k}} \quad (17)$$

E. Pembuktian Dimensi

Dimensi dari Persamaan (17) diuji untuk memastikan kesesuaian satuan.

Energi potensial beban:

$$m_b gh \rightarrow [M][L][T]^{-2}[L] = [M][L]^2[T]^{-2} \quad (18)$$

Energi kinetik bola:

$$\frac{1}{2} m_k v_0^2 \rightarrow [M][L]^2[T]^{-2} \quad (19)$$

Sehingga dimensi dari v_0 adalah:

$$v_0 = [L][T]^{-1} \quad (20)$$

Hasil ini sesuai dengan dimensi kecepatan, sehingga persamaan dinyatakan valid secara dimensional.

F. Gerak Parabola Bola

Setelah bola terlepas dari alat pelontar, gerakannya dianalisis sebagai gerak parabola tanpa hambatan udara. Kecepatan awal bola diuraikan ke dalam komponen horizontal dan vertikal sebagai berikut:

$$v_{0x} = v_0 \cos \theta \quad (21)$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \theta \quad (22)$$

Persamaan posisi bola sebagai fungsi waktu dirumuskan sebagai:

$$x(t) = v_{0x} t \quad (23)$$

$$y(t) = h_0 + v_{0y} t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (24)$$

G. Metode Simulasi Numerik

Simulasi numerik dilakukan untuk memetakan lintasan bola menggunakan metode Euler dengan selang waktu kecil Δt . Kecepatan dan posisi bola pada setiap langkah waktu dihitung menggunakan persamaan diskret:

$$v_y(t + \Delta t) = v_y(t) - g\Delta t \quad (25)$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v_x\Delta t \quad (26)$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + v_y\Delta t \quad (27)$$

Kondisi awal simulasi ditetapkan sebagai:

$$x_0 = 0 \quad (28)$$

$$y_0 = h_0 \quad (29)$$

Simulasi dihentikan ketika kondisi berikut terpenuhi:

$$y_n \leq 0 \quad (30)$$

Kondisi ini menandakan bola telah menyentuh permukaan tanah. Dari simulasi ini diperoleh parameter-parameter seperti waktu tempuh total, jarak horizontal maksimum, dan ketinggian maksimum bola.

III. IMPLEMENTASI ALGORITMA DAN KODE

A. Algoritma simulasi numerik

1. Simulasi Numerik Alat Pelontar Bola Berbasis Jungkat-Jungkit

Simulasi Numerik Alat Pelontar Bola Berbasis Jungkat-Jungkit

Input: Massa bola m_{bola} , massa beban m_{beban} , tinggi jatuh beban h_{drop} , efisiensi alat η , sudut lontar α_{deg} , tinggi awal bola y_0

Output: File `percobaan.csv`, jarak teoritis, jarak simulasi, dan tinggi maksimum bola

```
1: // Inisialisasi Konstanta
2:  $g \leftarrow 9.81$ 
3:  $\Delta t \leftarrow 0.001$ ,  $t_{max} \leftarrow 5.0$ 
4: // Pilihan Parameter
5: Tanyakan apakah menggunakan nilai default
6: if tidak menggunakan default then
7:   Input semua parameter sistem
8: end if
9: // Perhitungan Energi Beban
10:  $E_{beban} \leftarrow m_{beban} \cdot g \cdot h_{drop}$ 
11:  $E_{efektif} \leftarrow \eta \cdot E_{beban}$ 
12: // Kecepatan Awal Bola
13:  $v_0 \leftarrow \sqrt{2E_{efektif}/m_{bola}}$ 
14:  $\alpha_{rad} \leftarrow \alpha_{deg} \cdot \pi/180$ 
15: // Jarak Teoritis (Analitik)
16:  $R_{teori} \leftarrow \frac{v_0 \cos \alpha_{rad}}{g} \left( v_0 \sin \alpha_{rad} + \sqrt{(v_0 \sin \alpha_{rad})^2 + 2gy_0} \right)$ 
17: Tampilkan  $E_{efektif}$ ,  $v_0$ , dan  $R_{teori}$ 
18: // Inisialisasi Simulasi Numerik
19:  $t \leftarrow 0$ ,  $x \leftarrow 0$ ,  $y \leftarrow y_0$ 
20:  $v_x \leftarrow v_0 \cos \alpha_{rad}$ 
21:  $v_y \leftarrow v_0 \sin \alpha_{rad}$ 
22:  $y_{max} \leftarrow y$ ,  $t_{ymax} \leftarrow 0$ 
23: Buka file percobaan.csv
24: Tulis header t,x,y
25: // Loop Simulasi Gerak Projektil
26: while  $t \leq t_{max}$  and  $y \geq 0$  do
27:   Simpan  $(t, x, y)$  ke file
28:   if  $y > y_{max}$  then
29:      $y_{max} \leftarrow y$ 
30:      $t_{ymax} \leftarrow t$ 
31:   end if
32:    $v_y \leftarrow v_y - g\Delta t$ 
33:    $x \leftarrow x + v_x\Delta t$ 
34:    $y \leftarrow y + v_y\Delta t$ 
35:    $t \leftarrow t + \Delta t$ 
36: end while
37: Tutup file
38: // Output Akhir
39: Tampilkan jarak simulasi  $x$ 

40: Tampilkan tinggi maksimum  $y_{max}$  dan waktu  $t_{ymax}$ 
41: Tampilkan lokasi file hasil simulasi
```

Algoritma 1 menyajikan simulasi numerik gerak proyektil yang diawali dengan inisialisasi konstanta gravitasi g dan langkah waktu Δt . Sistem menyediakan pilihan parameter, baik menggunakan nilai default maupun melalui input manual oleh pengguna. Perhitungan utama melibatkan estimasi energi

efektif beban untuk menentukan kecepatan awal bola (v_0) dan jarak teoritis menggunakan persamaan analitik. Simulasi dinamis dijalankan melalui iterasi *while-loop* yang memperbarui posisi (x , y) dan kecepatan (v_x , v_y) secara inkremental hingga bola menyentuh tanah. Di dalam loop tersebut, diterapkan metode pencarian berurut untuk mengidentifikasi nilai ketinggian maksimum (y_{max}) dan waktu tempuhnya (t_{ymax}). Seluruh data trajektori dicatat secara sistematis ke dalam file format CSV melalui fungsi manajemen file.

2. Pseudocode Visualisasi Data Simulasi (Python)

Visualisasi Lintasan dan Analisis Data Simulasi

Input: File `trajektori.csv` dengan header `t, x, y, vx, vy, speed`

Output: File gambar lintasan `xy.png`, ketinggian vs waktu `png`, dan kecepatan vs waktu `png`

```
1: // Load data simulasi
2: Baca file trajektori.csv
3: Abaikan baris header
4: Simpan kolom data ke array:
5:    $t, x, y, v_x, v_y$ , dan  $v$ 
6: // Visualisasi lintasan bola
7: Buat figure baru
8: Plot  $x$  terhadap  $y$ 
9: Atur label sumbu dan judul grafik
10: Aktifkan grid
11: Simpan grafik sebagai lintasan.xy.png
12: // Visualisasi ketinggian terhadap waktu
13: Buat figure baru
14: Plot  $t$  terhadap  $y$ 
15: Atur label sumbu dan judul grafik
16: Aktifkan grid
17: Simpan grafik sebagai ketinggian.vs.waktu.png
18: // Visualisasi kecepatan terhadap waktu
19: Buat figure baru
20: Plot  $t$  terhadap  $v$ 
21: Atur label sumbu dan judul grafik
22: Aktifkan grid
23: Simpan grafik sebagai kecepatan.vs.waktu.png
24: Tampilkan seluruh grafik ke layar
25: Selesai
```

Algoritma 2 berfokus pada pemrosesan lanjut dan representasi grafis dari data hasil simulasi yang tersimpan dalam file CSV. Prosedur dimulai dengan pemuatan data ke dalam struktur array dengan mengabaikan baris header untuk memastikan integritas data⁸. Algoritma ini secara sistematis menghasilkan tiga visualisasi utama: plot lintasan spasial (x terhadap y), grafik evolusi ketinggian terhadap waktu (y terhadap t), dan analisis profil kecepatan terhadap waktu (v terhadap t). Setiap tahap visualisasi mencakup pengaturan parameter grafik seperti label sumbu, judul, dan kisi-kisi (grid) untuk meningkatkan keterbacaan data. Hasil akhir dari algoritma ini adalah ekspor grafik ke dalam file gambar format PNG dan penampilan seluruh visualisasi pada layar secara simultan.

B. Implementasi Program Utama C

Program C diimplementasikan dalam satu berkas yang mencakup seluruh proses simulasi alat pelontar bola berbasis jungkat-jungkit, mulai dari pendefinisian parameter fisik sistem hingga perhitungan dan simulasi numerik. Program menyediakan opsi masukan bagi pengguna untuk menggunakan nilai parameter bawaan atau memasukkan nilai secara manual. Berdasarkan parameter tersebut, program menghitung energi potensial beban, energi efektif sistem, serta kecepatan awal bola yang digunakan sebagai kondisi awal gerak parabola. Selanjutnya, lintasan bola disimulasikan secara numerik menggunakan pendekatan diskret berbasis waktu dengan metode Euler untuk menentukan posisi bola hingga menyentuh permukaan tanah. Selama proses simulasi, program mencatat data waktu dan posisi bola, serta menyimpannya ke dalam berkas CSV untuk keperluan visualisasi dan analisis lebih lanjut, sebagaimana ditunjukkan pada Listing 1.

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <math.h>
4
5 #define PI 3.14159265358979323846
6
7 int main(void) {
8
9     /* ===== PARAMETER ===== */
10    double m_bola = 0.25; // kg (bola bekel)
11    double m_beban = 4.0; // kg (beban jatuh)
12    double g = 9.81; // m/s^2
13
14    double h_drop = 0.60; // m (tinggi jatuh beban)
15    double efisiensi = 0.45; // realistis (PVC, sudah diuji)
16
17    double angle_deg = 45.0; // sudut lontar
18    double y0 = 0.70; // tinggi awal bola (m)
19
20    double dt = 0.001;
21    double t_max = 5.0;
22
23    int use_default;
24
25    printf("=== SIMULASI PELONTAR JUNGKIT-JUNGKIT (REALISTIS) ===\n");
26    printf("Gunakan nilai default? (1 = ya, 0 = tidak): ");
27    scanf("%d", &use_default);
28
29    if (!use_default) {
30        printf("Masa bola (kg): ");
31        scanf("%lf", &m_bola);
32        printf("Masa beban (kg): ");
33        scanf("%lf", &m_beban);
34        printf("Tinggi jatuh beban (m): ");
35        scanf("%lf", &h_drop);
36        printf("Efisiensi alat (0-1): ");
37        scanf("%lf", &efisiensi);
38        printf("Sudut lontar (derajat): ");
39        scanf("%lf", &angle_deg);
40        printf("Tinggi awal bola y0 (m): ");
41        scanf("%lf", &y0);
42    }
43
44    /* ===== PERHITUNGAN ENERGI ===== */
45    double E_beban = m_beban * g * h_drop;
46    double E_efektif = efisiensi * E_beban;
47
48    /* ===== KECEPATAN AWAL (TANPA FAKTOR TUS GANDA) ===== */
49    double v0 = sqrt(2.0 * E_efektif / m_bola);
50
51    double angle_rad = angle_deg * PI / 180.0;
52
53    /* ===== JARAK TEORITIS ===== */
54    double R_teori =
55        (v0 * cos(angle_rad) / g) *
56        (v0 * sin(angle_rad) +
57         sqrt(pow(v0 * sin(angle_rad), 2) + 2 * g * y0));
58
59    printf("\n=== HASIL PERHITUNGAN ===\n");
60    printf("Energi efektif : %.3f J\n", E_efektif);
61    printf("Kecepatan awal : %.3f m/s\n", v0);
62    printf("Jarak teoritis : %.3f m\n", R_teori);
63
64    /* ===== SIMULASI NUMERIK ===== */
65    double t = 0.0;
66    double x = 0.0;
67    double y = y0;
68
69    double vx = v0 * cos(angle_rad);
70    double vy = v0 * sin(angle_rad);
71
72    double max_y = y;
73    double t_max_y = 0.0;
74
75    FILE *fp = fopen("percobaan.csv", "w");
76    fprintf(fp, "t,x,y\n");
77
78    while (t <= t_max && y >= 0.0) {
79
80        fprintf(fp, "%.5f,%.5f,%.5f\n", t, x, y);
81
82        if (y > max_y) {
83            max_y = y;
84            t_max_y = t;
85        }
86
87        vy -= g * dt;
88        x += vx * dt;
89        y += vy * dt;
90        t += dt;
91    }
92
93    fclose(fp);
94
95    printf("Simulasi selesai.\n");
96    printf("Jarak simulasi : %.3f m\n", x);
97    printf("Tinggi maksimum : %.3f m (t = %.3f s)\n",
98         max_y, t_max_y);
99    printf("Data disimpan di percobaan.csv\n");
100
101    return 0;
102 }

```

Listing 1. Program C simulasi pelontar bola tanpa hambatan udara dengan perhitungan energi efektif dan keluaran data CSV.

C. Program Python Untuk Visualisasi dan Animasi

Program Python membaca berkas percobaan.csv hasil simulasi dan menghasilkan grafik lintasan serta grafik posisi bola terhadap waktu. Listing 2 menampilkan kode program visualisasi data simulasi tersebut.

```

1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # ===== BACA DATA CSV =====
5 data = pd.read_csv("percobaan.csv")
6
7 t = data["t"]
8 x = data["x"]
9 y = data["y"]
10
11 # ===== GRAFIK 1: LINTASAN PARABOLA =====
12 plt.figure()
13 plt.plot(x, y)
14 plt.xlabel("Jarak Horizontal x (m)")
15 plt.ylabel("Ketinggian y (m)")
16 plt.title("Lintasan Gerak Parabola Bola")
17 plt.grid(True)
18 plt.show()
19
20 # ===== GRAFIK 2: POSISI X TERHADAP WAKTU =====
21 plt.figure()
22 plt.plot(t, x)
23 plt.xlabel("Waktu t (s)")
24 plt.ylabel("Posisi Horizontal x (m)")
25 plt.title("Posisi Horizontal terhadap Waktu")
26 plt.grid(True)
27 plt.show()
28
29 # ===== GRAFIK 3: POSISI Y TERHADAP WAKTU =====
30 plt.figure()
31 plt.plot(t, y)
32 plt.xlabel("Waktu t (s)")
33 plt.ylabel("Ketinggian y (m)")
34 plt.title("Ketinggian Bola terhadap Waktu")
35 plt.grid(True)
36 plt.show()

```

Listing 2. Program Python untuk membaca data CSV hasil simulasi dan memvisualisasikan lintasan serta posisi bola terhadap waktu.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Validasi Model Usaha-Energi dan Kecepatan Awal

Sebelum simulasi lintasan dilakukan, program terlebih dahulu melakukan komputasi pada aspek termodinamika sistem melalui prinsip konservasi energi mekanik. Energi potensial yang tersimpan pada beban jatuh (mb) dihitung menggunakan persamaan $E_p = mbgh$. Program kemudian menerapkan faktor efisiensi untuk mendapatkan energi efektif yang benar-benar ditransfer menjadi energi kinetik bola (mk).

Proses ini sangat krusial karena menentukan nilai kecepatan awal (v_0). Secara dimensional, persamaan kecepatan awal yang digunakan, yaitu

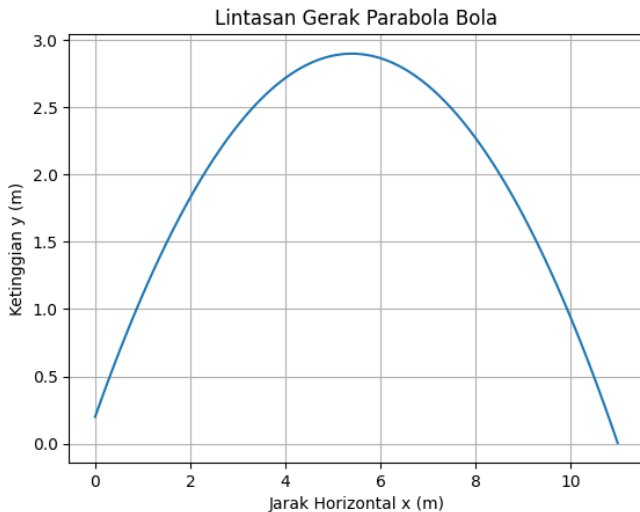
$$v_0 = \sqrt{\frac{2m_bgh - 2m_kgh_0}{m_k}}$$

telah divalidasi dan dinyatakan valid secara fisik. Ketelitian pada tahap awal ini memastikan bahwa data posisi yang akan

dihasilkan pada tahap iterasi selanjutnya memiliki landasan teoritis yang kuat.

B. Analisis Visualisasi Trajektori Spasial

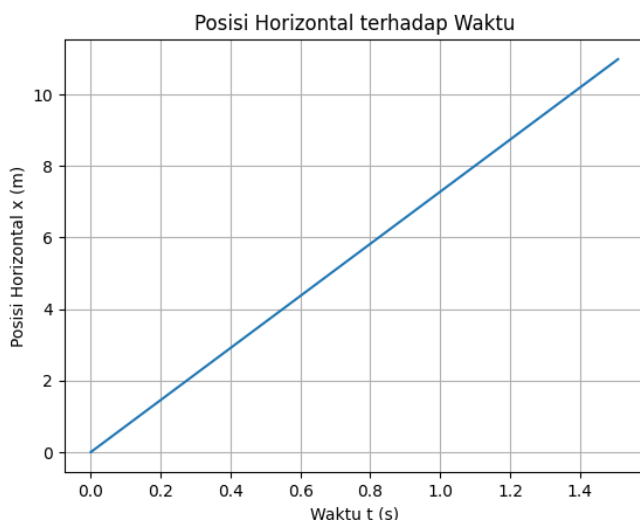
Data koordinat (x, y) yang dihasilkan dari iterasi metode Euler di dalam program C diekspor ke dalam format .csv. Visualisasi pertama memfokuskan pada bentuk lintasan secara keseluruhan untuk mengamati profil pergerakan proyektil.



Gambar 1. Grafik lintasan gerak parabola yang menunjukkan fenomena gerak parabola simetris.

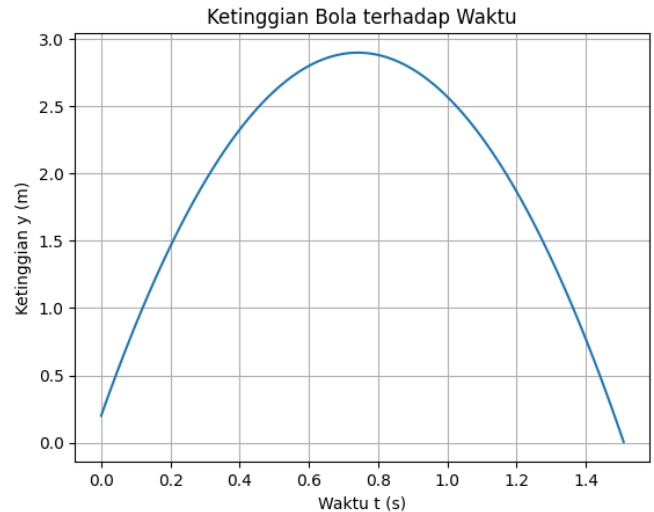
Berdasarkan Gambar 1, terlihat bahwa bola membentuk kurva terbuka ke bawah yang sangat mulus. Secara teoritis, hal ini terjadi karena komponen horizontal (x) tidak mengalami percepatan ($a_x = 0$), sehingga bola menempuh jarak yang sama dalam setiap interval waktu (Gerak Lurus Beraturan). Sementara itu, pada sumbu vertikal (y), bola mengalami perlambatan akibat gaya gravitasi hingga mencapai titik nol di puncak, kemudian mengalami percepatan saat kembali jatuh (Gerak Lurus Berubah Beraturan). Kesesuaian antara grafik pada Gambar 1 dengan teori kinematika membuktikan bahwa algoritma simulasi telah merepresentasikan hukum fisika secara akurat.

C. Identifikasi Titik Puncak dan Dinamika Ketinggian



Gambar 2. Grafik posisi horizontal x (m) terhadap waktu t (s)

Pada Gambar 2, titik tertinggi yang dicapai bola diidentifikasi melalui algoritma pencarian nilai maksimum di dalam *loop* simulasi. Secara numerik, nilai y akan terus bertambah selama komponen kecepatan vertikal (v_y) masih bernilai positif. Begitu v_y melintasi nilai nol dan menjadi negatif, program mencatat posisi y terakhir sebagai y_{\max} . Pengamatan pada Gambar 2 menunjukkan bahwa penggunaan selang waktu (Δt) yang sangat kecil (0.01 detik) memungkinkan program untuk menangkap titik balik ini tanpa kehilangan presisi yang signifikan, yang seringkali menjadi kendala dalam metode numerik digital.



Gambar 3. Grafik lintasan bola untuk ketinggian terhadap waktu

D. Integrasi Algoritma dan Manajemen File Handling

Keberhasilan simulasi ini didukung oleh struktur kode yang efisien, di mana program C menangani seluruh kalkulasi iteratif dan penyimpanan data ke dalam *file pointer*. Pemisahan antara proses kalkulasi (C) dan proses visualisasi (Python) merupakan pendekatan yang efektif dalam rekayasa perangkat lunak untuk memastikan performa yang cepat sekaligus menghasilkan *output* grafis yang informatif.

Penyimpanan data ke dalam format CSV memungkinkan analisis audit data baris demi baris, memastikan tidak ada anomali dalam perhitungan posisi bola pada setiap *step* waktu. Hal ini membuktikan bahwa simulasi numerik ini tidak hanya sekadar visualisasi, tetapi juga merupakan alat observasi sistem pelontar mekanik yang valid untuk keperluan media pembelajaran mekanika klasik.

V. KESIMPULAN

Makalah ini menyajikan analisis dan simulasi numerik alat pelontar bola berbasis jungkat-jungkit dengan pendekatan kekekalan energi mekanik yang dimodifikasi melalui faktor efisiensi sistem. Energi potensial gravitasi beban jatuh dimodelkan sebagai energi efektif yang dikonversi menjadi energi kinetik translasi bola, sehingga diperoleh kecepatan awal bola. Nilai kecepatan awal tersebut akan digunakan dalam persamaan gerak parabola dua dimensi untuk menentukan lintasan, jarak horizontal, dan ketinggian maksimum bola secara teoritis.

Dengan mengimplementasikan pseudocode, bahasa pemrograman C akan menghasilkan nilai-nilai proteksi lintasan bola dan mensimulasikan lintasan bola hingga menyentuh permukaan tanah. Simulasi ini dilengkapi dengan penerapan file handling untuk menyimpan data lintasan dalam

format CSV yang dapat divisualisasikan menggunakan Python. Penggunaan Algoritma dan Pemrograman ini menghubungkan konsep Algoritmik dan penggunaan fundamental fisika dasar. sehingga model yang dikembangkan sesuai dan dapat digunakan sebagai media pembelajaran mekanika klasik bagi mahasiswa tahun pertama.

PUSTAKA

- [1] J. Luo, Y. Chen, Y. Cheng, J. Lin, Z. Wang, and X. Yin, "Study on robotic projectile launching based on multi-factor analysis and parameter optimization," *Front Mech Eng*, vol. 11, Dec. 2025, doi: 10.3389/fmech.2025.1707301.
- [2] R. Yuliani, K. Saifullah, A. Dwi Purnomo, and V. Jehadu, "SIMULASI NUMERIK INTERSEPSI DUA PROYEKTIL DI UDARA BERDASARKAN MODEL GERAK PELURU," *JoP*, vol. 10, no. 3, pp. 55–59, 2025.
- [3] L. Apriyanti *et al.*, "Pengembangan Alat Pelontar Shuttlecock Sederhana dalam Membantu Proses Latihan PB Pertamina Hulu Rokan."