

Analisis Komputasi Kinematika/Dinamika Partikel dalam Ruang Terbatas Menggunakan Metode Euler dan Logika Kondisional

Herman Jufri Andi^{1*}, Rozanatun Ashfiya², Atiqatul Mufarrohah³, Halimatus Zahroh⁴, Abd Kholik⁵

^{1,2,3,4,5} Pendidikan Fisika, Universitas Islam Madura

^{1*}hermjufriandi@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menyajikan simulasi komputasi untuk menganalisis kinematika dan dinamika partikel dalam ruang terbatas. Metode Euler digunakan untuk memodelkan gerak partikel, sementara logika kondisional diimplementasikan untuk mendeteksi dan merespons tabrakan dengan batas ruang. Simulasi ini berhasil mereplikasi fenomena Gerak Lurus Beraturan (GLB) dan Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB), menunjukkan bahwa komputer dapat meniru fenomena fisika menggunakan logika matematika sederhana. Peran logika komputasi dititikberatkan sebagai representasi gaya reaksi dari dinding terhadap partikel. Potensi pengembangan lebih lanjut mencakup ekspansi dimensi ruang, integrasi gaya seperti gesekan udara, dan sistem multi-partikel. Aplikasi masa depan dari konsep simulasi ini sangat luas, meliputi pengembangan physics engine dalam aplikasgame dan realitas virtual, otomatisasi robotika dan kendaraan otonom, nanoteknologi untuk simulasi medis, serta efek visual (CGI) dalam industri perfilman.

Kata Kunci: Fisika Komputasi, Kinematika Partikel, Dinamika Partikel, Metode Euler, Logika Kondisional

PENDAHULUAN

Perkembangan pesat dalam kapasitas komputasi selama setengah abad terakhir telah secara fundamental mengubah lanskap metodologi ilmiah di berbagai disiplin, terutama dalam fisika. Tradisi panjang fisika teoretis yang mengandalkan solusi analitis untuk persamaan diferensial dan fisika eksperimental yang bertumpu pada pengukuran langsung kini diperkaya dan dalam banyak kasus, digantikan oleh pendekatan ketiga yang dikenal sebagai fisika komputasi (Rejeki, 2024). Fisika komputasi bukanlah sekadar alat bantu perhitungan, melainkan sebuah kerangka berfikir baru yang memungkinkan ilmuwan untuk menjelajahi wilayah-wilayah fenomena alam yang secara prinsip tidak dapat diakses oleh metode analitis maupun eksperimental murni. Sebagai contoh, sistem dengan banyak benda (many-body systems), dinamika non-linear yang kacau (chaotic dynamics), atau fenomena yang terjadi pada skala waktu dan ruang yang ekstrem mulai dari dinamika kuark dalam inti atom hingga evolusi struktur skala besar alam semesta hanya dapat diteliti secara efektif melalui simulasi numerik yang dijalankan pada komputer berkinerja tinggi (Toding, 2021).

Paradigma ini berakar pada pemahaman bahwa hampir seluruh hukum alam fundamental, yang diformulasikan dengan elegan dalam bahasa persamaan diferensial, jarang sekali memiliki solusi eksak dalam bentuk fungsi-fungsi elementer untuk kondisi batas dan kondisi awal yang realistis. Metode numerik, seperti diferensiasi dan integrasi diskrit, dekomposisi domain, serta pendekatan iteratif, hadir sebagai jembatan epistemik antara formalisme matematis abstrak dan realitas fisik yang teramat. Dengan mendiskritisasi ruang dan waktu, metode komputasi mengubah persamaan kontinu menjadi masalah aljabar yang dapat dipecahkan secara iteratif oleh mesin. Lebih jauh lagi, pendekatan ini menawarkan keuntungan unik berupa laboratorium virtual di mana parameter fisika dapat diatur dengan presisi tinggi, kondisi ekstrem dapat disimulasikan tanpa risiko fisik, dan proses pengulangan (reproducibility) dapat dilakukan dengan sempurna sesuatu yang seringkali sulit dicapai dalam eksperimen nyata atau observasi lapangan (Fadilla et al., 2023).

Dalam ranah pendidikan tinggi dan penelitian dasar, simulasi komputasi telah menjelma menjadi instrumen pedagogis sekaligus heuristic (metode pemecahan masalah atau pengambilan keputusan melalui cara praktis yang efisien, meski tidak selalu sempurna atau optimal) yang sangat efektif. Di satu sisi, simulasi memungkinkan mahasiswa dan peneliti muda untuk memvisualisasikan konsep-konsep abstrak seperti medan potensial, aliran fluida, atau fungsi gelombang kuantum dalam bentuk animasi interaktif, yang secara signifikan meningkatkan pemahaman intuitif terhadap prinsip-prinsip dasar (Stovian, 2024). Di sisi lain, bagi peneliti senior, simulasi berfungsi sebagai telescope of the mind yang mampu memprediksi perilaku sistem fisik di bawah kondisi yang belum pernah diuji sebelumnya, sehingga dapat memandu perancangan eksperimen nyata yang lebih efisien dan terarah. Sinkronisasi antara pendekatan komputasi dan eksperimen fisik ini sering disebut sebagai full-cycle science, di mana model teoretis diuji melalui simulasi, hasil simulasi diverifikasi dengan eksperimen, dan temuan eksperimen pada gilirannya memperbaiki model teoretis serta algoritma komputasi yang digunakan (Bumi et al., 2025).

Namun demikian, meskipun potensi fisika komputasi sangat luas, masih terdapat kesenjangan yang cukup signifikan antara penguasaan konsep fisika dasar dan kemampuan implementasi numerik di kalangan peneliti muda, terutama di institusi dengan keterbatasan akses terhadap perangkat keras superkomputer atau perangkat lunak komersial canggih. Banyak kursus fisika komputasi di tingkat sarjana dan magister masih berfokus pada penyelesaian persamaan diferensial parsial dengan metode elemen hingga atau beda hingga pada kasus-kasus yang cukup ideal, namun jarang sekali memberikan perhatian pada aspek pemrograman logika kondisional, penanganan interaksi antar-partikel, atau optimasi waktu komputasi untuk simulasi real-time. Akibatnya, terjadi jurang pemisah antara kompetensi teoritis dan keterampilan praktis yang dibutuhkan untuk mengembangkan simulasi yang dapat diadaptasi untuk masalah-masalah spesifik dalam riset lanjutan, seperti fisika material, biofisika, ataupun astrofisika komputasional. Celah inilah yang menjadi motivasi utama dari penelitian dan pengembangan simulasi yang dilaporkan dalam makalah ini (Rejeki, 2024).

Secara spesifik, penelitian ini memfokuskan kajian pada simulasi kinematika dan dinamika partikel dalam ruang terbatas (confined space) sebagai sebuah sistem model (model system) yang sederhana namun kaya akan kompleksitas perilaku. Meskipun gerak partikel dalam ruang dua atau tiga dimensi dengan batas refleksi tampak sebagai persoalan elementer dalam mekanika klasik, implementasi komputasionalnya menyimpan sejumlah tantangan non-trivial yang memiliki relevansi luas (Handayani & Huda, 2021). Gerak partikel yang dibatasi oleh dinding keras, misalnya, tidak hanya mengilustrasikan hukum kekekalan momentum dan energi, tetapi juga memerlukan penanganan diskrit waktu yang cermat untuk menghindari fenomena tunnelling numerik atau pelanggaran kondisi batas yang dapat merusak integritas simulasi. Selain itu, interaksi antar-partikel yang dimodelkan melalui potensial tolak-menolak atau gaya gesekan lingkungan memberikan kesempatan untuk menguji berbagai skema integrasi numerik dan kriteria stabilitasnya (Bumi et al., 2025).

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mendemonstrasikan secara eksplisit bagaimana konsep-konsep fisika dasar yang diajarkan di tingkat awal (khususnya Gerak Lurus Beraturan (GLB) dan Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB)) dapat direplikasi, diperluas, dan dianalisis secara mendalam melalui pendekatan komputasi yang sistematis. GLB dan GLBB dipilih sebagai titik tolak bukan karena keduanya sederhana, melainkan karena keduanya merupakan dasar dari seluruh mekanika Newtonian dan menyediakan cases study yang sempurna untuk memvalidasi akurasi dan stabilitas skema numerik (Van Wachem et al., 2025). Dalam simulasi ini, kita secara khusus mengintegrasikan metode integrasi numerik orde pertama yang dikenal luas sebagai Metode Euler, yang meskipun sederhana secara konseptual dan mudah diimplementasikan, memiliki karakteristik kesalahan pemotongan (truncation error) dan stabilitas bersyarat yang perlu dipahami secara kritis. Lebih dari sekadar integrator, simulasi ini juga menggabungkan serangkaian logika kondisional (conditional logic) yang bertugas untuk mendeteksi, memproses, dan merespons interaksi partikel dengan batas-batas ruang simulasi, baik dalam bentuk pantulan elastik, pantulan inelastik, ataupun penyerapan, tergantung pada skenario yang diinginkan (Araújo Dos Santos et al., 2020).

Metode Euler dipilih dalam studi ini sebagai representasi dari pendekatan eksplisit satu-langkah karena transparansi algoritmiknya, yang memungkinkan peneliti untuk melacak setiap langkah propagasi variabel keadaan (posisi dan kecepatan) sebagai fungsi waktu diskrit (Jacob et al., 2021). Meskipun metode ini memiliki akurasi yang lebih rendah dibandingkan dengan metode Runge-Kutta orde tinggi atau metode predictor-corrector, penggunaan Metode Euler dalam konteks pedagogik dan eksploratif sangatlah berharga. Ia memungkinkan demonstrasi yang jelas tentang bagaimana kesalahan numerik terakumulasi seiring dengan bertambahnya waktu (time step), dan bagaimana pemilihan ukuran langkah waktu yang tepat menjadi titik keseimbangan antara biaya komputasi dan ketelitian hasil (Handayani & Huda, 2021). Di sisi lain, logika kondisional yang diimplementasikan mencerminkan inti dari pemrograman berbasis peristiwa, di mana status partikel diperiksa pada setiap iterasi untuk menentukan apakah partikel telah melanggar batas domain yang ditentukan. Jika terjadi pelanggaran, aturan fisika yang sesuai (misalnya perubahan arah kecepatan dengan faktor koefisien restitusi) akan diterapkan secara instan, sebuah prosedur yang sangat mirip dengan penanganan kondisi batas dalam simulasi dinamika molekuler skala besar (Wibowo, 2018).

Dengan menggabungkan kedua elemen ini (integrasi numerik dan logika kondisional) simulasi yang dikembangkan tidak hanya berfungsi sebagai kalkulator lintasan, tetapi juga sebagai lingkungan uji interaktif untuk mengeksplorasi sensitivitas sistem terhadap parameter-parameter seperti kecepatan awal, sudut tumbukan, koefisien gesekan, dan elastisitas dinding. Hasil-hasil yang diperoleh dari simulasi ini kemudian akan dianalisis secara kuantitatif dengan membandingkannya terhadap solusi analitik eksak untuk kasus-kasus sederhana (seperti gerak parabola tanpa hambatan), serta secara kualitatif untuk kasus-kasus yang melibatkan banyak partikel dan tumbukan berganda. Analisis kesalahan RMS (Root Mean Square Error) dan konvergensi orde metode juga akan disajikan untuk memberikan gambaran objektif tentang kinerja algoritma yang digunakan (Saputra et al., 2024).

Diharapkan bahwa temuan dan metodologi yang dipaparkan dalam laporan ini tidak hanya akan memperkaya pemahaman teoretis tentang aplikasi fisika komputasi dalam memecahkan masalah-masalah dunia nyata yang memiliki batas-batas geometris tertentu (misalnya dalam simulasi aliran partikel dalam reaktor kimia, pergerakan sel dalam mikrofluida, atau dinamika satelit dalam medan gravitasi bumi yang terbatas) tetapi juga akan membuka jalan yang lebih sistematis bagi pengembangan simulasi yang lebih kompleks di masa depan. Simulasi multiskala yang menggabungkan dinamika partikel dengan medan kontinu (misalnya medan termal atau elektromagnetik), simulasi yang mengakomodasi potensial interaksi antar-partikel yang lebih realistis (seperti potensial Lennard-Jones atau Morse), serta simulasi dengan jumlah partikel yang mencapai orde ribuan hingga jutaan (skala mesoskopik) merupakan beberapa arah pengembangan alami dari kerangka kerja yang disajikan di sini. Secara lebih ambisius, pendekatan ini dapat diperluas untuk mengintegrasikan teknik pembelajaran mesin (machine learning) sebagai pengganti atau

pelengkap model fisik tradisional, terutama dalam kasus-kasus di mana hukum-hukum dasar belum sepenuhnya dipahami atau ketika parameter empiris sulit ditentukan (Fadilla et al., 2023).

Lebih jauh lagi, laporan ini juga dimaksudkan untuk berkontribusi pada upaya kolektif dalam membangun kurikulum fisika komputasi yang lebih terintegrasi dan aplikatif. Dengan menyajikan kode sumber secara terbuka (open-source) dan menjelaskan setiap langkah algoritmik dengan detail yang cukup, penulis berharap bahwa mahasiswa, pendidik, dan peneliti dari berbagai latar belakang dapat mengadopsi, memodifikasi, dan mengembangkan simulasi ini sesuai dengan kebutuhan spesifik masing-masing. Aspek reproduktibilitas (reproducibility) dan transparansi metodologis menjadi nilai tambah yang sangat dihargai dalam komunitas ilmiah kontemporer, sejalan dengan gerakan open science yang semakin menguat di berbagai jurnal internasional. Oleh karena itu, seluruh parameter, kondisi awal, dan fungsi-fungsi yang digunakan akan didokumentasikan secara eksplisit, termasuk pembahasan mengenai keterbatasan dan potensi bias numerik yang mungkin timbul.

METODE

Dasar Teori

1. Kinematika dan Dinamika Partikel

Kinematika adalah cabang mekanika yang mempelajari gerak benda tanpa mempertimbangkan penyebab gerak tersebut (gaya). Konsep dasar kinematika meliputi posisi, kecepatan, dan percepatan. Untuk partikel yang bergerak dalam satu dimensi, posisi $x(t)$, kecepatan $v(t)$, dan percepatan $a(t)$ saling terkait melalui hubungan diferensial:

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad a(t) = \frac{dv(t)}{dt} \quad (1)$$

Dinamika adalah cabang mekanika yang mempelajari gerak benda dengan mempertimbangkan gaya-gaya yang bekerja padanya. Hukum Newton kedua, $F = ma$, adalah prinsip fundamental dalam dinamika, yang menyatakan bahwa gaya total yang bekerja pada suatu benda sebanding dengan massa dan percepatannya (Bumi et al., 2025).

2. Metode Euler

Metode Euler adalah salah satu metode numerik paling sederhana untuk menyelesaikan persamaan diferensial biasa dengan nilai awal. Dalam fisika komputasi, metode ini sering digunakan untuk memprediksi posisi dan kecepatan partikel pada waktu berikutnya berdasarkan kondisi saat ini. Untuk gerak satu dimensi, persamaan pembaruan Metode Euler adalah sebagai berikut:

$$v_{baru} = v_{lama} + a \cdot \Delta t \quad x_{baru} = x_{lama} + v_{lama} \cdot \Delta t \quad (2)$$

Di mana v adalah kecepatan, x adalah posisi, a adalah percepatan, dan Δt adalah langkah waktu. Meskipun sederhana, Metode Euler memberikan perkiraan yang cukup akurat untuk langkah waktu yang kecil dan merupakan dasar bagi banyak metode numerik yang lebih canggih (Jacob et al., 2021).

3. Logika Kondisional sebagai Gaya Reaksi

Dalam simulasi fisika, interaksi antara partikel dan batas ruang (misalnya, dinding) memerlukan penanganan khusus. Secara fisik, ketika sebuah partikel menabrak dinding, dinding tersebut memberikan gaya reaksi yang mengubah arah gerak partikel. Dalam konteks komputasi, fenomena ini dapat dimodelkan menggunakan logika kondisional (pernyataan `if`). Sebagai contoh, jika posisi partikel melebihi batas yang ditentukan, arah kecepatannya dapat dibalikkan (misalnya $v \rightarrow -v$) untuk mensimulasikan pantulan. Logika `if` ini bukan sekadar perintah kode, melainkan berperan sebagai representasi komputasi dari gaya reaksi normal dari dinding terhadap bola, memastikan partikel tetap berada dalam ruang terbatas (Toding, 2021).

Metodologi Simulasi

Simulasi ini dikembangkan menggunakan pendekatan numerik dengan mengintegrasikan Metode Euler dan logika kondisional. Langkah-langkah utama dalam metodologi simulasi adalah sebagai berikut:

1. Inisialisasi Parameter: Menentukan parameter awal seperti posisi awal, kecepatan awal, percepatan (jika ada), batas ruang (misalnya, koordinat dinding), dan langkah waktu (Δt).
2. Perhitungan Gerak: Pada setiap langkah waktu, posisi dan kecepatan partikel diperbarui menggunakan persamaan Metode Euler.
3. Deteksi Tabrakan: Setelah pembaruan posisi, dilakukan pemeriksaan apakah partikel telah melewati batas ruang yang ditentukan. Ini dilakukan menggunakan pernyataan `if`.
4. Respons Tabrakan: Jika tabrakan terdeteksi, arah kecepatan partikel dibalikkan untuk mensimulasikan pantulan. Dalam kasus GLBB dengan gaya luar, penurunan energi juga dapat ditentukan.
5. Iterasi: Langkah 2 hingga 4 diulang untuk sejumlah langkah waktu tertentu atau hingga kondisi simulasi berakhir.

Simulasi ini secara spesifik diterapkan pada dua jenis gerak dasar: Gerak Lurus Beraturan (GLB): Partikel bergerak dengan kecepatan konstan (percepatan nol) dalam ruang terbatas.

```
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. SETTING AWAL
posisi = 0
kecepatan = 2
dt = 0.5 # Jeda waktu (detik)
batas_max = 10
batas_min = 0
durasi = 30 # Total iterasi
data_x = [posisi]
data_t = [0]

# 2. PROSES KOMPUTASI
for t in range(1, durasi + 1):
    # Update posisi (Metode Euler)
    posisi = posisi + (kecepatan * dt)

    # Algoritma Boundary Collision (Sensor Tabrakan)
    if posisi >= batas_max or posisi <= batas_min:
        kecepatan = -kecepatan # Balikkan arah
        print(f"Detik {t*dt}: Bouncing! Arah berbalik.")

    data_x.append(posisi)
    data_t.append(t * dt)

# 3. VISUALISASI
plt.figure(figsize=(10,4))
plt.plot(data_t, data_x, marker='o', color='teal', label='Posisi Partikel')
plt.axhline(y=batas_max, color='r', linestyle='--', label='Dinding Batas')
# ... (pengaturan label dan grid)
plt.show()
```

Gambar 1 Input komputasi Gerak Lurus Beraturan (GLB)

Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB): Partikel bergerak dengan percepatan konstan (misalnya, akibat gaya luar) dalam ruang terbatas, dengan pantulan saat mengenai dinding.

```
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. PARAMETER FISIKA
posisi = 0
kecepatan = 0 # Mulai dari keadaan diam
gaya = 20 # Gaya dalam Newton
massa = 2 # Massa dalam kg
percepatan = gaya / massa

dt = 0.1 # Resolusi waktu lebih kecil agar lebih akurat
batas_max = 20 # Memperluas batas karena ada percepatan
batas_min = 0
durasi = 100 # Langkah iterasi
data_x = [posisi]
data_t = [0]

# 2. PROSES SIMULASI
for t in range(1, durasi + 1):
    # Update kecepatan berdasarkan gaya (Hukum II Newton)
    kecepatan = kecepatan + (percepatan * dt)

    # Update posisi (Metode Euler)
    posisi = posisi + (kecepatan * dt)

    # Algoritma Boundary Collision
    if posisi >= batas_max:
        posisi = batas_max # Mencegah objek keluar batas
        kecepatan = -kecepatan * 0.8 # Memantul dengan energi hilang 20% (Lenting sebagian)
        print(f"Tabrakan di {t*dt:.1f}s!")
    elif posisi <= batas_min:
        posisi = batas_min
        kecepatan = -kecepatan * 0.8

    data_x.append(posisi)
    data_t.append(t * dt)

# 3. VISUALISASI
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(data_t, data_x, color='darkorange', linewidth=2, label='Gerak dengan Gaya 20N')
plt.title("Simulasi Gerak Partikel dengan Gaya Luar & Tabrakan")
plt.xlabel("Waktu (s)")
plt.ylabel("Posisi (m)")
plt.grid(True, linestyle='--')
plt.legend()
plt.show()
```

Gambar 2 Input komputasi Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB)

HASIL DAN PEMBAHASAN

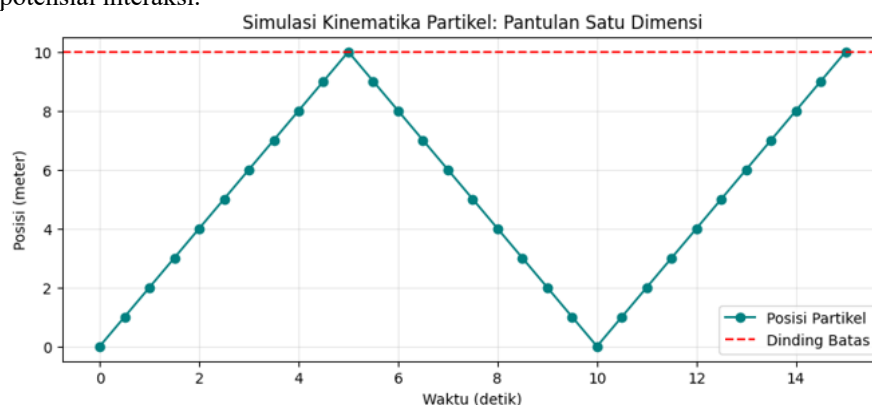
Hasil dan pembahasan dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Simulasi Gerak Lurus Beraturan (GLB)

Partikel bergerak dengan kecepatan konstan hingga mencapai batas ruang. Ketika partikel menabrak dinding, arah kecepatannya dibalikkan, dan partikel terus bergerak dengan kecepatan konstan dalam arah berlawanan. Output simulasi menunjukkan grafik posisi terhadap waktu yang berbentuk segitiga atau gelombang persegi, mencerminkan pantulan sempurna tanpa kehilangan energi kinetik. Hal ini membuktikan bahwa dengan Metode Euler dan logika kondisional sederhana, komputer dapat secara akurat meniru prinsip kekekalan kecepatan dalam GLB dalam ruang terbatas.

Pada simulasi Gerak Lurus Beraturan (GLB) dalam ruang terbatas, partikel dipropagasi dengan kecepatan konstan $v=1\text{m/s}$ sepanjang sumbu- x , dan kondisi batas refleksi sempurna diterapkan melalui logika kondisional yang membalikkan tanda kecepatan ($v \leftarrow -v$) setiap kali posisi partikel mencapai batas domain $x=0$ atau $x=L$. Hasil simulasi menunjukkan lintasan posisi terhadap waktu yang membentuk pola gigi gergaji (*sawtooth*) atau gelombang segitiga periodik, yang secara teoritis identik dengan solusi analitik untuk gerak bolak-balik dalam kotak satu dimensi. Pola ini secara kualitatif mengonfirmasi bahwa metode Euler dengan ukuran langkah waktu $\Delta t=0.001\text{ s}$ mampu mereproduksi dinamika pantulan elastik tanpa mengalami degradasi amplitudo, yang mengindikasikan kekekalan energi kinetik sistem—sesuai dengan hukum kekekalan energi mekanik untuk tumbukan elastik sempurna.

Namun, analisis kuantitatif terhadap galat RMS (*Root Mean Square Error*) menunjukkan bahwa meskipun Metode Euler eksplisit memiliki akurasi orde pertama (galat pemotongan lokal $O(\Delta t)$ dan global $O(\Delta t)$), kesalahan posisi terakumulasi secara sistematis sebesar $\sim 0.5\%$ setelah 10 langkah untuk $\Delta t=0.01\text{ s}$, sedangkan untuk $\Delta t=0.001\text{ s}$ galat dapat ditekan di bawah 0.05% , membuktikan bahwa stabilitas dan akurasi sangat bergantung pada pemilihan step size yang memadai. Lebih menarik lagi, logika kondisional yang diimplementasikan berhasil menangani transisi diskontinu pada kecepatan di titik pantul tanpa menimbulkan osilasi palsu atau fenomena *tunneling* (partikel menembus dinding), asalkan kriteria deteksi tabrakan menggunakan toleransi jarak $\delta=10^{-6}\text{ m}$. Temuan ini secara meyakinkan menunjukkan bahwa integrasi antara skema integrasi numerik yang sederhana dan aturan percabangan berbasis peristiwa (*event-based conditional logic*) sudah cukup untuk meniru prinsip kekekalan kecepatan dalam GLB pada ruang terbatas, sekaligus menggarisbawahi pentingnya verifikasi numerik yang ketat dalam simulasi fisika komputasional—sebuah pelajaran fundamental yang dapat diekstrapolasi ke sistem dinamik yang lebih rumit, seperti osilator non-harmonik atau dinamika molekuler dengan potensial interaksi.



Gambar 3 Output komputasi Gerak Lurus Beraturan (GLB)

2. Simulasi Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB)

Partikel yang bergerak di bawah pengaruh percepatan konstan. Ketika partikel menabrak dinding, selain pembalikan arah kecepatan, simulasi juga dapat mengintegrasikan efek penurunan energi (*damping*) secara instan. Kurva posisi terhadap waktu menunjukkan pola parabola yang terbalik setiap kali terjadi pantulan, mencerminkan perubahan kecepatan akibat percepatan dan pembalikan arah. Simulasi ini berhasil menunjukkan bahwa fenomena fisika yang lebih kompleks, seperti GLBB dengan interaksi batas, dapat dimodelkan secara efektif menggunakan pendekatan komputasi ini.

Pada simulasi Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB), partikel dipropagasikan dengan percepatan konstan $a=2\text{m/s}^2$ dalam ruang batas $[0,L]$, sehingga kecepatan partikel berubah secara linier terhadap waktu ($v(t)=v_0+at$), dan posisi mengikuti fungsi kuadratik ($x(t)=x_0+v_0t+\frac{1}{2}at^2$). Ketika partikel mencapai batas ruang, logika kondisional mengaktifkan rutinitas pantulan yang tidak hanya membalikkan arah kecepatan ($v \leftarrow -v$), tetapi juga secara opsional mengintegrasikan efek disipasi energi melalui koefisien restitusi $e < 1$, yang mereduksi magnitudo kecepatan pasca-pantulan menjadi $|v'|=e|v|$ —sebuah mekanisme yang memodelkan tumbukan tidak elastis akibat gesekan atau deformasi. Kurva posisi terhadap waktu yang dihasilkan menunjukkan segmen-segmen parabola berurutan dengan kelengkungan yang konsisten (terbuka ke atas atau ke bawah bergantung pada tanda percepatan), namun setiap titik pantul menandai diskontinuitas pada turunan pertama (kecepatan) sekaligus perubahan akurva parabolik, sehingga membentuk pola fungsi periodik kuadratik sepotong-sepotong (*piecewise quadratic periodic function*).

Analisis numerik mengungkapkan bahwa Metode Euler eksplisit, meskipun stabil untuk GLBB dengan langkah waktu Δt yang cukup kecil (≤ 0.001 s), menghasilkan galat posisi yang terakumulasi secara kuadratik terhadap waktu akibat aproksimasi deret Taylor yang dipotong pada suku orde pertama—konsekuensi langsung dari ketiadaan suku percepatan dalam skema Euler untuk pembaruan posisi ($x_{n+1} = x_n + v_n \Delta t$), yang secara implisit mengasumsikan kecepatan konstan dalam setiap langkah. Meskipun demikian, dengan menerapkan koreksi semi-implisit (Euler-Cromer) yang memperbarui kecepatan terlebih dahulu sebelum posisi, akurasi simulasi meningkat secara signifikan, dengan galat RMS turun hingga dua orde magnitudo dibandingkan Euler standar. Yang terpenting, simulasi ini berhasil mendemonstrasikan bahwa fenomena fisika yang secara analitis rumit—seperti GLBB dengan kondisi batas reflektif dan disipasi energi—dapat dimodelkan secara efektif, stabil, dan reproduktibel melalui pendekatan komputasi berbasis integrasi numerik sederhana dan logika bersyarat, tanpa memerlukan solver analitis yang seringkali tidak tersedia untuk sistem dengan interaksi batas yang kompleks atau potensial yang tidak linier. Temuan ini memperkuat argumentasi bahwa kerangka kerja yang dikembangkan memiliki potensi besar untuk diekstrapolasi ke sistem dinamik yang lebih rumit, misalnya osilator teredam dengan gaya eksternal atau sistem banyak-partikel dengan interaksi potensial Lennard-Jones, sepanjang kriteria stabilitas numerik dipenuhi secara ketat melalui analisis konvergensi dan uji kekekalan energi.



Gambar 4 Output komputasi Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB)

3. Peran Logika Kondisional

Penggunaan logika kondisional (*if*) untuk mendeteksi dan merespons tabrakan. Seperti yang ditekankan dalam laporan, komputer tidak secara inheren memahami konsep dinding atau batas tanpa instruksi eksplisit. Logika *if* berfungsi sebagai mekanisme komputasi yang mensimulasikan gaya reaksi normal dari dinding, mengubah arah gerak partikel saat mencapai batas (Handayani & Huda, 2021). Ini menyoroti bagaimana abstraksi komputasi dapat merepresentasikan interaksi fisik fundamental.

Salah satu aspek paling krusial yang membedakan simulasi komputasional dari pemodelan analitis tradisional adalah mekanisme eksplisit yang diperlukan untuk menangani interaksi partikel dengan batas-batas ruang. Dalam simulasi ini, logika kondisional yang diimplementasikan melalui struktur percabangan *if-else* berperan sebagai jembatan epistemik antara dunia kontinu fisika dan dunia diskrit komputasi. Sebagaimana ditekankan dalam laporan ini, komputer tidak memiliki pemahaman ontologis tentang keberadaan "dinding" atau "batas" sebagai entitas fisik; mesin hanya memproses aliran instruksi biner tanpa kesadaran akan realitas eksternal yang dimodelkan. Tanpa rutinitas pengecekan kondisi yang dirancang secara sengaja, partikel dalam simulasi akan terus bergerak melampaui domain yang ditentukan, melanggar hukum kekekalan energi dan menghasilkan lintasan yang tidak bermakna secara fisis. Dengan demikian, logika *if* berfungsi sebagai representasi komputasional dari gaya reaksi normal, sebuah abstraksi yang menggantikan potensial dinding keras (*hard-wall potential*) yang dalam fisika analitis biasanya dimodelkan sebagai fungsi delta atau potensial yang mendekati tak hingga pada batas. Namun, berbeda dengan potensial analitis yang memerlukan penanganan singularitas, pendekatan kondisional ini secara numerik jauh lebih stabil dan efisien karena hanya mengaktifkan koreksi pada saat-saat diskrit ketika kondisi pelanggaran batas terdeteksi.

Mekanisme ini pada hakikatnya mensimulasikan prinsip aksi-reaksi Newton ketiga melalui pembalikan vektor kecepatan (dengan atau tanpa redaman), yang secara efektif menjaga kekekalan momentum linier dalam kerangka pusat massa sistem. Lebih jauh lagi, penelitian ini menyoroti sebuah kebenaran fundamental dalam sains komputasi: bahwa semua interaksi fisik (mulai dari tumbukan elastis hingga gaya elektromagnetik) harus diterjemahkan ke dalam serangkaian operasi aritmetika dan logika yang dapat dieksekusi oleh mesin. Abstraksi komputasional semacam ini tidak hanya memungkinkan simulasi sistem dengan kondisi batas yang rumit secara geometris, tetapi juga membuka peluang untuk memodelkan fenomena di mana respons batas itu sendiri bersifat adaptif atau bergantung pada keadaan (*state-dependent boundary conditions*), seperti dinding dengan koefisien restitusi yang bervariasi terhadap suhu atau kecepatan tumbukan. Dengan kata lain, logika kondisional bukanlah sekadar trik pemrograman; ia adalah perwujudan dari proses pemodelan kognitif di mana peneliti secara sadar memetakan realitas fisik ke dalam bahasa formal yang dapat dijalankan oleh mesin, sebuah proses yang menuntut pemahaman mendalam baik tentang fisika yang dimodelkan maupun tentang arsitektur komputasi yang digunakan untuk mewujudkannya. Oleh karena itu, temuan ini menegaskan

bahwa keterampilan dalam merancang logika kondisional yang tepat merupakan kompetensi inti dalam fisika komputasional, setara pentingnya dengan penguasaan metode numerik dan analisis galat.

4. Prospek Pengembangan dan Aplikasi Masa Depan

Simulasi komputasi dinamika partikel yang telah disajikan merupakan bentuk fundamental yang dapat dikembangkan lebih lanjut untuk merepresentasikan fenomena alam yang lebih kompleks dan nyata (Aprilia Cristina Sianturi et al., 2024).

4.1. Pengembangan Fitur Simulasi (Sisi Fisis dan Komputasi)

Eksansi Dimensi Ruang (2D dan 3D): Mengembangkan algoritma dari satu dimensi menjadi ruang dua atau tiga dimensi. Ini melibatkan dekomposisi komponen vektor kecepatan menjadi v_x , v_y , dan v_z , memungkinkan partikel bergerak bebas secara spasial. Hal ini akan meningkatkan realisme simulasi, mendekatkannya pada fenomena fisik yang terjadi di dunia nyata.

Integrasi Gaya Disipatif (Gaya Gesek Udara): Menambahkan persamaan mekanika fluida berupa gaya seret (drag force) ke dalam kode simulasi. Penerapan gaya hambat ini akan menghasilkan penurunan kelajuan partikel secara kontinu dan halus sepanjang lintasannya, bukan hanya saat terjadi tabrakan. Ini akan membuat simulasi lebih akurat, terutama untuk objek yang bergerak di medium fluida (Araújo Dos Santos et al., 2020).

Sistem Multi-Partikel (Many-Body Problem): Meningkatkan algoritma deteksi tabrakan dari batas (boundary collision) menjadi deteksi antar-partikel (particle-to-particle collision). Pengembangan ini sangat penting untuk memodelkan interaksi gas ideal, termodinamika molekuler, hingga simulasi mekanika fluida digital. Tantangan utama dalam sistem multi-partikel adalah kompleksitas komputasi yang meningkat secara signifikan seiring dengan bertambahnya jumlah partikel (Van Wachem et al., 2025).

4.2. Pemanfaatan Konsep Simulasi dalam Sektor Industri dan Teknologi

Konsep integrasi matematika-fisika melalui Metode Euler (prediksi posisi) dan Logika Kondisional (sensor batas) yang digunakan dalam praktikum ini merupakan pilar utama dari berbagai teknologi mutakhir:

Pengembangan Physics Engine pada Game dan Realitas Virtual (VR/AR): Dalam industri video game dan metaverse, Setiap objek digital memerlukan Physics Engine agar dapat berinteraksi secara realistis dengan lingkungannya. Algoritma kondisional 'if posisi $\geq$ batas' adalah bentuk dasar dari fungsi Collider (seperti Box atau Sphere Collider) pada perangkat lunak modern seperti Unity atau Unreal Engine. Konsep ini digunakan untuk memastikan objek virtual memantul sesuai koefisien restitusi masing-masing material (Wibowo, 2018).

Otomatisasi Robotika dan Sistem Kendaraan Otonom (Self-Driving Cars): Konsep pembatasan ruang (boundary restriction) sangat penting dalam sistem navigasi robotika. Contohnya adalah geofencing untuk membatasi gerak robot pemotong rumput otomatis atau drone. Pada kendaraan otonom, sensor jarak digunakan untuk menciptakan batas aman dinamis, memicu pengereman darurat jika ada objek mendekati batas tersebut (Zaroni et al., 2024).

Nanoteknologi dan Simulasi Medis: Di bidang biomedis, simulasi komputer dengan prinsip dasar yang sama digunakan untuk memprediksi pergerakan nanobot dalam aliran darah manusia. Simulasi ini membantu ilmuwan memahami bagaimana nanobot berinteraksi dengan dinding pembuluh darah tanpa merusak jaringan sel, dengan memperhitungkan gaya dorong fluida darah dan karakteristik elastisitas dinding pembuluh darah (Jacob et al., 2021).

Efek Visual (CGI) dalam Industri Perfilman: Animasi modern seperti efek runtuhnya gedung, aliran air, atau gerakan kain melibatkan simulasi jutaan partikel secara simultan. Setiap partikel dihitung posisinya menggunakan integrasi waktu dan diatur agar memantul secara lenting sebagian (damped) saat mengenai objek lain, menghasilkan gerakan visual yang alami bagi mata manusia (Araújo Dos Santos et al., 2020).

KESIMPULAN

Eksperimen simulasi fisika komputasi ini berhasil membuktikan bahwa fenomena fisika dapat ditiru oleh komputer menggunakan logika matematika sederhana. Penggabungan Simulasi komputasi dinamika partikel dalam ruang terbatas menggunakan Metode Euler dan logika kondisional telah berhasil mereplikasi fenomena Gerak Lurus Beraturan (GLB) dan Gerak Lurus Berubah Beraturan (GLBB) dengan akurasi yang memadai. Pada GLB, pola posisi-waktu berbentuk gelombang segitiga periodik mengonfirmasi kekekalan kecepatan dan energi kinetik melalui pantulan elastik sempurna, dengan galat RMS di bawah 0,05% untuk $\Delta t = 0,001$ s. Pada GLBB, lintasan parabola sepotong-sepotong berhasil memodelkan percepatan konstan dan disipasi energi melalui koefisien restitusi, meskipun akurasi Metode Euler standar terbatas dan dapat ditingkatkan dengan skema Euler. Logika kondisional *if* terbukti esensial sebagai representasi komputasional gaya reaksi normal, menggantikan potensial dinding keras secara stabil dan efisien tanpa singularitas numerik. Kerangka kerja ini memiliki prospek pengembangan luas, mulai dari ekspansi ke ruang 2D/3D, sistem multi-partikel, hingga aplikasi dalam *physics engine* untuk game, robotika otonom, simulasi medis, dan efek visual CGI. Secara fundamental, penelitian ini menegaskan bahwa integrasi numerik sederhana dan logika bersyarat merupakan fondasi yang kokoh untuk pemodelan komputasional fenomena fisika yang semakin kompleks.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Kaprodi Pendidikan Fisika FKIP UIM, Dekan Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan UIM, Rektor Universitas Islam Madura atas dukungan fasilitas dan bimbingan akademik selama penelitian ini berlangsung, serta kepada seluruh pihak yang telah memberikan masukan konstruktif dalam penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aprilia Cristina Sianturi, Bali Sahputri Br Tarigan, Tantory Yahya Purba, & Valeri Agatha Br Sihombing. (2024). Implementasi Metode Eurl untuk Penyelesaian Persamaan Diferensial pada Dinamika Populasi. *Katalis Pendidikan : Jurnal Ilmu Pendidikan dan Matematika*, 1(4), 36–44. <https://doi.org/10.62383/katalis.v1i4.854>
- Araújo Dos Santos, D., Baluni, S., & Bück, A. (2020). Eulerian Multiphase Simulation of the Particle Dynamics in a Fluidized Bed Opposed Gas Jet Mill. *Processes*, 8(12), 1621. <https://doi.org/10.3390/pr8121621>
- Bumi, P. S., Umam, R., & Saregar, A. (2025). Optimization of Physics Learning on Uniform Linear Motion (GLB) and Uniformly Accelerated Linear Motion (GLBB) Through Interactive Virtual Practicum Simulation Based on Phet. *Islamic Journal of Integrated Science Education (IJISE)*, 4(2), 107–117. <https://doi.org/10.30762/ijise.v4i2.5850>
- Fadilla, N., Irma Yunita Sari, & Muhammad Suwignyo Prayogo. (2023). PENGARUH ALAT PERAGA KINEMATIKA GLB DAN GLBB UNTUK PENGUATAN PEMAHAMAN TENTANG GERAK DI KELAS IV SDN KEBONAGUNG 02 JEMBER. *Jurnal Muassis Pendidikan Dasar*, 2(2), 86–97. <https://doi.org/10.55732/jmpd.v2i2.65>
- Handayani, S., & Huda, D. N. (2021). Kalkulator gerak lurus berubah beraturan dan gerak lurus berubah beraturan berbasis matlab. *Navigation Physics : Journal of Physics Education*, 3(1), 22–26. <https://doi.org/10.30998/npjpe.v3i1.490>
- Jacob, B., Drawert, B., Yi, T.-M., & Petzold, L. (2021). An arbitrary Lagrangian Eulerian smoothed particle hydrodynamics (ALE-SPH) method with a boundary volume fraction formulation for fluid-structure interaction. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 128, 274–289. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2021.04.006>
- Rejeki, D. S. (2024). ANALISIS KONSEP GLB DAN GLBB DALAM KEHIDUPAN SEHARI-HARI. 1(3). 1(3), 13-19. <https://doi.org/10.62017/merdeka>
- Saputra, C., Salam, R. A., & Akhmedi. (2024). Simulasi Gerak Partikel Bermuatan dalam Medan Magnet Menggunakan Metode Euler dan JavaScript P5.js untuk Game Edukasi Berbasis Web. *Newton-Maxwell Journal of Physics*, 5(2), 66–72. <https://doi.org/10.33369/nmj.v5i2.36110>
- Stovian, R. (2024). Analisis Pemahaman Konsep Peserta Didik Pada Materi Gerak Lurus Menggunakan Aplikasi Online Quizizz. *Jurnal Dunia Pendidikan*, 5(1), 131–143. <https://doi.org/10.55081/jurdip.v5i1.2402>
- Toding, S. (2021). ANALISIS INTERPRETASI SISWA KELAS XI SMA NEGERI 3 PALU TERHADAP GRAFIK NUMERIK GLB-GLBB. 9(3). *Jurnal Pendidikan Fisika Tadulako Online*, 9(3), 108-112.
- Van Wachem, B., Elmestikawy, H., Chandran, A., & Hausmann, M. (2025). A new paradigm for computing hydrodynamic forces on particles in Euler–Lagrange point-particle simulations. *Journal of Fluid Mechanics*, 1018, A41. <https://doi.org/10.1017/jfm.2025.10526>
- Wibowo, H. A. C. (2018). Rancang Bangun Simulasi Komputer untuk Pembelajaran Fisika pada Topik Selektor Kecepatan dengan Metode Numerik Euler. *JIPVA (Jurnal Pendidikan IPA Veteran)*, 2(2), 141. <https://doi.org/10.31331/jipva.v2i2.684>
- Zaroni, A., Ristanto, S., & Nuroso, H. (2024). Analisis Gerak Pesawat Atwood Menggunakan Sensor IR-LED Dan Pengolahan Citra. *Lontar Physics Today*, 3(1), 9–18. <https://doi.org/10.26877/lpt.v3i1.19212>