

IMPLEMENTASI MEDIA SIMULASI PHET DALAM EKSPLORASI WAKTU PARUH ATOM PENDEKATAN INOVATIF UNTUK PEMAHAMAN RADIOAKTIVITAS

Oleh:

Muhamad Topik¹

Fajar Rizki Adiarta²

Zahrul Basim³

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Alamat: Jl. Raya Palka No.Km.3, Sindangsari, Kec. Pabuaran, Kota Serang, Banten
(42163)

Korespondensi Penulis: mt1248019@gmail.com, pajarrzz141@gmail.com,
zahrulbasim75@gmail.com.

Abstract. *This study presents the implementation of PhET simulation media as an innovative approach to the exploration and understanding of the concept of atomic half-life in the context of radioactivity. Nuclear physics materials are often difficult to understand because the decay process cannot be directly observed. The purpose of this study is to analyze the effectiveness of PhET simulation in providing interactive visualizations needed to compensate for the abstract nature of the material. The method used is an experiment by conducting a virtual lab using PhET simulation to model the radioactive decay process. The results show that PhET simulation is proven to be able to provide an accurate and dynamic representation of exponential decay. The results of specific tests (Carbon-14 and Uranium-238) show high accuracy compared to manual calculations because they use a large sample of ($N_0=1000$ nuclei) However, there is a significant deviation in Custom Atom ($N_0=99$ nuclei), where the simulation results at $n=2$ show 48.5% of the nuclei remaining, far from the theoretical prediction of 25%. This visualization effectively clarifies the definition of half-life, which is the duration required*

IMPLEMENTASI MEDIA SIMULASI PHET DALAM EKSPLORASI WAKTU PARUH ATOM PENDEKATAN INOVATIF UNTUK PEMAHAMAN RADIOAKTIVITAS

for half of the initial number of atoms to decay, thereby strengthening a deep understanding of the basic principles of radioactivity.

Keywords: *PhET Simulation, Atomic Half-Life, Radioactivity.*

Abstrak. Penelitian ini memaparkan implementasi media simulasi PhET sebagai pendekatan inovatif untuk eksplorasi dan pemahaman konsep waktu paruh atom dalam konteks radioaktivitas. Materi fisika nuklir seringkali sulit dipahami karena proses peluruhan tidak dapat diamati langsung. Tujuan dari studi ini adalah menganalisis efektivitas simulasi PhET dalam memberikan visualisasi interaktif yang dibutuhkan untuk mengkompensasi sifat abstrak dari materi tersebut. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan melakukan praktikum virtual menggunakan phet simulation dengan memodelkan proses peluruhan radioaktif. Hasilnya menunjukkan bahwa simulasi PhET terbukti mampu menyajikan representasi akurat dan dinamis dari peluruhan eksponensial. Hasil pengujian spesifik (Karbon-14 dan Uranium-238) menunjukkan akurasi tinggi terhadap perhitungan manual karena menggunakan sampel besar ($N_0 = 1000 \text{ inti}$). Namun, terjadi penyimpangan signifikan pada Atom Kustom ($N_0 = 99 \text{ inti}$), di mana hasil simulasi pada $n = 2$ menunjukkan 48,5% inti tersisa, jauh dari prediksi teoretis 25%. Visualisasi ini secara efektif memperjelas definisi waktu paruh, yaitu durasi yang dibutuhkan agar setengah dari jumlah atom awal meluruh, sehingga memperkuat pemahaman mendalam tentang prinsip-prinsip dasar radioaktivitas.

Kata Kunci: Simulasi PhET, Waktu Paruh Atom, Radioaktivitas.

LATAR BELAKANG

Fenomena radioaktivitas merupakan konsep fundamental dan krusial dalam fisika nuklir, namun sering dianggap abstrak dan sulit divisualisasikan oleh peserta didik. Salah satu konsep sentral dalam radioaktivitas adalah waktu paruh ($T_{1/2}$) yang mendeskripsikan laju peluruhan inti atom tidak stabil. Pemahaman mendalam mengenai konsep ini memerlukan visualisasi yang baik mengenai proses peluruhan stokastik pada tingkat atomik serta hubungan matematis eksponensialnya, seringkali tidak tercapai melalui metode pembelajaran konvensional berbasis ceramah atau hanya perhitungan matematis. Rasional penelitian ini didasarkan pada kebutuhan mendesak untuk menjembatani kesenjangan antara teori abstrak dan representasi visual dalam

pembelajaran fisika nuklir. Media simulasi komputer telah terbukti efektif dalam memvisualisasikan proses yang tidak dapat diamati secara langsung, mendukung konstruksi pengetahuan yang lebih kokoh.

Sejalan dengan hal tersebut, Landasan Teori penelitian ini mengacu pada kerangka pembelajaran berbasis simulasi, di mana representasi dinamis dan interaktif dari model ilmiah dapat meningkatkan pemahaman konkret melalui pendekatan konstruktivisme (Rusnayati & Ariantara, 2024). Studi-studi terdahulu dalam Tinjauan Pustaka menunjukkan bahwa penggunaan simulasi interaktif dapat secara signifikan meningkatkan keterlibatan siswa dan hasil belajar, khususnya dalam topik fisika yang melibatkan perubahan mikroskopis. Secara spesifik mengenai topik inti atom, simulasi telah divalidasi memiliki tingkat akurasi tinggi dalam mereplikasi data peluruhan, menjadikannya solusi praktikum yang relevan dan efisien (MASFARATNA, 2022).

Penelitian ini memanfaatkan Simulasi PhET (*Physics Education Technology*). *PhET Interactive Simulations*, yang dikembangkan oleh *University of Colorado Boulder*, menyediakan lingkungan belajar eksploratif yang memungkinkan peserta didik memanipulasi variabel dan mengamati konsekuensi fisis secara *real-time*, sehingga mendukung pembelajaran aktif dan inkuiri (Arifa Syilfisia Ula dkk, 2025). Model simulasi PhET tentang peluruhan radioaktif menawarkan representasi visual langsung dari atom-atom yang meluruh dan data statistik yang dihasilkan, memungkinkan eksplorasi intuitif terhadap sifat eksponensial dari waktu paruh.

Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini akan melakukan perhitungan manual dan simulasi secara virtual melalui phet simulation yang akan diimplementasikan dengan Pendekatan Inovatif menggunakan Media Simulasi PhET untuk eksplorasi konsep waktu paruh. Data akan dikumpulkan menggunakan instrumen tes diagnostik dan tes pemahaman konsep untuk mengukur perbedaan peningkatan pemahaman konseptual (*Gain Score*) setelah perlakuan. Dengan demikian, Tujuan penelitian ini adalah untuk mengimplementasikan dan menguji efektivitas Media Simulasi PhET dalam pembelajaran topik waktu paruh atom sebagai pendekatan inovatif untuk meningkatkan pemahaman konseptual dan keterampilan eksplorasi peserta didik terhadap radioaktivitas.

IMPLEMENTASI MEDIA SIMULASI PHET DALAM EKSPLORASI WAKTU PARUH ATOM PENDEKATAN INOVATIF UNTUK PEMAHAMAN RADIOAKTIVITAS

KAJIAN TEORITIS

Tinjauan ini menguraikan aneka teori terkait kajian pokok bahasan, serta mengulas penelitian-penelitian terdahulu yang relevan, menjadi landasan dan referensi penelitian ini. Radioaktivitas, konsep krusial dalam fisika nuklir, kerap dianggap rumit bagi siswa karena proses luruh tak kasat mata. Salah satu gagasan pokok radioaktivitas adalah Waktu Paruh ($T_{1/2}$), yang mengukur laju luruh inti atom labil; Waktu paruh adalah durasi agar separuh jumlah atom awal meluruh. Proses ini mematuhi hukum statistik, yakni Hukum Peluruhan Eksponensial, yang dikalkulasi melalui persamaan $N_t = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$. Meski model matematis ini memberi prediksi gamblang (misal, $50\% \rightarrow 25\% \rightarrow 12,5\%$ inti tersisa setiap periode waktu paruh), penting dicatat bahwa peluruhan atom bersifat probabilistik atau acak, sehingga akurasi model ini bergantung pada jumlah sampel yang diteliti.

Urgensi menghubungkan teori-teori abstrak dengan visualisasi dalam pembelajaran fisika mendasari penelitian ini, di mana pemahaman konsep $T_{1/2}$ menuntut visualisasi efektif proses peluruhan stokastik atom. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan Simulasi PhET (Teknologi Pendidikan Fisika) buatan *University of Colorado Boulder*. PhET menyajikan wahana belajar yang memungkinkan siswa telaah variabel dan melihat dampak fisik secara real-time. Model simulasi PhET tentang peluruhan radioaktif beri representasi visual langsung atom yang meluruh serta data statistik yang terbit, yang terbukti sangat jitu dalam visualisasikan proses yang tak teramati langsung dan akurat mereplikasi data tentang peluruhan.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen dan perhitungan manual, yaitu dengan melakukan praktikum virtual menggunakan PhET Simulation. Adapun eksperimen yang dilakukan adalah pada praktikum virtual waktu paruh. Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebuah laptop dan jaringan internet untuk mengakses laboratorium virtual PhET Simulation.

Pada penelitian ini menggunakan 2 jenis isotop yaitu Karbon-14 Uranium-238 dan Atom kustom. Kedua isotop dan atom kustom tersebut kemudian dianalisis menggunakan PhET Simulation untuk mengetahui tingkat peluruhan isotop pada waktu

paruh pertama, waktu paruh kedua, dan waktu paruh ketiga. Setelah data percobaan diperoleh, kemudian dibandingkan dengan persamaan matematis sehingga dapat diketahui tingkat ketelitian percobaan menggunakan PhET Simulation. Penelitian ini dilakukan dengan cara menghubungkan laptop dengan jaringan internet untuk membuka program laboratorium virtual PhET Simulation. Kemudian memilih simulasi “Penentuan Umur Radioaktif” yaitu pada topik “Tingkat Peluruhan”.

Untuk percobaan pertama menggunakan isotop Karbon-14 dan untuk percobaan kedua menggunakan isotop Uranium-238 dan percobaan ketiga menggunakan Atom kustom. Kemudian mengatur inti hingga berjumlah 1000 inti. Setelah simulasi dijalankan maka akan diperoleh data tingkat peluruhan isotop pada waktu paruh pertama, waktu paruh kedua, dan waktu paruh ketiga, beserta dengan jumlah inti yang tersisa dalam peluruhan. Jumlah inti yang tersisa ini kemudian dianalisis untuk mengetahui hubungan antara waktu paruh dengan jumlah inti yang tersisa dalam peluruhan.

Untuk menentukan persentase tingkat peluruhan isotop menggunakan rumus seperti Jumlah Inti Induk Tersisa dan Persentase inti induk tersisa

$$N_t = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

yang di mana :

N_t = Jumlah inti tersisa

N_0 = Jumlah inti mula-mula

n =Jumlah waktu paruh yang telah berlalu, dihitung sebagai:

$$n = \frac{t}{T_{1/2}}$$

t = Waktu peluruhan

$T_{1/2}$ = Waktu paruh

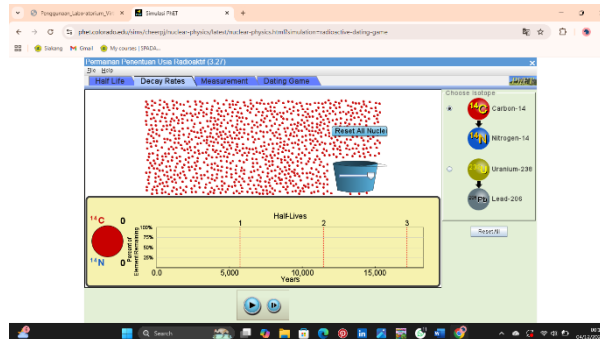
Persentase Inti Tersisa = $\left(\frac{1}{2}\right)^n \times 100\%$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

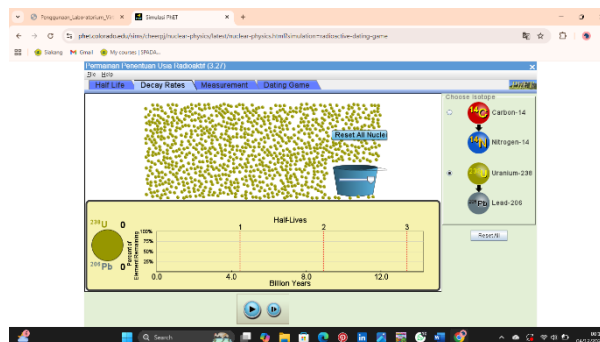
Pada penelitian ini menggunakan 2 jenis isotop yaitu Karbon-14 dan Uranium-238 dan 1 atom kustom dimana awalnya masing-masing isotop memiliki jumlah inti sebanyak 1000 inti. Pada Gambar 1 terlihat bahwa sebelum meluruh seluruh inti Karbon-14 berwarna merah sementara dari Gambar 2 terlihat bahwa mula-mula sebelum meluruh

IMPLEMENTASI MEDIA SIMULASI PHET DALAM EKSPLORASI WAKTU PARUH ATOM PENDEKATAN INOVATIF UNTUK PEMAHAMAN RADIOAKTIVITAS

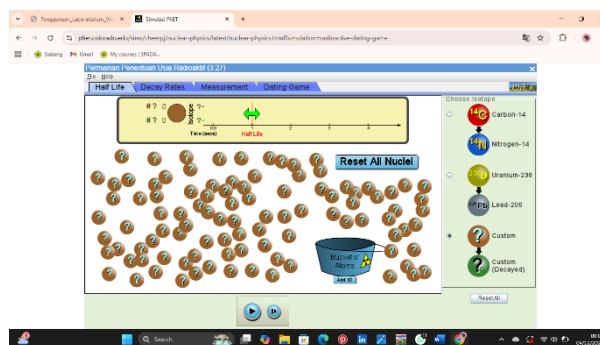
seluruh inti Uranium-238 berwarna hijau, Sama halnya dengan atom kustom sebelum meluruh atom kustom berwarna coklat.



Gambar 1. Jumlah inti mula-mula Karbon-14

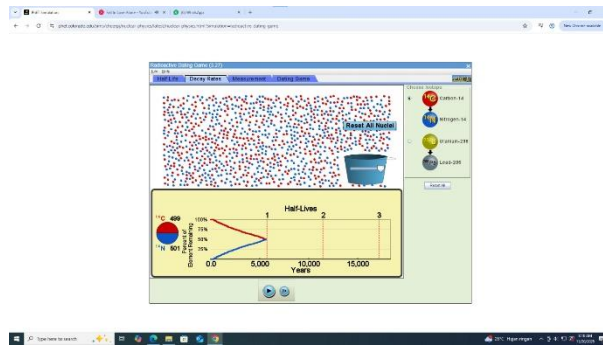


Gambar 2. Jumlah inti mula-mula Uranium-238



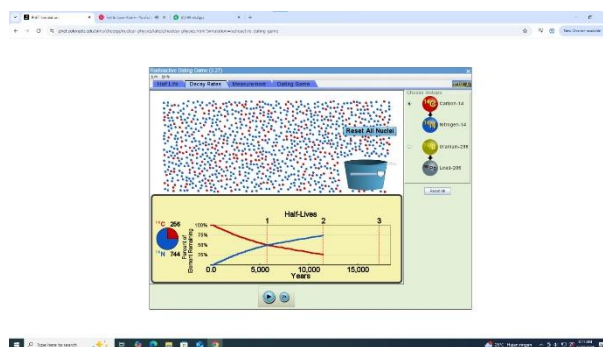
Gambar 3. Jumlah inti mula-mula atom kustom

Pada percobaan menggunakan Karbon-14, analisis tingkat peluruhan pada waktu paruh pertama dengan menggunakan *PhET Simulation* seperti ditampilkan pada Gambar 4.



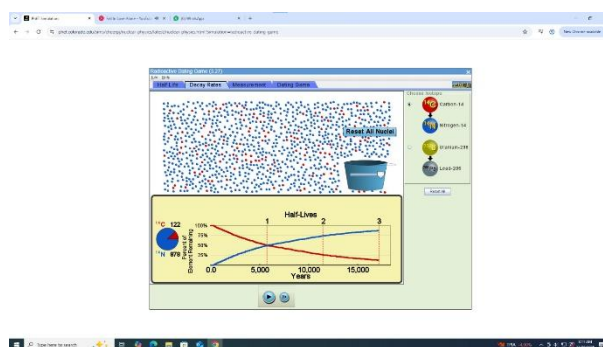
Gambar 4. Tingkat peluruhan Karbon-14 pada waktu paruh pertama.

Kemudian analisis tingkat peluruhan Karbon-14 pada waktu paruh kedua dengan menggunakan *PhET Simulation* seperti ditampilkan pada gambar 5.



Gambar 5. Tingkat peluruhan Karbon-14 pada waktu paruh kedua.

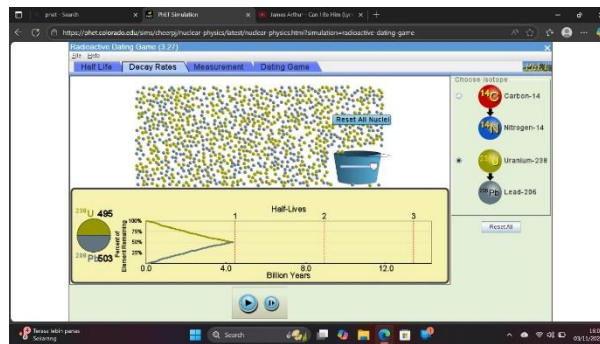
Kemudian analisis tingkat peluruhan Karbon-14 pada waktu paruh ketiga dengan menggunakan *PhET Simulation* seperti ditampilkan pada gambar 6.



Gambar 6. Tingkat peluruhan Karbon-14 pada waktu paruh ketiga.

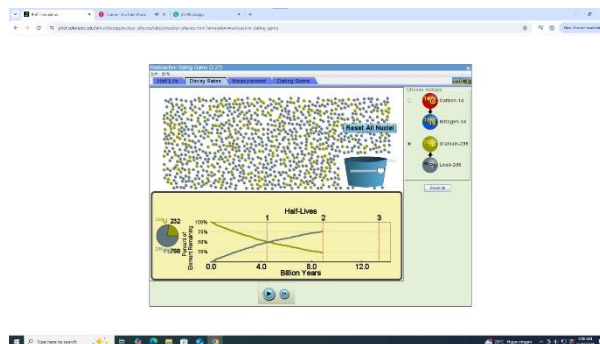
IMPLEMENTASI MEDIA SIMULASI PHET DALAM EKSPLORASI WAKTU PARUH ATOM PENDEKATAN INOVATIF UNTUK PEMAHAMAN RADIOAKTIVITAS

Pada percobaan menggunakan Uranium-238, analisis tingkat peluruhan pada waktu paruh pertama dengan menggunakan *PhET Simulation* seperti ditampilkan pada Gambar 7.



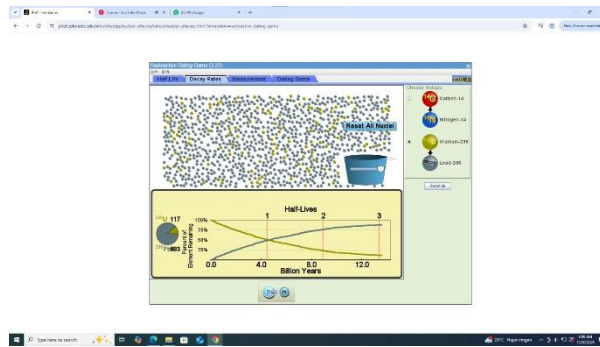
Gambar 7. Tingkat peluruhan uranium-238 pada waktu paruh pertama.

Kemudian analisis tingkat peluruhan Uranium-238 pada waktu paruh kedua dengan menggunakan PhET Simulation seperti ditampilkan pada Gambar 8.



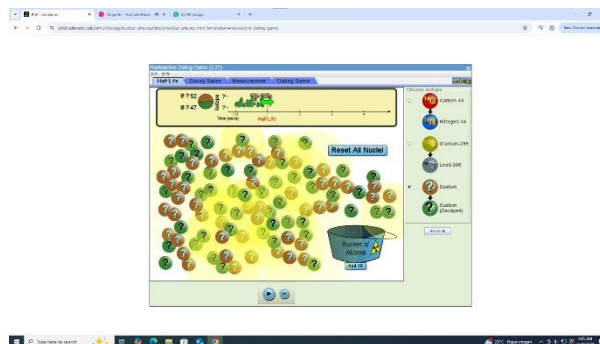
Gambar 8. Tingkat peluruhan Uranium-238 pada waktu paruh kedua.

Sementara untuk analisis tingkat peluruhan Uranium-238 menjadi Timah-206 pada waktu paruh ketiga dengan menggunakan PhET Simulation seperti ditampilkan pada Gambar 9.



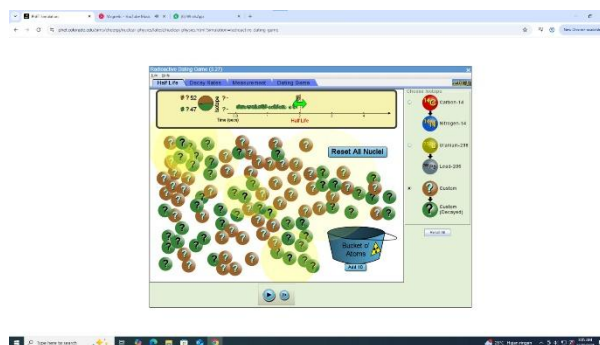
Gambar 9. Tingkat peluruhan Uranium-238 pada waktu paruh ketiga.

Pada percobaan menggunakan atom kustom, analisis tingkat peluruhan pada waktu paruh pertama dengan menggunakan *PhET Simulation* seperti ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Tingkat peluruhan atom kustom pada waktu paruh pertama.

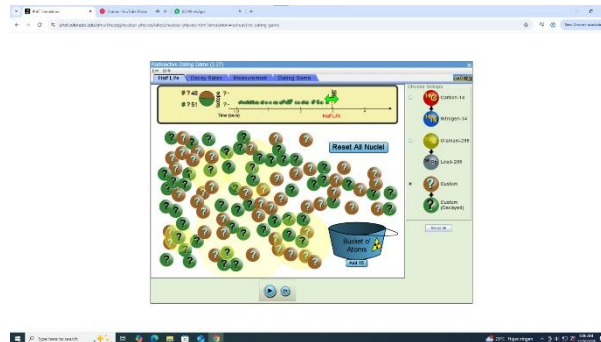
Kemudian analisis tingkat peluruhan atom kustom pada waktu paruh kedua dengan menggunakan *PhET Simulation* seperti ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Tingkat peluruhan atom kustom pada waktu kedua.

IMPLEMENTASI MEDIA SIMULASI PHET DALAM EKSPLORASI WAKTU PARUH ATOM PENDEKATAN INOVATIF UNTUK PEMAHAMAN RADIOAKTIVITAS

Sementara untuk analisis tingkat peluruhan atom kustom pada waktu paruh ketiga dengan menggunakan PhET Simulation seperti ditampilkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Tingkat peluruhan atom kustom pada waktu ketiga.

Setelah dianalisis menggunakan laboratorium virtual *PhET Simulation*, maka Langkah selanjutnya melakukan perhitungan manual data praktikum yang diperoleh seperti ditampilkan oleh atom karbon-14, Uranium-238 dan atom kustom. Perhitungan ini menampilkan langkah-langkah untuk mendapatkan jumlah inti atom tersisa (N_t) dan persentase tersisa setelah setiap waktu paruh.

1. Atom Karbon-14 (^{14}C)

Waktu Berlalu (t): 5.730 tahun

$$\text{Persentase Tersisa: } \left(\frac{1}{2}\right)^1 \times 100 = 50\%$$

$$\text{jumlah Atom Tersisa } (N_t): 1000 \times \left(\frac{1}{2}\right)^1 = 500 \text{ inti } ^{14}\text{C}$$

$n = 2$ Waktu Paruh

Waktu Berlalu (t): 11.460 tahun

$$\text{Persentase Tersisa: } \left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 100\% = 25\% \text{ Jumlah Atom Tersisa } (N_t): 1000 \times \frac{1}{4} = 250 \text{ inti } ^{14}\text{C}$$

$n = 3$ Waktu Paruh

Waktu Berlalu (t): 17.190 tahun

$$\text{Persentase Tersisa } \left(\frac{1}{2}\right)^3 \times 100\% = 12,5\% \text{ Jumlah Atom Tersisa } (N_t): 1000 \times \frac{1}{8} = 125 \text{ inti } ^{14}\text{C}$$

2. Atom Uranium-238 (238-U)

Parameter: $T_{1/2} = 4.47$ miliar tahun $N_0 = 1000$ inti

$n = 1$ Waktu Paruh

Waktu Berlalu (t): 4.47 miliar tahun

Persentase Tersisa: $\left(\frac{1}{2}\right)^1 \times 100\% = 50\%$

Jumlah Atom Tersisa (Nt): $1000 \times \frac{1}{2} = 500$ inti 238U

$n = 2$ Waktu Paruh

Waktu Berlalu (t): 8.94 miliar tahun

Persentase Tersisa: $\left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 100\% = 25\%$

Jumlah Atom Tersisa (Nt): $1000 \times \frac{1}{4} = 250$ inti 238U

$n = 3$ Waktu Paruh

Waktu Berlalu (t): 13.41 miliar tahun

Persentase Tersisa: $\left(\frac{1}{2}\right)^3 \times 100\% = 12,5\%$

Jumlah Atom Tersisa (Nt): $1000 \times \frac{1}{8} = 125$ inti 238U

3. Atom Kustom (Custom)

Parameter: $T_{1/2} = 1.0$ detik $N_0 = 99$ inti (Total inti: 52 + 47)

$n = 1$ Waktu Paruh

Waktu Berlalu (t): 1.0 detik

Persentase Tersisa: $\left(\frac{1}{2}\right)^1 \times 100\% = 50\%$

Jumlah Atom Tersisa (Nt): $99 \times \frac{1}{2} = 49,5$ inti

$n = 2$ Waktu Paruh

Waktu Berlalu (t): 2.0 detik

Persentase Tersisa: $\left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 100\% = 25\%$

Jumlah Atom Tersisa (Nt): $99 \times \frac{1}{4} = 24,75$ inti

$n = 3$ Waktu Paruh

Waktu Berlalu (t): 3.0 detik

IMPLEMENTASI MEDIA SIMULASI PHET DALAM EKSPLORASI WAKTU PARUH ATOM PENDEKATAN INOVATIF UNTUK PEMAHAMAN RADIOAKTIVITAS

Persentase Tersisa: $\left(\frac{1}{2}\right)^3 \times 100\% = 12,5\%$

Jumlah Atom Tersisa (Nt): $99 \times \frac{1}{8} = 12,375$ inti

Setelah menyelesaikan tahapan analisis data menggunakan Laboratorium Virtual PhET Simulation dan perhitungan manual, langkah berikutnya adalah membandingkan hasil kedua tahapan analisis data tersebut.

1. Karbon-14

Parameter: $T_{1/2} = 5.730$ tahun — $N_0 = 1000$ inti

Tabel 1. Perbandingan Hasil Hitung Manual dan Simulasi PhET Karbon-14

n	Waktu berlalu	Hasil Manual	Hasil Simulasi PhET	Selisih ($N_m - N_s$)
1	5.730	500	499	1
2	11.460	250	256	-6
3	17.190	125	122	3

2. Uranium-238

Parameter: $T_{1/2} = 4.47$ miliar tahun — $N_0 = 1000$ inti

Tabel 2. Perbandingan Hasil Hitung Manual dan Simulasi PhET Uranium-238

n	Waktu berlalu	Hasil Manual	Hasil Simulasi PhET	Selisih ($N_m - N_s$)
1	4.47	500	495	1
2	8.94	250	232	18
3	13.41	125	117	8

3. Atom Kustom

Parameter: $T_{1/2} = 1.0$ detik — $N_0 = 99$ inti

Tabel 3. Perbandingan Hasil Hitung Manual dan Simulasi PhET Atom Kustom

n	Waktu berlalu	Hasil Manual	Hasil Simulasi PhET	Selisih ($N_m - N_s$)
---	------------------	-----------------	---------------------------	----------------------------

1	1,0	49,5	-	-
2	2,0	24,75	48	-23,2
3	3,0	12,375	-	-

Hasil simulasi PhET untuk Karbon-14 menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi terhadap prediksi manual. Pada waktu paruh ke-2 ($n = 2$), meskipun terdapat sedikit penyimpangan (-6 inti), persentase inti tersisa (25,6%) sangat mendekati nilai teoritis 25%. Konsistensi ini membuktikan bahwa hukum peluruhan eksponensial sangat valid dan dapat diandalkan untuk memprediksi perilaku ($N_0 = 1000$ inti).

Data Uranium-238 juga mendukung kuat model teoretis, meskipun menunjukkan variasi yang sedikit lebih besar dibandingkan Karbon-14, terutama pada $n = 2$ dengan selisih 18 inti. Persentase simulasi Uranium-238 (23,2% pada $n = 2$ mendekati 25% teoritis, mengonfirmasi bahwa peluruhan inti atom dalam jumlah besar secara statistik hampir pasti mengikuti pola eksponensial. Keakuratan ini membuktikan efektivitas metode penanggalan geologis menggunakan isotop yang memiliki waktu paruh ekstrem

Perbandingan Atom Kustom menunjukkan penyimpangan yang signifikan dari model teoretis. Pada waktu paruh ke-2 ($n = 2$), inti yang tersisa di simulasi adalah 48 inti, jauh dari prediksi manual 24,75 inti. Persentase inti tersisa di simulasi mencapai 48,5%, padahal model eksponensial memprediksi 25%. Penyimpangan ekstrem ini disebabkan oleh faktor probabilistik yang dominan ketika jumlah sampel atom sangat kecil ($N_0 = 99$), menunjukkan bahwa hukum peluruhan eksponensial merupakan hukum statistik yang kurang akurat untuk memprediksi perilaku sejumlah kecil inti.

KESIMPULAN DAN SARAN

Eksplorasi waktu paruh atom melalui simulasi PhET memberikan validasi empiris yang kuat terhadap hukum peluruhan radioaktif secara teoretis. Proyek ini membandingkan data peluruhan dua isotop Karbon-14, Uranium-238, dan satu Atom Kustom dengan hasil perhitungan manual menggunakan model **eksponensial** $N_t =$

IMPLEMENTASI MEDIA SIMULASI PHET DALAM EKSPLORASI WAKTU PARUH ATOM PENDEKATAN INOVATIF UNTUK PEMAHAMAN RADIOAKTIVITAS

$N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$. Simpulan dari penelitian ini menegaskan bahwa perilaku peluruhan suatu inti atom sangat bergantung pada skala sampel yang diamati.

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa untuk sampel atom dalam jumlah besar ($N_0 = 1000$ inti) seperti pada Karbon-14 dan Uranium-238, hasil simulasi PhET memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi (penyimpangan kecil, hanya 1 hingga 18 inti) terhadap perhitungan manual. Hal ini membuktikan bahwa hukum peluruhan radioaktif yang menyatakan bahwa setiap inti akan meluruh hingga $1/2$, $1/4$, dan $1/8$ dari jumlah awal pada setiap interval waktu paruh berlaku secara konsisten dan dapat diandalkan untuk populasi atom dalam skala geologis atau skala besar.

Sebaliknya, pada sampel atom dalam jumlah sangat kecil, seperti pada Atom Kustom ($N_0 = 99$ inti), ditemukan penyimpangan yang ekstrem dan signifikan (mencapai $-23,25$ inti pada $n = 2$ dari nilai teoretis $24,75$ inti). Penyimpangan ini merupakan jawaban kunci atas pertanyaan penelitian: semakin kecil sampel atom, semakin besar pengaruh sifat probabilistik atau keacakan peluruhan inti tunggal, sehingga hasil simulasi PhET menyimpang jauh dari prediksi teoretis. Oleh karena itu, hukum peluruhan eksponensial lebih akurat digunakan untuk memprediksi perilaku populasi atom dalam jumlah besar daripada untuk inti atom individual.

Berdasarkan temuan tersebut, diajukan beberapa saran praktis yang mengacu pada hasil penelitian:

1. Untuk Guru dan Pendidik Sains: Disarankan untuk menggunakan modul Atom Kustom dalam simulasi PhET secara spesifik untuk mendemonstrasikan konsep keacakan (probabilitas) dalam fisika inti. Ini akan membantu siswa membedakan antara hukum peluruhan yang pasti berlaku pada skala besar (seperti Uranium dan Karbon) dan perilaku acak yang diamati pada inti atom individual.
2. Untuk Pengembang Kurikulum: Disarankan untuk mengintegrasikan alat simulasi *online* (seperti PhET) sebagai media pembelajaran wajib dalam materi fisika inti. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan pemahaman visual siswa terhadap konsep abstrak waktu paruh dan peluruhan eksponensial yang tidak dapat diamati langsung di laboratorium sekolah.
3. Untuk Mahasiswa dan Peneliti Pemula: Disarankan untuk selalu mencantumkan dan membahas faktor ukuran sampel (N_0) ketika melakukan eksperimen atau simulasi

terkait peluruhan radioaktif. Hal ini berguna untuk mengidentifikasi batas akurasi model matematika teoritis yang digunakan dan menjelaskan mengapa data eksperimen mungkin menyimpang dari nilai yang diprediksi.

Dengan demikian, proyek ini tidak hanya mengonfirmasi validitas model matematika fisika inti, tetapi juga menyoroti peran penting simulasi sebagai alat eksplorasi yang efektif dalam memahami perbedaan fundamental antara perilaku kolektif dan perilaku individu di dunia kuantum.

DAFTAR REFERENSI

- Arifa Syilfisya Ula dkk, 2025. (2025). Efektivitas penggunaan simulasi interaktif dalam pembelajaran fisika untuk meningkatkan pemahaman konsep siswa SMA. *Jurnal Penelitian Pembelajaran Fisika*, 2, 65–72.
- L, P. P. R. I. I. (2019). PENERAPAN LABORATORIUM VIRTUAL ELEKTROFORESIS GEL DAN POLIMERASE CHAIN REACTION (PCR) SEBAGAI. 09(1), 48–64.
- Marpaung, R. R., Aziz, N. R. N., Purwanti, M. D., Sasti, P. N., & Saraswati, D. L. (2021). Penggunaan Laboratorium Virtual Phet Simulation Sebagai Solusi Praktikum Waktu Paruh. *Journal of Teaching and Learning Physics*, 6(2), 110–118. <https://doi.org/10.15575/jotalp.v6i2.12213>
- MASFARATNA, M. (2022). Penggunaan Media Phet Simulation Untuk Menentukan Waktu Paruh Suatu Atom. *SCIENCE : Jurnal Inovasi Pendidikan Matematika Dan IPA*, 2(3), 277–286. <https://doi.org/10.51878/science.v2i3.1481>
- Mirdayanti, R. (2017). KAJIAN PENGGUNAAN LABORATORIUM VIRTUAL BERBASIS SIMULASI SEBAGAI UPAYA MENGATASI KETIDAK-SEDIAAN LABORATORIUM Rina Mirdayanti dan Murni. 8.
- Rachma, A. J., Putri, D. A., Ulfah, M., & Saraswati, D. L. (n.d.). Jurnal Pendidikan Fisika Universitas Muhammadiyah Makassar Determining the Half Time and Analogy Constants of Radioactive Decay on the Illustration Board of Radioactive Decay with the Capacitor Filling and Discharging Method Menentukan Waktu Paruh dan Konstanta Analogi Peluruhan Radioaktif pada Illustration Board of Radioactive Decay dengan Metode Pengisian dan Pengosongan Kapasitor. 7, 306–316.

**IMPLEMENTASI MEDIA SIMULASI PHET DALAM
EKSPLORASI WAKTU PARUH ATOM PENDEKATAN INOVATIF
UNTUK PEMAHAMAN RADIOAKTIVITAS**

Rusnayati, H., & Ariantera, R. G. (2024). Efektivitas Simulasi Virtual PhET dalam Pembelajaran Fisika Zat Padat untuk Meningkatkan Pemahaman Konsep Calon Guru Fisika. *U-Teach: Journal Education of Young Physics Teacher*, 5(1), 71–79. <https://doi.org/10.30599/uteach.v5i1.841>