

Menjembatani Formalisme Matematis dan Interpretasi Fisik melalui Simulasi Berbasis Python: Suatu Kerangka Pemodelan Komputasional untuk Mekanika Newton di Sekolah Menengah

Bridging Mathematical Formalism and Physical Interpretation Through Python-Based Simulation: A Computational Modeling Framework for Secondary School Newtonian Mechanics

Rodika Utama

Universitas Ahmad Dahlan

*Corresponding Author: rodika@ruangguru.com

Kata Kunci

berpikir komputasional;
koherensi representasional;
mekanika Newton;
pemodelan komputasional;
simulasi python

ABSTRAK

Kesenjangan antara formalisme matematis dan interpretasi fisik masih menjadi tantangan dalam pembelajaran mekanika Newton di sekolah menengah. Siswa sering mampu memanipulasi persamaan seperti $F = ma$, namun belum memahami bagaimana persamaan tersebut merepresentasikan proses fisik yang dinamis. Penelitian ini menggunakan pendekatan pengembangan kerangka konseptual (*conceptual framework development*) berbasis analisis literatur dalam penelitian pendidikan fisika berbasis disiplin. Penelitian ini mengusulkan kerangka *computational modeling* yang merekonseptualisasikan hukum kedua Newton sebagai proses yang dapat dieksekusi melalui simulasi berbasis Python. Berlandaskan penelitian pendidikan fisika berbasis disiplin, teori koherensi representasional, dan *computational thinking*, kerangka ini mentransformasikan persamaan simbolik menjadi aturan pembaruan numerik iteratif yang menghasilkan gerak secara dinamis. Model ini mengintegrasikan dekomposisi konseptual, formalisasi matematis, translasi algoritmik, implementasi simulasi, dan visualisasi reflektif, sehingga memposisikan komputasi sebagai jembatan representasional antara persamaan, grafik gerak, dan penalaran fisik. Ilustrasi skenario gaya konstan menunjukkan bagaimana simulasi dapat memperkuat keterkaitan antara representasi matematis dan perilaku fisik. Kerangka yang diusulkan memberikan kontribusi berupa model desain pembelajaran berbasis teori untuk mengintegrasikan praktik komputasional dalam pembelajaran fisika sekolah menengah, dengan potensi memperkuat koherensi konseptual dan mengurangi fragmentasi dalam pemahaman simbolik.

Keywords

computational modeling;
computational thinking;
newtonian mechanics;
python simulation;
representational coherence

©2026 The Author
p-ISSN 2338-3240
e-ISSN 2580-5924

ABSTRACT

The gap between mathematical formalism and physical interpretation remains a persistent challenge in learning Newtonian mechanics at the secondary school level. Students often succeed in manipulating equations such as $F = ma$, yet struggle to understand how these equations represent dynamic physical processes. This study employs a conceptual framework development approach based on literature analysis within discipline-based physics education research. The study proposes a computational modeling framework that reconceptualizes Newton's second law as an executable process implemented through Python-based simulations. Grounded in discipline-based physics education research, representational coherence theory, and computational thinking, the framework transforms symbolic equations into iterative numerical update rules that generate motion dynamically. The proposed model integrates conceptual decomposition, mathematical formalization, algorithmic translation, simulation

implementation, and reflective visualization, positioning computation as a representational bridge connecting equations, motion graphs, and physical reasoning. An illustrative constant-force scenario demonstrates how simulation can strengthen the relationship between mathematical representations and physical behavior. The proposed framework contributes a theoretically grounded instructional design model for integrating computational practices into secondary school physics learning, with the potential to enhance conceptual coherence and reduce fragmentation in students' symbolic understanding.

Received 25/02/2026; Revised 15/03/2026; Accepted 23/04/2026; Available Online 30/04/2024

How to cite: Utama, R. (2026). Menjembatani formalisme matematis dan interpretasi fisik melalui simulasi berbasis Python: Suatu kerangka pemodelan komputasional untuk mekanika Newton di sekolah menengah. *JPFT (Jurnal Pendidikan Fisika Tadulako Online)*, 14(1), 53–64.

PENDAHULUAN

Mekanika Newton merupakan salah satu bidang yang paling mendasar namun secara konsisten menantang dalam pembelajaran fisika di sekolah menengah (Crouch et al., 2018). Meskipun siswa secara rutin diperkenalkan pada prinsip-prinsip inti seperti hukum gerak Newton, banyak di antara mereka yang menunjukkan kelancaran prosedural tanpa mencapai koherensi konseptual yang mendalam. Mereka mungkin dapat memanipulasi persamaan $F = ma$, mengganti nilai numerik, dan memperoleh jawaban yang benar, namun masih mengalami kesulitan dalam menafsirkan percepatan sebagai proses dinamis atau menjelaskan bagaimana gaya membentuk gerak seiring waktu. Penelitian dalam pendidikan fisika berbasis disiplin secara konsisten melaporkan kesenjangan antara kompetensi simbolik dan pemahaman konseptual ini, yang menyoroti bahwa siswa sering memperlakukan persamaan sebagai alat perhitungan daripada sebagai representasi model fisik (Dockett & Mestre, 2014; Meltzer & Thornton, 2012).

Kesulitan ini mencerminkan ketegangan instruksional yang lebih mendalam antara formalisme matematika dan interpretasi fisik. Penelitian terbaru juga menyoroti pentingnya kerangka konseptual yang membantu siswa membangun makna matematis dalam konteks fisika melalui koordinasi berbagai representasi (Gifford & Finkelstein, 2020). Fisika, secara hakikatnya, merupakan disiplin pemodelan di mana persamaan mengodekan hubungan yang mengatur sistem dinamis. Namun, pembelajaran di kelas pada tingkat sekolah menengah sering menyajikan rumus sebagai entitas aljabar statis, yang menekankan penyusunan ulang dan substitusi daripada konstruksi dan interpretasi model. Akibatnya, siswa jarang memahami hukum fisika sebagai proses generatif yang berkembang seiring waktu (Hake, 1998). Struktur simbolik fisika menjadi terlepas dari fenomena yang dijelaskannya, sehingga membatasi apa yang disebut sebagai koherensi representasional, yaitu kemampuan untuk mengoordinasikan persamaan, grafik, diagram, dan penalaran konseptual dalam satu kerangka mental yang terpadu.

Pentingnya kompetensi representasional dalam pembelajaran fisika telah diakui secara luas. Pemahaman yang efektif menuntut siswa untuk dapat berpindah antara persamaan simbolik, representasi grafis dari gerak, penjelasan verbal, dan intuisi fisik. Ketika representasi-representasi ini tetap terpisah, penalaran siswa menjadi terfragmentasi dan perubahan konseptual menjadi terhambat (Dockett & Mestre, 2014). Meskipun reformasi pembelajaran menekankan pembelajaran aktif dan penggunaan berbagai representasi, banyak pembelajaran fisika di tingkat sekolah menengah masih sangat bergantung pada penyelesaian analitis dalam

bentuk tertutup (*closed-form analytical solutions*), yang memperkuat persepsi bahwa fisika terutama terdiri dari manipulasi persamaan (Hestenes, 1987).

Pada saat yang sama, praktik ilmiah kontemporer telah mengalami transformasi komputasional yang mendalam. Dalam fisika dan rekayasa modern, pemodelan numerik dan simulasi merupakan alat yang sangat penting untuk mengeksplorasi sistem yang bergantung pada waktu, menguji hipotesis, dan memvisualisasikan dinamika yang kompleks. Pendekatan komputasional memungkinkan para ilmuwan melakukan iterasi parameter, menghitung solusi aproksimasi, dan mengamati evolusi sistem secara langsung. Oleh karena itu, para ahli berpendapat bahwa pemikiran komputasional seharusnya dipandang sebagai praktik ilmiah yang mendasar, bukan sekadar keterampilan teknis (Wing, 2006). Namun, dalam pendidikan fisika sekolah menengah, pemodelan komputasional masih jarang diajarkan, dan ketika pemrograman diperkenalkan, sering kali diposisikan sebagai aktivitas pengkodean tambahan daripada sebagai strategi pemodelan konseptual (Chabay & Sherwood, 2008; Weintrop & Wilensky, 2017). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa integrasi komputasi dalam kurikulum fisika dapat dilakukan tanpa harus mengubah struktur utama mata pelajaran, dengan memanfaatkan aktivitas pemodelan komputasional yang terintegrasi dengan konsep fisika inti (Caballero & Pollock, 2014; Young et al., 2019). Integrasi komputasi dalam pembelajaran fisika semakin dipandang sebagai bagian penting dari literasi ilmiah modern dan praktik ilmiah kontemporer (Caballero & Pollock, 2014; Odden et al., 2019; Young et al., 2019).

Meskipun beberapa penelitian telah mengintegrasikan pemrograman ke dalam kelas sains, banyak dari pekerjaan ini menekankan keterlibatan, literasi digital, atau kemahiran pengkodean tanpa secara eksplisit membahas kesenjangan yang telah lama ada antara formalisme matematika dan interpretasi fisik dalam pembelajaran fisika. Sebagai contoh, pendekatan komputasional dalam pembelajaran fisika yang dikembangkan oleh Chabay dan Sherwood, (2008) menunjukkan bagaimana simulasi dapat digunakan untuk memodelkan sistem fisik secara numerik. Namun, pendekatan tersebut terutama diterapkan dalam konteks pendidikan tinggi dan belum secara eksplisit dirancang untuk menjembatani hubungan representasional antara persamaan simbolik, grafik gerak, dan penalaran fisik dalam konteks pembelajaran mekanika Newton di sekolah menengah.

Selain itu, hanya sedikit kerangka kerja yang menjelaskan bagaimana simulasi komputasional dapat secara sistematis mentransformasikan persamaan simbolik menjadi model dinamis yang dapat dijalankan dan mengungkapkan makna fisiknya. Secara khusus, mekanika Newton di tingkat sekolah menengah belum cukup direkonseptualisasikan melalui pendekatan pemodelan komputasional yang berlandaskan penelitian pendidikan berbasis disiplin (Chabay & Sherwood, 2008).

Penelitian ini membahas kesenjangan teoretis dan pedagogis tersebut dengan mengusulkan kerangka pemodelan komputasional yang mereformulasikan hukum kedua Newton sebagai proses komputasional yang dapat dijalankan. Dengan menerjemahkan $F = ma$ menjadi aturan pembaruan numerik iteratif dan mengimplementasikannya melalui simulasi berbasis Python, ekspresi matematika menjadi model operasional yang mampu menghasilkan gerak secara waktu nyata. Transformasi ini memungkinkan siswa untuk mengamati bagaimana percepatan memengaruhi dinamika kecepatan dan posisi, sehingga secara langsung memperkuat hubungan antara formalisme simbolik dan interpretasi fisik (Hake, 1998). Alih-alih menambahkan pemrograman sebagai komponen yang terpisah, kerangka ini memposisikan komputasi sebagai jembatan representasional yang menyatukan persamaan, grafik, dan penalaran konseptual.

Kebaruan penelitian ini terletak pada tiga kontribusi yang saling berkaitan. Pertama, penelitian ini merekonseptualisasikan integrasi komputasional bukan sebagai strategi peningkatan teknologi, tetapi sebagai mekanisme untuk menyelesaikan ketegangan

representasional inti dalam pendidikan fisika. Kedua, penelitian ini mengembangkan kerangka pemodelan komputasional yang terstruktur dan secara khusus disesuaikan untuk mekanika Newton di sekolah menengah, dengan mengintegrasikan dekomposisi konseptual, formalisasi matematika, penerjemahan algoritmik, implementasi simulasi, dan visualisasi reflektif ke dalam satu desain pembelajaran yang koheren. Ketiga, penelitian ini secara eksplisit menjembatani teori pemikiran komputasional (Wing, 2006) dengan penelitian pendidikan fisika berbasis disiplin, dengan menempatkan simulasi berbasis Python dalam lanskap teoretis yang telah mapan alih-alih memperlakukannya sebagai inovasi teknis semata. Konseptualisasi ini juga diperkuat oleh penelitian dalam pendidikan STEM yang menempatkan computational thinking sebagai kompetensi penting dalam pembelajaran matematika dan sains (Weintrop et al., 2016; Lye & Koh, 2014).

Dengan mengartikulasikan kerangka pemodelan komputasional yang berlandaskan teori, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap kemajuan berorientasi desain dalam pembelajaran fisika sekolah menengah. Kerangka ini menawarkan landasan konseptual untuk penelitian empiris di masa depan yang mengkaji bagaimana simulasi komputasional dapat meningkatkan koherensi representasional, pemahaman konseptual, dan penalaran dinamis dalam mekanika Newton. Dengan demikian, penelitian ini berupaya menyelaraskan pembelajaran fisika di sekolah menengah secara lebih dekat dengan praktik ilmiah autentik sekaligus mengatasi tantangan konseptual yang telah lama didokumentasikan dalam penelitian pendidikan fisika (Hestenes, 1987).

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *conceptual framework development* berbasis analisis literatur dalam *discipline-based physics education research* (DBER) untuk mengembangkan kerangka pemodelan komputasional dalam pembelajaran mekanika Newton di sekolah menengah.

Dalam penelitian pendidikan berbasis disiplin (*discipline-based education research*), pemodelan telah diidentifikasi sebagai inti dari praktik fisika yang autentik. Fisika tidak terdiri dari sekadar rumus yang dihafal, tetapi dari proses membangun, menguji, dan menyempurnakan model yang menggambarkan fenomena fisik. Pendekatan pembelajaran berbasis pemodelan menekankan proses penalaran iteratif dan koherensi konseptual, dengan memposisikan persamaan sebagai komponen dari sistem penjelasan, bukan sebagai titik akhir dari prosedur aljabar. Ketika pembelajaran berfokus pada manipulasi simbolik tanpa mengaitkan persamaan dengan proses fisik yang dinamis, siswa dapat gagal memahami hukum gerak sebagai prinsip generatif yang mengatur evolusi sistem. Akibatnya, formalisme simbolik menjadi terlepas dari makna fisiknya (Hestenes, 1987).

Pembelajaran fisika memerlukan koordinasi di antara berbagai bentuk representasi. Berbeda dengan banyak mata pelajaran lain di sekolah, fisika melibatkan secara simultan persamaan simbolik, representasi grafis, diagram, serta penalaran konseptual tentang sistem fisik. Oleh karena itu, pemahaman yang efektif tidak hanya bergantung pada ketepatan komputasional atau kelancaran representasional—yaitu kemampuan untuk menerjemahkan makna secara tepat di antara berbagai bentuk representasi tersebut. Ainsworth (2006) berpendapat bahwa berbagai representasi mendukung pembelajaran ketika representasi tersebut berfungsi untuk saling melengkapi, membatasi, dan memperdalam pemahaman konseptual, bukan sekadar hadir sebagai format yang terpisah dan tidak saling terhubung. Dalam mekanika Newton di sekolah menengah, siswa harus mengoordinasikan persamaan seperti $F = ma$, grafik kecepatan-waktu, diagram gerak, serta interpretasi fisik dari interaksi gaya. Namun, penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa siswa sering memperlakukan representasi-representasi

ini secara terpisah, yang menghasilkan penalaran yang terfragmentasi dan pendekatan pemecahan masalah yang dangkal (Docktor & Mestre, 2014).

Kesulitan ini terutama terlihat dalam cara siswa memperlakukan hukum kedua Newton. Meskipun siswa mungkin dapat dengan benar menyusun ulang persamaan $F = ma$ untuk menghitung percepatan, mereka sering mengalami kesulitan dalam menafsirkan percepatan sebagai perubahan kecepatan yang bergantung pada waktu atau dalam memandang gerak sebagai hasil kumulatif dari interaksi gaya. Pemecahan masalah aljabar tradisional biasanya menyajikan persoalan gerak sebagai solusi dalam bentuk tertutup (*closed-form solutions*), yang memperkuat penalaran statis. Pendekatan ini menyamakan fakta bahwa gerak sebenarnya berkembang secara bertahap dari waktu ke waktu. Sebaliknya, metode pemodelan numerik secara eksplisit merepresentasikan gerak sebagai rangkaian pembaruan iteratif, sehingga membuat evolusi waktu menjadi terlihat.

Pemikiran komputasional memberikan perspektif teoretis yang saling melengkapi. Wing (2006) mengonseptualisasikan pemikiran komputasional sebagai proses yang melibatkan dekomposisi, abstraksi, perancangan algoritma, dan penyempurnaan secara iteratif. Proses-proses ini selaras erat dengan struktur mekanika Newton. Sebuah skenario fisika dapat diuraikan menjadi gaya-gaya yang saling berinteraksi, diabstraksikan ke dalam hubungan matematis, diterjemahkan menjadi aturan pembaruan algoritmik, dan dijalankan secara iteratif. Ketika hukum kedua Newton direformulasikan ke dalam langkah-langkah waktu diskret menghitung percepatan dari gaya bersih, memperbarui kecepatan, dan memperbarui posisi persamaan tersebut menjadi model yang dapat dijalankan. Dalam pengertian ini, komputasi tidak memperkenalkan keterampilan eksternal, melainkan mengungkapkan struktur prosedural yang sudah melekat dalam hukum fisika itu sendiri.

Integrasi pemodelan komputasional ke dalam pembelajaran fisika dengan demikian memiliki signifikansi konseptual yang melampaui sekadar peningkatan teknologi. Simulasi berbasis Python memungkinkan persamaan menghasilkan gerak secara dinamis, dengan menghubungkan ekspresi simbolik secara langsung dengan representasi grafis dan visual. Simulasi komputasional juga memungkinkan siswa untuk mengembangkan literasi komputasional dalam fisika melalui eksplorasi model yang dapat dijalankan dan dimodifikasi secara langsung (Odden et al., 2019; Orban & Teeling-Smith, 2020). Ketika siswa mengamati bagaimana perubahan parameter gaya atau massa mengubah percepatan dan lintasan secara waktu nyata, mereka mengalami persamaan sebagai mekanisme kausal, bukan sebagai rumus statis. Eksekusi dinamis ini dapat memperkuat koherensi representasional dengan menyatukan penalaran aljabar, grafis, dan konseptual dalam satu lingkungan pemodelan.

Yang tidak kalah penting, integrasi ini harus dirancang secara pedagogis untuk menghindari kelebihan beban kognitif. Teori beban kognitif menyarankan bahwa desain pembelajaran harus mengelola kompleksitas intrinsik sekaligus meminimalkan tuntutan pemrosesan yang tidak relevan. Memperkenalkan pemrograman tanpa kerangka konseptual dapat membuat siswa kewalahan. Namun, ketika pemodelan komputasional disusun secara bertahap—dimulai dari dekomposisi konseptual, diikuti dengan formalisasi matematika, kemudian penerjemahan algoritmik, dan akhirnya pelaksanaan simulasi tuntutan kognitif dapat didistribusikan secara bermakna. Dalam desain seperti ini, pengkodean menjadi representasi transparan dari penalaran fisika, bukan lapisan abstraksi tambahan.

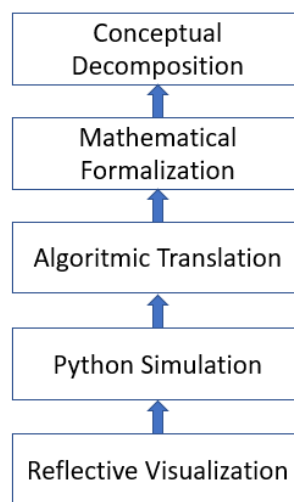
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kerangka pemodelan komputasional yang diusulkan dirancang untuk merekonseptualisasikan pembelajaran mekanika Newton di tingkat sekolah menengah. Alih-alih menyajikan hukum kedua Newton sebagai hubungan simbolik yang statis, kerangka ini

memosisikannya sebagai model yang dapat dijalankan yang secara dinamis menghasilkan gerak melalui prosedur numerik iteratif. Bagian ini menjelaskan arsitektur struktural dari kerangka tersebut, memberikan ilustrasi implementasinya dalam skenario gaya konstan, serta membahas implikasi pedagogisnya.

Kerangka Pemodelan Komputasional yang Diusulkan

Kerangka pemodelan komputasional disusun berdasarkan lima fase yang saling terhubung yang memandu transformasi ekspresi matematis menjadi simulasi yang dapat dijalankan. Meskipun disajikan secara berurutan untuk kejelasan, fase-fase tersebut bersifat rekursif secara pedagogis, memungkinkan pergerakan di antara berbagai representasi sepanjang proses pembelajaran. Arsitektur ini dirancang untuk mengoperasionalkan hukum kedua Newton sebagai proses pemodelan dinamis, bukan sekadar rumus aljabar yang terisolasi. Struktur keseluruhan dari kerangka pemodelan komputasional yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemodelan komputasional yang diusulkan untuk pembelajaran mekanika newton di sekolah menengah.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, kerangka tersebut berkembang melalui lima fase yang saling terhubung yang secara kolektif mentransformasikan persamaan simbolik menjadi simulasi yang dapat dijalankan.

Fase pertama, dekomposisi konseptual, dimulai dengan analisis kualitatif dari suatu skenario fisika. Siswa mengidentifikasi gaya-gaya yang berinteraksi, menentukan besaran fisika yang relevan seperti massa dan gaya bersih, serta memprediksi perilaku gerak yang diharapkan (diSessa, 1993). Tahap ini membangun landasan konseptual sebelum formalisasi simbolik dan memastikan bahwa prosedur komputasional tetap berakar pada penalaran fisika.

Fase kedua, formalisasi matematis, menerjemahkan deskripsi konseptual ke dalam bentuk simbolik menggunakan hukum kedua Newton. Alih-alih menekankan manipulasi aljabar semata, pembelajaran menyoroti makna interpretatif dari setiap istilah. Gaya dipahami sebagai interaksi, percepatan sebagai laju perubahan kecepatan terhadap waktu, dan massa sebagai resistensi terhadap percepatan. Tujuan dari fase ini adalah mempertahankan transparansi konseptual dalam representasi matematis.

Fase ketiga, penerjemahan algoritmik, mereformulasikan persamaan kontinu $F = ma$ menjadi aturan diskret yang sesuai untuk iterasi numerik. Percepatan dihitung dari gaya bersih yang dibagi dengan massa, dan variabel gerak diperbarui secara bertahap dalam interval waktu

kecil. Kecepatan dan posisi dinyatakan melalui hubungan rekursif: $v_{t+1} = v_t + a\Delta t$ and $x_{t+1} = x_t + v_t\Delta t$.

Transformasi ini memperjelas struktur iteratif yang tersirat dalam mekanika Newton dan memandang gerak sebagai proses yang muncul dari penerapan berulang aturan sederhana.

Fase keempat, implementasi komputasional, mengodekan aturan pembaruan tersebut ke dalam simulasi berbasis Python. Struktur pemrograman sengaja dibuat minimal, biasanya melibatkan inisialisasi variabel dan konstruksi perulangan (*loop*) yang secara iteratif memperbarui kecepatan dan posisi. Penekanan tetap pada makna fisika daripada kompleksitas komputasional. Dengan menjalankan model tersebut, siswa mengeksternalisasikan struktur matematis dan mengamati evolusi numerik langkah demi langkah (Hake, 1998).

Fase kelima, visualisasi reflektif, menafsirkan keluaran simulasi melalui representasi grafis. Grafik posisi-waktu dan kecepatan-waktu dihasilkan secara langsung dari model numerik. Siswa membandingkan hasil ini dengan prediksi teoretis, mengamati variasi parameter, dan menafsirkan perilaku sistem. Tahap ini memperkuat keselarasan antara persamaan simbolik, eksekusi algoritmik, representasi grafis, dan penalaran konseptual (diSessa, 1993).

Salah satu fitur penting dari kerangka ini adalah penerjemahan dua arah. Peserta didik bergerak dari deskripsi fisik ke persamaan simbolik, dari persamaan ke algoritma, dari algoritma ke kode yang dapat dijalankan, dan dari keluaran simulasi kembali ke interpretasi fisik. Struktur siklik ini mencerminkan praktik pemodelan ilmiah dan memperkuat koherensi representasional di berbagai domain.

Untuk mengelola tuntutan kognitif, kerangka ini mengintegrasikan *scaffolding* secara bertahap. Implementasi awal dapat menyediakan template kode yang sebagian telah diselesaikan untuk mengurangi beban pemrosesan yang tidak relevan sekaligus mempertahankan keterlibatan konseptual. Seiring meningkatnya keakraban siswa dengan struktur komputasional, mereka secara bertahap mengambil tanggung jawab lebih besar dalam membangun algoritma secara mandiri. Dukungan bertahap ini meningkatkan aksesibilitas tanpa mengorbankan kedalaman pemodelan.

Melalui arsitektur ini, formalisme matematis menjadi operasional, bukan sekadar simbolik. Kerangka ini memposisikan simulasi sebagai media yang melaluinya struktur dinamis hukum Newton menjadi terlihat secara pengalaman, sehingga mengatasi kesenjangan representasional antara manipulasi aljabar dan interpretasi fisik dalam pembelajaran fisika di sekolah menengah.

Contoh Implementasi Ilustratif

Untuk mengkonkretkan kerangka tersebut, subbagian ini menyajikan implementasi ilustratif yang melibatkan suatu objek yang mengalami gaya bersih konstan. Contoh ini menunjukkan bagaimana persamaan simbolik diterjemahkan menjadi aturan pembaruan algoritmik dan dijalankan melalui simulasi Python untuk menghasilkan gerak yang dapat diamati.

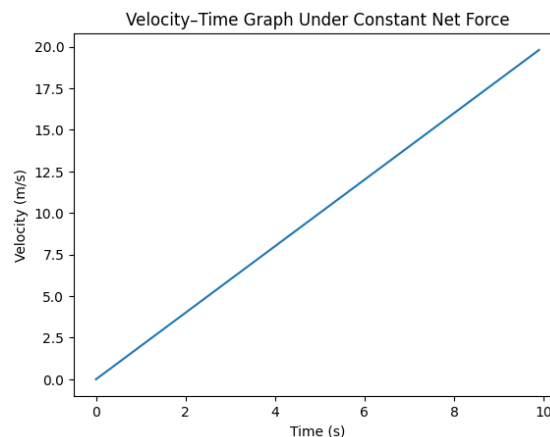
Untuk menggambarkan bagaimana kerangka yang diusulkan beroperasi dalam praktik, pertimbangkan sebuah pelajaran fisika di sekolah menengah tentang hukum kedua Newton yang melibatkan objek bermassa tertentu yang dikenai gaya konstan. Dalam pembelajaran tradisional, siswa biasanya menghitung percepatan menggunakan persamaan $a = F/m$, kemudian mengganti nilai ke dalam persamaan kinematika, dan menentukan kecepatan akhir atau perpindahan setelah interval waktu tertentu. Meskipun pendekatan ini menghasilkan jawaban numerik yang benar, pendekatan tersebut sering menyamarkan struktur dinamis dari gerak.

Dalam kerangka pemodelan komputasional, skenario yang sama didekati secara berbeda. Setelah mengidentifikasi gaya-gaya yang bekerja pada objek dan menentukan gaya bersih, siswa terlebih dahulu memprediksi secara kualitatif bagaimana gerak akan berkembang. Mereka mendiskusikan apakah kecepatan akan meningkat atau menurun serta bagaimana posisi akan berubah seiring waktu. Tahap ini menekankan penalaran konseptual sebelum formalisasi matematis.

Persamaan $F = ma$ kemudian direformulasikan menjadi aturan pembaruan numerik. Alih-alih langsung menyelesaikan kecepatan akhir, siswa menghitung percepatan dan menerapkannya secara bertahap dalam interval waktu kecil. Kecepatan menjadi besaran yang berkembang langkah demi langkah, bukan satu nilai yang dihitung sekaligus. Posisi, pada gilirannya, muncul dari pembaruan berulang terhadap kecepatan. Ketika diimplementasikan dalam Python, pembaruan ini berbentuk struktur *loop* sederhana yang secara iteratif menghitung ulang variabel gerak.

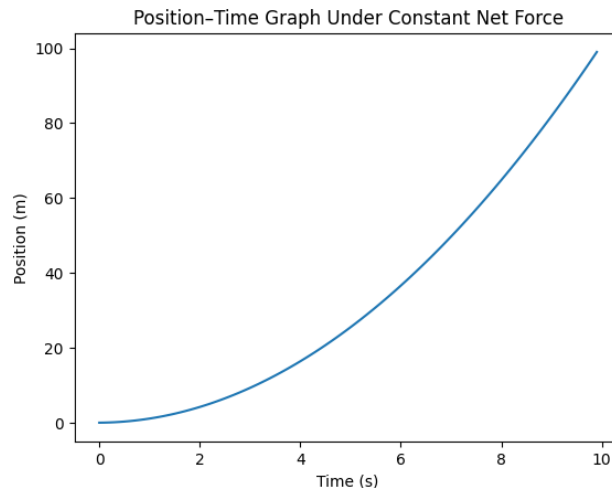
Setelah dijalankan, simulasi menghasilkan grafik gerak. Grafik kecepatan-waktu muncul sebagai fungsi linear, sedangkan grafik posisi-waktu membentuk kurva kuadratik. Yang penting, pola grafis ini tidak diperkenalkan secara abstrak; pola tersebut muncul langsung dari penerapan iteratif hukum kedua Newton. Siswa dapat memodifikasi besar gaya atau massa dan segera mengamati perubahan pada percepatan dan lintasan. Eksperimen dinamis ini memungkinkan siswa menghubungkan hubungan aljabar dengan hasil grafis dan perilaku fisik secara waktu nyata.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 2, kecepatan meningkat secara linear terhadap waktu ketika gaya bersih konstan bekerja, yang mencerminkan percepatan seragam. Pola linear ini muncul secara langsung dari aturan pembaruan iteratif yang diturunkan dari hukum kedua Newton.



Gambar 2. Grafik kecepatan-waktu yang dihasilkan melalui simulasi numerik iteratif yang diturunkan dari hukum kedua Newton.

Gambar 3 menggambarkan hubungan posisi-waktu berbentuk kuadratik yang dihasilkan dari pembaruan kecepatan secara bertahap. Kurva parabola tersebut tidak dipaksakan secara analitis, tetapi muncul dari penerapan numerik berulang terhadap aturan percepatan.



Gambar 3. Grafik posisi-waktu yang dihasilkan melalui simulasi numerik iteratif berdasarkan hukum kedua Newton pada total gaya konstan.

Nilai pedagogis dari implementasi ini tidak terletak pada kemahiran pengkodean, melainkan pada integrasi representasional. Siswa menyaksikan bagaimana formalisme matematis menghasilkan pola gerak yang dapat diamati (Redish, 2003). Simulasi tersebut mengeksternalisasikan penalaran yang sebelumnya hanya bersifat simbolik dan statis. Melalui eksperimen berulang, peserta didik mulai menafsirkan persamaan sebagai model dinamis, bukan sekadar alat komputasi yang terpisah.

Implikasi Pedagogis

Di luar implementasi teknisnya, kerangka ini memiliki implikasi yang lebih luas terhadap bagaimana fisika dikonseptualisasikan dan diajarkan di tingkat sekolah menengah. Kerangka pemodelan komputasional yang diusulkan menyajikan beberapa implikasi bagi pembelajaran fisika di sekolah menengah.

Pertama, kerangka ini mendorong pergeseran dari pemecahan masalah yang berorientasi pada jawaban menuju penalaran yang berorientasi pada model. Dengan menekankan pembaruan iteratif dan evolusi dinamis, siswa terlibat dengan proses gerak daripada sekadar hasil akhirnya. Pendekatan ini menyelaraskan pembelajaran secara lebih dekat dengan praktik pemodelan ilmiah yang autentik (Sherin, 2001).

Kedua, kerangka ini memperkuat koherensi representasional. Karena persamaan, grafik, dan gerak dihasilkan dalam lingkungan komputasional yang sama, siswa menjadi lebih kecil kemungkinannya untuk memisahkan representasi tersebut. Kejelasan visual dari keluaran simulasi mendukung keterkaitan konseptual antara ekspresi matematis dan interpretasi fisik (Redish, 2003).

Ketiga, integrasi simulasi berbasis Python memperkenalkan komputasi kepada siswa sebagai praktik ilmiah, bukan sebagai mata pelajaran yang terpisah. Ketika pengkodean tertanam dalam pemodelan fisika, pemikiran komputasional menjadi perluasan alami dari penalaran fisika. Siswa belajar untuk mendekomposisi sistem, merancang aturan pembaruan, dan menyempurnakan model secara iteratif, yang mencerminkan unsur-unsur inti pemikiran komputasional (diSessa, 1993).

Keempat, struktur scaffolding dalam kerangka ini memungkinkan adaptasi terhadap berbagai tingkat pengetahuan awal. Guru dapat pada tahap awal menyediakan template kode yang sebagian telah diselesaikan untuk mengurangi beban kognitif yang tidak relevan, kemudian secara bertahap meningkatkan tanggung jawab siswa dalam membangun algoritma.

Fleksibilitas ini mendukung implementasi praktis di kelas tanpa membuat siswa kewalahan (Sherin, 2001).

Terakhir, kerangka ini memiliki implikasi bagi pengembangan kurikulum. Seiring dengan semakin ditekankannya literasi digital dan integrasi STEM dalam banyak sistem pendidikan, pengintegrasian pemodelan komputasional dalam pembelajaran fisika inti memberikan jalur yang koheren untuk penyelarasan tersebut. Alih-alih menambahkan pengkodean sebagai kegiatan ekstrakurikuler, simulasi menjadi komponen integral dari pembelajaran konseptual.

Keterbatasan dan Arah Penelitian Masa Depan

Sebagai penelitian teoretis yang berorientasi pada desain, karya ini tidak menyediakan validasi empiris. Tujuannya adalah untuk merumuskan model pembelajaran terstruktur yang mengundang investigasi kelas di masa mendatang. Meskipun penelitian ini mengusulkan kerangka pembelajaran yang berlandaskan teori, penelitian ini tidak melaporkan data empiris. Efektivitas pemodelan komputasional dalam meningkatkan pemahaman konseptual, koherensi representasional, atau transfer pemecahan masalah masih perlu diuji melalui studi terkontrol.

Penelitian selanjutnya perlu menyelidiki bagaimana siswa berinteraksi dengan tugas pemodelan berbasis simulasi, apakah kerangka ini mengurangi miskonsepsi umum dalam mekanika Newton, serta bagaimana hasil belajar dibandingkan dengan pembelajaran tradisional (Redish, 2003).

Selain itu, penerapan pemodelan komputasional di kelas sekolah menengah dapat menghadirkan tantangan praktis, termasuk kesiapan guru, akses terhadap sumber daya teknologi, serta variasi pengalaman pengkodean siswa sebelumnya (Sherin, 2001). Studi empiris perlu meneliti bagaimana strategi scaffolding memengaruhi beban kognitif dan bagaimana keterbatasan waktu pembelajaran memengaruhi kelayakan integrasi.

Penelitian lebih lanjut juga dapat mengeksplorasi pengembangan kerangka ini di luar skenario gaya konstan. Mengintegrasikan gaya yang tidak konstan, gesekan, gerak peluru, atau sistem multidimensi akan memberikan peluang untuk meneliti apakah pemodelan komputasional mendukung transfer pembelajaran di berbagai konteks. Penelitian longitudinal juga dapat menilai apakah paparan awal terhadap model fisika yang dapat dijalankan meningkatkan kesiapan siswa untuk studi STEM tingkat lanjut.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengusulkan sebuah kerangka pemodelan komputasional yang dirancang untuk menjembatani kesenjangan yang telah lama ada antara formalisme matematika dan interpretasi fisik dalam mekanika Newton di sekolah menengah. Dengan menerjemahkan hukum kedua Newton menjadi simulasi berbasis Python yang dapat dijalankan, kerangka ini merekonseptualisasikan persamaan sebagai alat pemodelan dinamis, bukan sebagai rumus aljabar statis. Berlandaskan teori representasi, pembelajaran berbasis pemodelan, dan pemikiran komputasional, kerangka ini mengintegrasikan penalaran konseptual, penerjemahan algoritmik, dan visualisasi dalam satu struktur pedagogis yang koheren.

Melalui rekonseptualisasi ini, ekspresi matematis menjadi mekanisme generatif yang secara nyata menghasilkan gerak seiring waktu. Pendekatan ini memperkuat koherensi representasional dengan menyatukan penalaran simbolik, grafis, dan konseptual. Meskipun validasi empiris masih diperlukan, kerangka yang diusulkan menawarkan model desain yang berlandaskan teori yang mampu memandu penelitian di masa depan dan inovasi kurikulum dalam pembelajaran fisika di sekolah menengah.

Dengan menyelaraskan pembelajaran di kelas dengan praktik pemodelan ilmiah yang autentik, simulasi komputasional berbasis Python memiliki potensi sebagai jembatan antara matematika formal dan pemahaman fisika yang bermakna.

DAFTAR PUSTAKA

- Ainsworth, S. (2006). DeFT: A Conceptual Framework for Considering Learning with Multiple Representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>
- Caballero, M. D., & Pollock, S. J. (2014). A Model for Incorporating Computation without Changing the Course: An Example from Middle-Division Classical Mechanics. *American Journal of Physics*, 82(3), 231–237. <https://doi.org/10.1119/1.4837437>
- Chabay, R., & Sherwood, B. (2008). Computational Physics in The Introductory Calculus-Based Course. *American Journal of Physics*, 76(4), 307–313. <https://doi.org/10.1119/1.2835054>
- Crouch, C. H., Wisittanawat, P., Cai, M., & Renninger, K. A. (2018). Life Science Students' Attitudes, Interest, and Performance in Introductory Physics for Life Sciences: An Exploratory Study. *Physical Review Physics Education Research*, 14(1), 010111. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010111>
- diSessa, A. A. (1993). Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2–3), 105–225. <https://doi.org/10.1080/07370008.1985.9649008>
- Docktor, J. L., & Mestre, J. P. (2014). Synthesis of Discipline-Based Education Research in Physics. *Physical Review Special Topics—Physics Education Research*, 10(2), 020119. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.10.020119>
- Gifford, J. D., & Finkelstein, N. D. (2020). Categorical Framework for Mathematical Sense Making in Physics. *Physical Review Physics Education Research*, 16(2), 020121. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020121>
- Hake, R. R. (1998). Interactive-Engagement Versus Traditional Methods: A Six-Thousand-Student Survey of Mechanics Test Data. *American Journal of Physics*, 66(1), 64–74. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
- Hestenes, D. (1987). Toward a Modeling Theory of Physics Instruction. *American Journal of Physics*, 55(5), 440–454. <https://doi.org/10.1119/1.15129>
- Lye, S. Y., & Koh, J. H. L. (2014). Review on Teaching and Learning of Computational Thinking through Programming. *Computers in Human Behavior*, 41, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.09.012>
- Meltzer, D. E., & Thornton, R. K. (2012). Resource Letter ALIP–1: Active-Learning Instruction in Physics. *American Journal of Physics*, 80(6), 478–496. <https://doi.org/10.1119/1.3678299>
- Odden, T. O. B., Lockwood, E., & Caballero, M. D. (2019). Physics Computational Literacy: An Exploratory Case Study Using Computational Essays. *Physical Review Physics Education Research*, 15(2), 020152. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020152>
- Orban, C. M., & Teeling-Smith, R. M. (2020). Computational Thinking in Introductory Physics. *The Physics Teacher*, 58(4), 247–251. <https://doi.org/10.1119/1.5145470>
- Redish, E. F. (2003). *Teaching Physics with The Physics Suite*. Wiley.
- Sherin, B. L. (2001). How Students Understand Physics Equations. *Cognition and Instruction*, 19(4), 479–541. https://doi.org/10.1207/S1532690XCI1904_3

- Weintrop, D., Beheshti, E., Horn, M., Orton, K., Jona, K., Trouille, L., & Wilensky, U. (2016). Defining Computational Thinking for Mathematics and Science Classrooms. *Journal of Science Education and Technology*, 25(1), 127–147. <https://doi.org/10.1007/s10956-015-9581-5>
- Weintrop, D., & Wilensky, U. (2017). Comparing Block-Based and Text-Based Programming in High School Computer Science Classrooms. *ACM Transactions on Computing Education*, 18(1), 1–25. <https://doi.org/10.1145/3089799>
- Wing, J. M. (2006). Computational Thinking. *Communications of the ACM*, 49(3), 33–35. <https://doi.org/10.1145/1118178.1118215>
- Young, N. T., Allen, G., Aiken, J. M., Henderson, R., & Caballero, M. D. (2019). Identifying Features Predictive of Faculty Integrating Computation into Physics Courses. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 010114. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010114>