Mengajarkan Pemodelan Energi Nuklir Melalui Metode Euler dan Runge-Kutta Sebagai Pendekatan Berbasis Computational Thinking

Sabrina Soraya Anisa[1]*, Risma Nurul Azizah[2], Andini Nurul Fadilah[3], Salsabila Naira Putri[4]
[1]*Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Indonesia*
[2]*Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Indonesia*
[3]*Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Indonesia*
[4]*Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Indonesia*

ABSTRAK
Kemajuan teknologi komputasi telah memberikan kontribusi besar dalam pengembangan ilmu fisika, khususnya dalam pemodelan sistem yang kompleks seperti pembangkitan listrik tenaga nuklir. Produksi listrik pada pembangkit nuklir sangat dipengaruhi oleh jumlah reaktor aktif dan dinamika proses reaksi fisi di dalamnya. Pemodelan dinamika produksi listrik ini dilakukan dengan pendekatan numerik menggunakan metode Euler dan Runge-Kutta, yang mampu menyelesaikan persoalan diferensial non linier secara efisien. Dalam studi ini, kedua metode digunakan untuk menganalisis perubahan energi listrik terhadap waktu berdasarkan perubahan jumlah reaktor aktif. Hasil pemodelan menunjukkan perbedaan tingkat akurasi antara kedua metode, di mana metode Runge-Kutta memberikan hasil yang lebih stabil dan mendekati solusi eksak dibandingkan metode Euler. Kegiatan ini bertujuan untuk melatih kemampuan.

ABSTRACT
The advancement of computational technology has significantly contributed to the development of physics, particularly in modeling complex systems such as nuclear power generation. Electricity production in nuclear power plants is highly influenced by the number of active reactors and the dynamic behavior of the fissionprocess. In this study, the dynamics of electricity production are modeled using numerical approaches, specifically the Euler and Runge-Kutta methods, which are effective in solving nonlinear differential equations. Both methods are applied to analyze changes in electrical energy over time in relation to variations in the number of operating reactors. The modeling results indicate a difference in accuracy between the two methods, with the Runge-Kutta method yielding more stable and precise results compared to the Euler method. This activity aims to enhance students' skills in applying computational methods to quantitatively and systematically understand the dynamics of nuclear energy systems.

KONTAK
sabrina.soraya.anisa@mhs.unj.ac.id

KATA KUNCI
Dynamic Modeling, Euler Method, Nuclear Power Generation

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik dunia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, dan kemajuan teknologi. Disisi lain, penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama menimbulkan berbagai permasalahan, seperti meningkatnya emisi gas rumah kaca, perubahan iklim, serta menipisnya cadangan energi tak terbarukan. Kondisi tersebut mendorong banyak negara untuk mengembangkan sumber energi alternatif yang lebih bersih, efisien, dan berkelanjutan. Salah satu sumber energi yang memiliki potensi besar dalam mendukung transisi energi adalah energi nuklir karena mampu menghasilkan listrik dalam jumlah besar secara kontinu dengan emisi karbon yang relatif rendah.

Menurut World Nuclear Association (2023), lebih dari 10% kebutuhan listrik dunia dipenuhi oleh pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Negara-negara seperti Amerika Serikat, Prancis, Tiongkok, Rusia, dan Korea Selatan menjadikan energi nuklir sebagai bagian penting dalam bauran energi nasional. Sementara itu, beberapa negara berkembang, termasuk Indonesia, mulai mempertimbangkan pemanfaatan PLTN sebagai salah satu alternatif untuk memenuhi kebutuhan energi jangka panjang dan mendukung target pengurangan emisi karbon.

Produksi listrik tenaga nuklir dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya adalah jumlah reaktor yang beroperasi. Penambahan maupun penghentian operasi reaktor akan memengaruhi kapasitas produksi listrik secara langsung. Oleh karena itu, diperlukan suatu model matematis yang mampu menggambarkan hubungan antara jumlah reaktor dengan energi listrik yang dihasilkan sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan sistem energi di masa mendatang. Pemodelan dinamika sistem energi umumnya dilakukan menggunakan persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*). Namun, penyelesaian analitik terhadap persamaan tersebut seringkali sulit dilakukan karena karakteristik sistem yang kompleks dan bersifat nonlinier. Oleh sebab itu, metode numerik menjadi alternatif yang efektif untuk memperoleh solusi pendekatan. Dua metode numerik yang banyak digunakan adalah metode Euler dan metode Runge-Kutta. Metode Euler memiliki algoritma yang sederhana dan mudah diimplementasikan, tetapi akurasinya relatif rendah karena galat akan terakumulasi pada setiap langkah iterasi. Sebaliknya, metode Runge-Kutta, khususnya orde empat (RK4), mampu menghasilkan solusi yang lebih stabil dan memiliki tingkat akurasi yang tinggi sehingga banyak digunakan dalam berbagai pemodelan sistem dinamis.

Selain sebagai pendekatan matematis, penggunaan metode numerik juga mendukung penerapan **computational thinking** dalam pembelajaran fisika. Melalui proses pemodelan, analisis data, dan simulasi numerik, mahasiswa dapat mengembangkan kemampuan berpikir logis, analitis, serta pemecahan masalah berbasis komputasi. Pendekatan ini sejalan dengan arah pengembangan pendidikan sains pada era Revolusi Industri 4.0 yang menekankan integrasi antara konsep fisika, matematika, dan teknologi komputasi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan memodelkan hubungan antara jumlah reaktor nuklir yang beroperasi dengan produksi energi listrik menggunakan metode Euler dan Runge-Kutta serta membandingkan tingkat akurasi kedua metode dalam menyelesaikan model numerik. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai metode numerik yang paling sesuai untuk pemodelan sistem energi nuklir sekaligus menjadi contoh implementasi *computational thinking* dalam pembelajaran fisika komputasi.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif berbasis simulasi numerik yang bertujuan memodelkan hubungan antara jumlah reaktor nuklir yang beroperasi dengan produksi energi listrik menggunakan metode Euler dan Runge-Kutta. Penelitian dilakukan melalui pendekatan computational thinking dengan memanfaatkan metode numerik untuk menyelesaikan persamaan diferensial yang merepresentasikan dinamika produksi listrik tenaga nuklir.

Data Penelitian

Data yang digunakan merupakan data sekunder mengenai jumlah reaktor nuklir yang beroperasi dan produksi listrik tenaga nuklir dunia tahun 2022. Data diperoleh dari publikasi resmi **World Nuclear Association (WNA)** dan **International Atomic Energy Agency (IAEA)** yang memuat statistik perkembangan pembangkit listrik tenaga nuklir di berbagai negara. Data tersebut digunakan sebagai dasar penyusunan model matematis dan proses simulasi numerik.

Variabel yang digunakan dalam penelitian meliputi:

- x: jumlah reaktor nuklir yang beroperasi
- y: produksi energi listrik tenaga nuklir (TWh)

Hubungan antara kedua variabel dimodelkan dalam bentuk persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*/*ODE*) sehingga dapat dianalisis menggunakan metode numerik.

Model Matematika

Model matematis yang digunakan dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial orde satu sebagai berikut.

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

Persamaan tersebut menggambarkan perubahan produksi energi listrik terhadap perubahan jumlah reaktor yang beroperasi. Karena solusi analitik tidak selalu dapat diperoleh secara langsung, penyelesaian dilakukan menggunakan pendekatan numerik.

Metode Euler

Metode Euler merupakan metode numerik orde pertama yang digunakan untuk memperoleh solusi pendekatan suatu persamaan diferensial melalui proses iterasi. Nilai solusi pada langkah berikutnya dihitung berdasarkan nilai solusi sebelumnya dan kemiringan fungsi pada titik awal interval. Persamaan metode Euler dituliskan sebagai berikut.

$$y_{i+1} = y_i + h\, f(x_i, y_i)$$

dengan:

- h= ukuran langkah (*step size*)
- xi= titik ke-i
- yi= nilai solusi pada titik ke-i

Metode Euler dipilih karena memiliki algoritma yang sederhana dan mudah diimplementasikan, meskipun tingkat akurasinya dipengaruhi oleh besar kecilnya ukuran langkah yang digunakan.

Metode Runge-Kutta

Metode Runge-Kutta merupakan pengembangan metode Euler yang memiliki tingkat ketelitian lebih tinggi karena memanfaatkan beberapa estimasi gradien dalam satu langkah perhitungan. Dalam penelitian ini digunakan metode Runge-Kutta orde pertama hingga orde keempat untuk membandingkan tingkat akurasi masing-masing metode. Persamaan Runge-Kutta orde empat (RK4) dinyatakan sebagai berikut.

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$
$$k_2 = f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}k_1\right)$$
$$k_3 = f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}k_2\right)$$
$$k_4 = f(x_i + h, y_i + hk_3)$$

Selanjutnya nilai solusi dihitung menggunakan persamaan

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Metode RK4 dipilih karena mampu menghasilkan solusi numerik yang lebih stabil dan memiliki galat yang lebih kecil dibandingkan metode Euler.

Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan sebagai berikut.

1. Mengumpulkan data jumlah reaktor nuklir dan produksi listrik tenaga nuklir tahun 2022.
2. Menyusun model matematis dalam bentuk persamaan diferensial.
3. Menentukan parameter simulasi dan ukuran langkah (*step size*).
4. Menyelesaikan model menggunakan metode Euler serta metode Runge-Kutta orde 1, orde 2, orde 3, dan orde 4.
5. Membandingkan hasil simulasi berdasarkan tingkat akurasi, kestabilan solusi, dan besar galat numerik.
6. Menginterpretasikan hasil simulasi sebagai bentuk implementasi computational thinking dalam pembelajaran fisika komputasi.

Perangkat Lunak

Seluruh proses simulasi numerik dilakukan menggunakan bahasa pemrograman **Python** pada platform **Google Collaboratory**. Perhitungan numerik memanfaatkan pustaka **NumPy**, sedangkan visualisasi hasil simulasi dilakukan menggunakan **Matplotlib**. Penggunaan perangkat lunak tersebut memudahkan proses komputasi, visualisasi data, serta analisis perbandingan antar metode numerik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

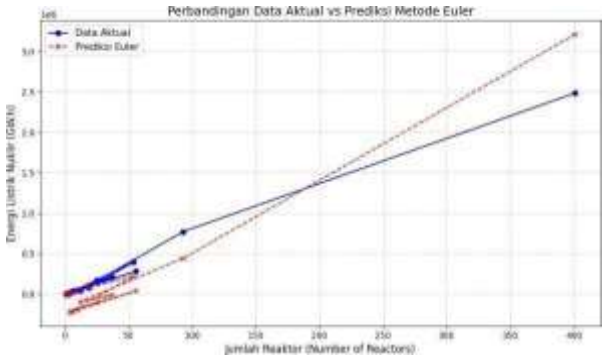
Analisis Data Produksi Energi Listrik Nuklir

Penelitian ini menggunakan data jumlah reaktor nuklir yang beroperasi dan produksi energi listrik tenaga nuklir dunia tahun 2022 sebagai dasar penyusunan model numerik. Data tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah reaktor secara umum diikuti oleh peningkatan produksi energi listrik. Namun, hubungan antara kedua variabel tersebut tidak sepenuhnya bersifat linear karena dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kapasitas masing-masing reaktor, efisiensi operasional, umur reaktor, jadwal pemeliharaan, serta kebijakan energi pada setiap negara.

Berdasarkan karakteristik tersebut, hubungan antara jumlah reaktor dan produksi listrik dimodelkan menggunakan persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation/ODE*). Pendekatan ini memungkinkan perubahan produksi listrik dianalisis sebagai fungsi dari perubahan jumlah reaktor yang beroperasi. Model kemudian diselesaikan menggunakan metode Euler dan metode Runge-Kutta sehingga dapat dibandingkan tingkat akurasi serta kestabilan masing-masing metode.

Hasil Simulasi Menggunakan Metode Euler

Metode Euler digunakan sebagai metode numerik dasar untuk menyelesaikan model persamaan diferensial. Perhitungan dilakukan secara iteratif dengan memanfaatkan nilai gradien pada setiap titik sebagai dasar penentuan nilai solusi berikutnya.



Gambar 1. Grafik Metode Euler

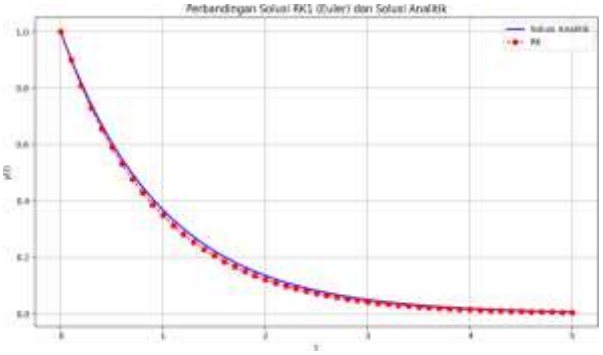
Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode Euler mampu mengikuti pola umum perubahan produksi listrik terhadap jumlah reaktor. Namun demikian, terdapat penyimpangan nilai yang semakin besar seiring bertambahnya jumlah iterasi. Akumulasi galat ini menyebabkan hasil simulasi mulai menjauh dari nilai referensi, terutama pada interval dengan perubahan data yang cukup besar.

Fenomena tersebut terjadi karena metode Euler hanya menggunakan satu pendekatan gradien pada setiap langkah perhitungan. Akibatnya, ketelitian metode sangat bergantung pada ukuran langkah (*step size*). Semakin besar ukuran langkah yang digunakan, semakin besar pula galat numerik yang dihasilkan. Oleh karena itu, metode Euler lebih sesuai digunakan untuk permasalahan sederhana atau sebagai pendekatan awal dalam penyelesaian persamaan diferensial.

Hasil Simulasi Menggunakan Metode Runge-Kutta

Untuk meningkatkan akurasi penyelesaian numerik, penelitian ini menerapkan metode Runge-Kutta mulai dari orde pertama hingga orde keempat. Berbeda dengan metode Euler, metode Runge-Kutta memanfaatkan beberapa estimasi gradien dalam satu langkah perhitungan sehingga mampu menghasilkan solusi yang lebih stabil.

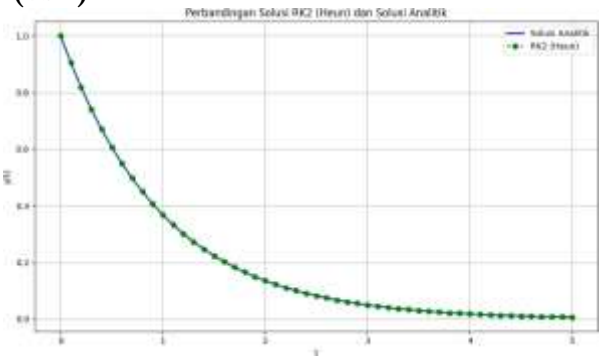
a. Runge-Kutta Orde 1 (RK1)



Gambar 2. Grafik Metode Runge-Kutta 1

Hasil RK1 menunjukkan pola yang hampir sama dengan metode Euler karena secara matematis RK1 merupakan bentuk lain dari metode Euler. Meskipun demikian, implementasi RK1 memberikan penyajian algoritma yang lebih sistematis sehingga memudahkan pengembangan menuju orde yang lebih tinggi.

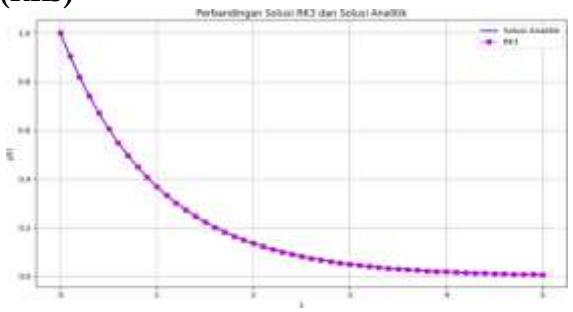
b. Runge-Kutta Orde 2 (RK2)



Gambar 3. Grafik Metode Runge-Kutta 2

Pada metode RK2, hasil simulasi mulai menunjukkan peningkatan akurasi dibandingkan metode Euler. Hal ini disebabkan oleh penggunaan dua estimasi gradien dalam setiap langkah sehingga nilai pendekatan lebih mendekati solusi sebenarnya. Penyimpangan hasil simulasi menjadi lebih kecil, terutama pada bagian kurva yang mengalami perubahan cukup signifikan.

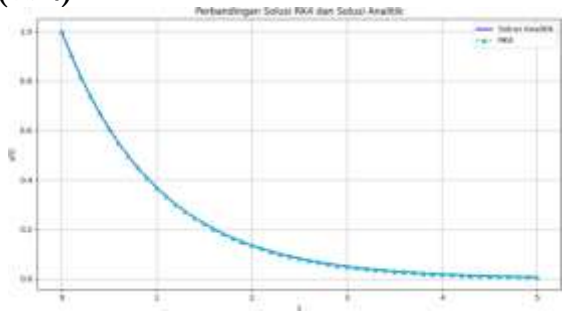
c. Runge-Kutta Orde 3 (RK3)



Gambar 4. Grafik Metode Runge-Kutta 3

Metode RK3 menghasilkan solusi numerik yang lebih stabil dibandingkan RK2. Penambahan jumlah evaluasi gradien memungkinkan proses aproksimasi dilakukan dengan lebih teliti sehingga fluktuasi galat numerik dapat dikurangi. Grafik hasil simulasi menunjukkan pola yang hampir sama dengan data referensi, sehingga metode ini dapat digunakan sebagai alternatif untuk memperoleh keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi.

d. Runge-Kutta Orde 4 (RK4)



Gambar 5. Grafik Metode Runge-Kutta 4

Metode RK4 memberikan hasil terbaik di antara seluruh metode yang digunakan dalam penelitian ini. Kurva hasil simulasi hampir berimpit dengan data referensi sehingga menunjukkan tingkat ketelitian yang sangat tinggi. Penggunaan empat estimasi gradien dalam setiap iterasi memungkinkan proses aproksimasi dilakukan secara lebih akurat dibandingkan metode Euler maupun Runge-Kutta orde yang lebih rendah.

Selain menghasilkan galat yang kecil, RK4 juga memiliki kestabilan numerik yang lebih baik ketika digunakan pada sistem yang mengalami perubahan secara bertahap. Oleh karena itu, metode RK4 menjadi salah satu metode numerik yang paling banyak digunakan dalam penyelesaian persamaan diferensial pada berbagai bidang sains dan teknik.

Perbandingan Metode Euler dan Runge-Kutta

Perbandingan hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap metode memiliki karakteristik yang berbeda dalam menghasilkan solusi numerik. Metode Euler menawarkan proses komputasi yang sederhana dan cepat, tetapi memiliki akurasi yang lebih rendah akibat akumulasi galat pada setiap langkah iterasi. Sebaliknya, metode Runge-Kutta menghasilkan solusi yang lebih stabil karena mempertimbangkan beberapa estimasi gradien dalam proses perhitungan.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Metode Numerik

Metode	Tingkat Akurasi	Kestabilan	Kompleksitas
Euler	Rendah	Rendah	Sangat sederhana
RK1	Rendah	Rendah	Sederhana
RK2	Baik	Baik	Sedang
RK3	Sangat Baik	Sangat Baik	Tinggi
RK4	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Tinggi

Berdasarkan hasil simulasi, peningkatan orde metode Runge-Kutta berbanding lurus dengan peningkatan akurasi solusi numerik. Meskipun RK4 membutuhkan proses komputasi yang lebih banyak dibandingkan metode Euler, peningkatan waktu komputasi tersebut relatif kecil jika dibandingkan dengan peningkatan ketelitian hasil yang diperoleh. Oleh karena itu, RK4 direkomendasikan sebagai metode yang paling sesuai untuk pemodelan produksi energi listrik tenaga nuklir.

Implementasi Computational Thinking

Penerapan metode Euler dan Runge-Kutta dalam penelitian ini tidak hanya bertujuan memperoleh solusi numerik, tetapi juga mengembangkan kemampuan *computational thinking*. Tahapan identifikasi masalah, penyusunan model matematis, implementasi algoritma, pelaksanaan simulasi, hingga interpretasi hasil mencerminkan proses berpikir komputasional yang sistematis.

Mahasiswa dituntut untuk mengidentifikasi hubungan antar variabel, menyusun model matematis, menerapkan algoritma numerik, dan mengevaluasi hasil simulasi berdasarkan tingkat akurasinya. Proses tersebut mendukung

pengembangan keterampilan berpikir logis, analitis, dan pemecahan masalah yang menjadi kompetensi penting dalam pembelajaran fisika komputasi.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil memodelkan hubungan antara jumlah reaktor nuklir yang beroperasi dengan produksi energi listrik menggunakan pendekatan numerik berbasis metode Euler dan Runge-Kutta. Pemodelan dilakukan melalui penyelesaian persamaan diferensial biasa menggunakan data statistik energi nuklir dunia tahun 2022. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kedua metode mampu menggambarkan pola perubahan produksi listrik terhadap jumlah reaktor, namun memiliki tingkat akurasi yang berbeda.

Metode Euler memberikan kemudahan dalam implementasi dan proses komputasi yang relatif sederhana, tetapi menghasilkan galat numerik yang lebih besar akibat akumulasi kesalahan pada setiap langkah iterasi. Sebaliknya, metode Runge-Kutta menghasilkan solusi yang lebih stabil dan memiliki tingkat ketelitian yang lebih tinggi. Di antara seluruh metode yang diuji, Runge-Kutta orde empat (RK4) menunjukkan performa terbaik karena mampu menghasilkan solusi yang paling mendekati data referensi dengan tingkat kestabilan yang tinggi.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan metode numerik sangat memengaruhi kualitas pemodelan sistem dinamis. Penggunaan metode Runge-Kutta, khususnya RK4, direkomendasikan untuk analisis sistem energi yang memerlukan ketelitian tinggi, sedangkan metode Euler lebih sesuai digunakan sebagai pendekatan awal atau untuk permasalahan yang relatif sederhana.

Selain memberikan gambaran mengenai pemodelan produksi energi listrik tenaga nuklir, penelitian ini juga menunjukkan implementasi *computational thinking* dalam pembelajaran fisika komputasi. Melalui proses penyusunan model matematis, implementasi algoritma numerik, analisis hasil simulasi, dan evaluasi akurasi metode, mahasiswa dapat mengembangkan kemampuan berpikir logis, analitis, dan pemecahan masalah berbasis komputasi. Kompetensi tersebut menjadi bagian penting dalam mendukung pembelajaran fisika yang adaptif terhadap perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

REFERENCES

Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah Republik Indonesia. (2025). Naskah akademik pembelajaran koding dan kecerdasan artifisial pada pendidikan dasar dan menengah. Pusat Kurikulum dan Pembelajaran & Pusat Standar dan Kebijakan Pendidikan, Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah Republik Indonesia. https://kurikulum.kemendikdasmen.go.id/service/download.php?kategori=rujukan&id=117

Bogheiry, A., Faisal, A. A., & Sunarno, S. (2022). Nuclear energy as environmentally friendly energy and international politics. *JPPI (Jurnal Penelitian Pendidikan Indonesia)*, *8* (2), 488-494. https://doi.org/10.29210/020221356

Fakhrudin, M., Rozi, A., Mahmudi, I., Hanum, M., & Dewi, J. P. Penerapan Energi Nuklir Sebagai Pembangkit Listrik Indonesia Pada Tahun 2035. *Jurnal Humanis*, *3*, 910-16. https://openjournal.unpam.ac.id/index.php/SNH/article/view/31036

Farooq, M. U., Zhang, X., & Ali, M. (2021). Numerical Modeling of Energy Systems for Predictive Planning. Energy Reports, 7, 512–520.

Hussein, E. M. A. (2020). *Emerging small modular nuclear power reactors: A critical review. Physics Open, 5, 100038*. https://doi.org/10.1016/j.physo.2020.100038

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2022). Nuclear Power and the Clean Energy Transition. https://www.iaea.org/bulletin/61-3

Kamruzzaman, M., & Nath, M. C. (2018). A comparative study on numerical solution of initial value problem by using Euler's method, modified Euler's method and runge–kutta method. *Journal of computer and mathematical sciences*, *9* (5), 493-500. https://doi.org/10.29055/jcms/784

Lee, S. T., & Jung, S. M. (2024). Monetizing Environmental Impacts of Nuclear Power: Cost-Benefit Analysis Using Social Cost of Carbon. *SAGE Open*, *14*(4), 21582440241301468. https://doi.org/10.1177/21582440241301468

Osicka, J., & Hrubý, M. (2024). Mega-Challenge: Exploring the Interlinked Barriers to Nuclear Energy Development. *Available at SSRN 4978303*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4978303

Sianturi, A. C., Tarigan, B. S. B., Purba, T. Y., & Sihombing, V. A. B. (2024). Implementasi Metode Euler 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

Soto, G. H., & Martinez-Cobas, X. (2024). Nuclear energy generation's impact on the CO2 emissions and ecological footprint among European Union countries. *Science of the Total Environment*, *945*, 173844. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173844

World Nuclear Association. (2023). Nuclear Power and the Environment. https://world-nuclear.org/images/articles/performance-report-2023-final.pdf