



Analysis of the Influence of Analytical Mechanics Concept on the Development of Modern Physics

Ayunda Puspitasari^{1*}, Fathiyya Mufida¹, Bayu Setiaji¹

¹Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

Jl. Colombo No. 1, Karangmalang Yogyakarta.

*email: ayundapspitasari.2023@student.uny.ac.id

DOI: <http://dx.doi.org/10.52434/jpif.v4i1.4004>

Accepted: June 8, 2024 Approved: June 24, 2024 Published: Juni 30, 2024

ABSTRACT

Physics has undergone development over time, one of which is through modern physics that studies the behavior of matter and energy at the atomic and subatomic particle scale using the concept of analytical mechanics to explain phenomena on a microscopic scale. The purpose of this article is to investigate the influence of analytical mechanics on the advancement of modern physics using a qualitative literature review approach. The literature review involved gathering information related to the study of mechanics and modern physics. The analysis results indicate that analytical mechanics such as Lagrangian and Hamiltonian have influenced the progress of modern physics significantly. This analytical mechanics has made a substantial contribution to modern physics by providing strong theoretical concepts, aiding theoretical research, enabling the analysis of complex physical phenomena, and offering practical applications across various scientific fields. The conclusion drawn from this analysis is the significant theoretical impact of analytical mechanics on the development of modern physics.

Keywords: *analitic mechanics, hamiltonian, lagragian, modern physics*

Analisis Pengaruh Konsep Mekanika Analitik Terhadap Perkembangan Fisika Modern

ABSTRAK

Fisika dari zaman ke zaman mengalami perkembangan, salah satunya melalui fisika modern yang mempelajari perilaku materi dan energi pada skala partikel atom dan sub atom dengan menggunakan konsep mekanika analitik untuk menjelaskan fenomena skala mikroskopis. Tujuan penulisan artikel ini adalah untuk mengetahui pengaruh mekanika analitik terhadap perkembangan fisika modern menggunakan metode studi literatur dengan pendekatan kualitatif. Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan informasi yang terkait dengan kajian mekanika dan fisika modern. Dari hasil analisis diperoleh hasil bahwa mekanika analitik seperti *Lagrangian* dan *Hamiltonian* memengaruhi perkembangan fisika modern. Mekanika analitik ini telah memberikan kontribusi yang besar terhadap perkembangan fisika modern yaitu dengan menyediakan konsep teoritis yang kuat, membantu dalam penelitian secara teoretis, mampu menganalisis fenomena fisika yang kompleks serta aplikasi praktis dalam berbagai bidang ilmu

pengetahuan. Kesimpulan dari hasil analisis ini adalah adanya pengaruh yang besar secara teoritis dari mekanika analitik terhadap perkembangan fisika modern.

Kata kunci: hamiltonian, lagragian, fisika modern, mekanika analitik

PENDAHULUAN

Sejarah perkembangan ilmu fisika memiliki latar belakang yang panjang dan kompleks. Ilmu fisika dapat dilihat sebagai salah satu disiplin ilmu yang paling dasar dan fundamental, dengan tujuan utama memahami bagaimana alam semesta bekerja (Yusuf, 2023). Ilmu fisika dimulai pada sekitar tahun 2400 SM, ketika kebudayaan Harappan menggunakan suatu benda untuk memperkirakan dan menghitung sudut bintang di angkasa (Aini et al., 2020). Dari saat itu, fisika terus berkembang, membawa perubahan dalam bidang dunia benda, matematika, dan filosofi, serta melalui teknologi, membawa perubahan ke dunia sosial masyarakat.

Sejak itu, Fisika telah berkembang hingga ke level saat ini. Perkembangan ini membawa perubahan tidak hanya pada dunia benda, matematika, dan filsafat, namun juga pada dunia sosial melalui teknologi. Perubahan ini terjadi sekitar tahun 1600, dapat dikatakan bahwa tahun tersebut mewakili batas antara pemikiran kuno dan lahirnya fisika klasik, yang berlangsung hingga tahun 1900, tahun ini menjadi era baru, era fisika modern (Aini et al., 2020). Pada era inilah dimulai penemuan-penemuan besar di bidang fisika yang menjadi dasar teknologi di masa saat ini.

Fisika modern berkembang pada awal abad ke-20 ketika rumusan fisika klasik sudah tidak mampu lagi menjelaskan fenomena yang terjadi pada benda berukuran sangat kecil. Fisika modern dimulai dengan hipotesis Planck. Hipotesis ini menyatakan bahwa jumlah energi pada benda yang bergetar (osilator) tidak lagi kontinu melainkan diskrit (kuantum), sehingga memunculkan istilah fisika kuantum dan konsep dualitas gelombang partikel (Jagielski, 2009). Konsep dualisme dan besaran kuantum ini merupakan dasar dari Fisika Modern (Yusuf, 2023). Konsep inilah yang menjadi gerbang ditemukannya fisika kuantum.

Fisika modern erat kaitannya dengan mekanika analitik. Mekanika analitik, yang berfokus pada analisis matematis gerak benda, memegang peran penting dalam perkembangan fisika modern (Anastopoulos, 2020). Fisika modern membahas perilaku materi dan energi pada skala partikel atom dan sub atom, dengan menggunakan konsep mekanika analitik untuk menjelaskan fenomena yang terjadi pada tingkat mikroskopis (Belyaev & Ross, 2021). Di dalam fisika modern, mekanika analitik digunakan untuk merumuskan teori yang menjelaskan perilaku partikel elementer, seperti relativitas khusus dan teori kuantum. Penggunaan mekanika analitik juga meluas ke dalam pengembangan teknologi kuantum seperti komputer kuantum dan kriptografi kuantum.

Mekanika analitik tidak hanya berperan dalam bidang teoritis, tetapi juga memiliki aplikasi praktis dalam berbagai teknologi kuantum (Barzanjeh et al., 2022). Kontribusi mekanika analitik turut membentuk konsep-konsep fundamental dalam fisika modern, termasuk mekanika gelombang, terowongan kuantum, dan tenun kuantum, yang menjadi dasar pemahaman kita tentang fisika partikel dan penerapannya dalam teknologi kuantum (Bhushan, 2024). Hubungan erat antara mekanika analitik dan fisika modern menegaskan bagaimana mekanika analitik

mempelajari perilaku materi dan energi dalam atom, menggabungkan kerangka teoritis dan aplikasi praktis dalam studi partikel elementer.

Secara keseluruhan, keterkaitan yang erat antara mekanika analitik dan fisika modern menyoroti peran penting mekanika analitik dalam perkembangan fisika modern. Dengan mengintegrasikan prinsip teoritis dengan aplikasi praktis, mekanika analitik tidak hanya meningkatkan pemahaman kita tentang partikel elementer, tetapi juga mendorong kemajuan dalam teknologi kuantum, yang menjadi landasan teoritis dan inovasi dalam teori fisika modern .

METODE PENELITIAN

Artikel ini dibuat menggunakan metode studi literatur. Penulis melakukan kajian hasil penelitian terbaik mengenai topik yang akan dibahas melalui jurnal dan buku yang telah diterbitkan, dengan variabel bebas yaitu perbedaan mekanika analitik dengan mekanika Newtonian, variabel kontrol adalah perkembangan fisika modern, dan variabel terikatnya adalah pengaruh mekanika analitik terhadap perkembangan fisika modern.

Melalui pendekatan studi literatur yang cermat, peneliti dapat merumuskan pemahaman yang mendalam mengenai perbedaan esensial antara mekanika analitik dan mekanika Newtonian serta bagaimana perbedaan tersebut berdampak pada evolusi fisika modern. Dengan menganalisis dan menyusun temuan terbaik dari sumber-sumber akademis terkemuka, artikel ini bertujuan untuk menguraikan secara komprehensif pengaruh mekanika analitik terhadap perkembangan lanjutan dalam bidang fisika modern. Dengan demikian, melalui metodologi studi literatur yang teliti, artikel ini menghadirkan wawasan yang mendalam mengenai peran mekanika analitik sebagai pendorong utama dalam evolusi teori fisika modern.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Fisika modern terus berkembang dengan penemuan-penemuan baru dan berkembangnya teori-teori yang lebih akurat. Fisika modern telah berkontribusi pada pemahaman perilaku materi dan energi pada skala partikel atom dan sub atom, serta fenomena pada skala mikroskopis (Brewer et al., 2020). Secara keseluruhan, perkembangan fisika modern saat ini terus berfokus pada pengembangan teori-teori yang lebih tepat dan penemuan-penemuan baru yang berkontribusi pada pemahaman fenomena alam yang kompleks dan kemajuan teknologi modern.

Dalam pengembangan teori yang menjelaskan perilaku partikel elementer, seperti relativitas khusus dan teori kuantum dapat menggunakan konsep mekanika analitik, ada beberapa tokoh penting dalam kajian mekanika analitik yang telah memberikan kontribusi besar terhadap pengembangan konsep dan teori dalam bidang ini. Berikut adalah beberapa kajian mekanika analitik yang berkontribusi besar terhadap perkembangan teori mekanika.

1. Joseph-Louis de Lagrange

Matematikawan dan fisikawan Italia-Francis Lagrange merumuskan persamaan gerak yang sekarang dikenal sebagai persamaan Lagrange. Karya besarnya "*Mécanique analytique*", yang menjelaskan prinsip-prinsip dasar mekanika analitik, adalah kontribusinya yang paling terkenal. Karya Lagrange tidak hanya memberikan landasan matematis yang kuat bagi mekanika analitik,

tetapi juga memperluas cakupan pemahaman kita tentang gerakan benda dalam sistem fisika. Konsep persamaan Lagrange yang dikembangkannya tidak hanya menjadi landasan teoritis penting dalam fisika modern, tetapi juga membuka pintu bagi pengembangan lebih lanjut dalam berbagai bidang ilmu pengetahuan dan teknologi. Dengan karyanya yang revolusioner ini, Lagrange memberikan kontribusi yang monumental dalam membangun landasan matematis bagi pemahaman kita tentang alam semesta dan gerakannya.

2. Leonhard Euler

Selain menjadi salah satu matematikawan terhebat sepanjang masa, Euler juga membuat banyak kontribusi yang signifikan dalam fisika matematika dan mekanika analitik, termasuk pengembangan persamaan gerak Euler-Lagrange, yang merupakan dasar mekanika analitik. Kontribusi Euler dalam bidang fisika matematika dan mekanika analitik tidak hanya menegaskan kejeniusannya sebagai matematikawan, tetapi juga mengukuhkan posisinya sebagai tokoh kunci dalam pengembangan teori fisika modern. Persamaan gerak Euler-Lagrange yang dihasilkannya tidak hanya menjadi landasan teoritis yang penting dalam mekanika analitik, tetapi juga memberikan fondasi kuat bagi pemahaman kita tentang gerakan benda dalam berbagai sistem fisika. Dengan karyanya yang revolusioner ini, Euler telah memberikan sumbangan yang monumental dalam membangun landasan matematis bagi pemahaman kita tentang alam semesta dan dinamikanya.

3. William Rowan Hamilton

Hamilton, seorang fisikawan dan matematikawan berkebangsaan Irlandia, dikenal karena membangun cabang mekanika analitik yang disebut mekanika Hamiltonian. Cabang ini menggambarkan gerakan sistem fisika dengan menggunakan gagasan medan energi potensial. Pendekatan Hamiltonian yang dikembangkan oleh Hamilton tidak hanya memberikan perspektif baru dalam menganalisis sistem fisika, tetapi juga membuka jalan bagi pemahaman yang lebih mendalam tentang dinamika partikel dan sistem kompleks. Dengan memperkenalkan konsep medan energi potensial dalam mekanika analitik, Hamilton telah memberikan kontribusi yang monumental bagi perkembangan fisika modern. Pendekatan ini tidak hanya mengubah cara kita memahami gerakan benda, tetapi juga mengilhami berbagai bidang ilmu pengetahuan, membuka pintu bagi eksplorasi lebih lanjut dalam pemodelan dan analisis sistem fisika yang kompleks.

4. Pierre-Simon Laplace

Laplace adalah seorang ahli matematika dan astronom Prancis yang membuat kontribusi besar dalam mekanika analitik melalui pekerjaannya di bidang astronomi, terutama dalam membangun teori sistem banyak tubuh. Pemikiran Laplace dalam mekanika analitik, khususnya dalam konteks teori sistem banyak tubuh, tidak hanya mengubah cara kita memahami dinamika sistem kompleks, tetapi juga mendorong perkembangan teori fisika modern. Dengan dedikasinya terhadap matematika dan astronomi, Laplace memberikan sumbangan yang signifikan dalam memperluas cakrawala pengetahuan kita tentang alam semesta dan mekanisme yang mengatur gerakannya. Kontribusi briliannya dalam mekanika analitik telah membuka jalan bagi pemahaman yang lebih dalam tentang interaksi antar benda langit dan prinsip-prinsip fundamental yang mengatur tata surya dan sistem astronomi lainnya.

5. Carl Gustav Jacob

Jacobi adalah seorang matematikawan Jerman yang berkontribusi besar pada teori transformasi kanonikal dalam mekanika analitik. Ia terkenal karena upayanya untuk menemukan integral pertama dari gerakan dalam mekanika klasik. Kontribusi Jacobi teori transformasi kanonikal tidak hanya menghadirkan pemahaman yang mendalam tentang dinamika sistem fisika, tetapi juga membuka jalan bagi pengembangan konsep integral pertama gerakan dalam mekanika klasik (Tokasi & Pickl, 2022). Usahnya yang gigih dalam mengeksplorasi aspek fundamental dari gerakan mekanik tidak hanya mengubah paradigma analisis dalam mekanika analitik, tetapi juga memberikan landasan yang kokoh bagi pemahaman kita tentang prinsip-prinsip dasar yang mengatur pergerakan benda dalam sistem fisika. Dengan karyanya yang revolusioner, Jacobi telah memberikan kontribusi yang monumental dalam memperkaya landasan matematis bagi teori fisika modern dan dinamika sistem fisik yang kompleks.

Mekanika analitik telah memberikan kontribusi yang besar terhadap perkembangan fisika modern. Mekanika analitik, yang diperkenalkan oleh Joseph-Louis de Lagrange dan William Rowan Hamilton, memungkinkan analisis fenomena fisik yang lebih rinci dan akurat. Metode analisis ini memungkinkan fisikawan untuk lebih memahami dan memprediksi perilaku partikel dan sistem fisik, serta mengembangkan teori fisika yang lebih akurat dan memiliki penerapan yang lebih luas.

Mekanika analitik, termasuk formulasi Lagrangian dan Hamiltonian, mempunyai pengaruh yang besar terhadap perkembangan fisika modern (Sanjuán, 2021). Beberapa diantaranya yaitu Formulasi Medan Kuantum mekanika Hamilton menjadi dasar perkembangan mekanika kuantum. Persamaan Schrödinger yang menjadi dasar mekanika kuantum dapat dilihat sebagai hasil kuantisasi persamaan Hamilton. Teori medan kuantum, yang menggabungkan mekanika kuantum dan relativitas khusus, juga menggunakan prinsip Hamilton untuk menjelaskan dinamika partikel dan medan pada tingkat kuantum. Selanjutnya ada Teori Relativitas Prinsip operasi Hamilton menjadi alat penting dalam formulasi relativitas umum Einstein. Formulasi ini membantu menjelaskan gerak partikel dalam medan gravitasi kuat.

Perkembangan relativitas khusus juga dipengaruhi oleh konsep mekanika analitik, khususnya dalam pemahaman ruang dan waktu. Kemudian dalam Fisika Statistika dalam fisika statistik, khususnya dalam rumusan termodinamika mikroskopis, konsep mekanika Hamilton digunakan untuk menggambarkan sistem dengan sejumlah besar derajat kebebasan. Teorema ergodik dan metode ansambel mekanika statistik berakar pada prinsip Hamilton. Selanjutnya dalam Teori Kacau (*Chaos Theory*) Mekanika analitik memberikan kerangka kerja untuk analisis sistem dinamik nonlinier, yang menjadi dasar pengembangan teori *chaos*. Pendekatan Hamilton memungkinkan analisis stabilitas dan sensitivitas terhadap kondisi awal dalam sistem yang kompleks dan yang terakhir pada Simulasi dan Komputasi banyak metode numerik dalam fisika dikembangkan berdasarkan prinsip mekanika analitik contoh yang terkenal adalah integrasi numerik sistem Hamilton, yang digunakan untuk menyimulasikan dinamika molekul dan dinamika sistem fisik lainnya.

Selain untuk perkembangan fisika modern, formulasi Lagrangian dan Hamilton juga diterapkan dalam berbagai inovasi teknologi. Berikut ini beberapa inovasi teknologi yang dikembangkan berdasarkan formulasi mekanika analitik.

1. Pemodelan Gerak Parabola yang Dipengaruhi Seretan serta Spin Efek Magnus Bola dengan Program Modellus dan Excell.

Aplikasi ini dibahas di dalam penelitian yang dilakukan oleh Purwadi dan Ishafit yang memodelkan gerak parabola yang dipengaruhi seretan dan efek spin bola Magnus menggunakan program Excel dan Modellus (Putri et al., 2024). Penelitian ini tidak hanya mencakup pemodelan gerak parabola dengan mempertimbangkan pengaruh seretan dan efek spin bola Magnus, tetapi juga menunjukkan keberhasilan dalam mengintegrasikan aplikasi Excel dan Modellus sebagai alat untuk analisis dan simulasi. Melalui pendekatan ini, peneliti mampu menggambarkan dengan lebih baik kompleksitas gerakan parabola dalam kondisi nyata, memberikan kontribusi berharga dalam pengembangan metodologi analisis yang inovatif dan aplikatif dalam studi mekanika analitik. Hasil penelitian ini memberikan wawasan yang mendalam tentang bagaimana faktor-faktor tertentu seperti seretan dan efek spin bola Magnus memengaruhi jalannya gerakan parabola, menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif tentang fenomena fisika yang kompleks.

2. Kajian Gerak Peluru dengan Persamaan Lagrangian

Persamaan Lagrangian digunakan oleh Nasution, Lulut Alfaris, dan Siagian untuk menganalisis gerak peluru dan memperoleh pengetahuan matematis yang relevan dengan topik bahasan (Putri et al., 2024). Metode ini memungkinkan para peneliti untuk mendalami dinamika gerak peluru dengan pendekatan matematis yang kuat, memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang faktor-faktor yang memengaruhi lintasan dan perilaku peluru dalam perjalanan melalui ruang. Dengan memanfaatkan persamaan Lagrangian, studi ini tidak hanya memberikan wawasan mendalam tentang gerak peluru secara matematis, tetapi juga mengilustrasikan kegunaan konsep-konsep mekanika analitik dalam konteks aplikatif yang relevan dengan dinamika tembakan dan pergerakan proyektil. Melalui pendekatan ini, penelitian tersebut membuka peluang untuk menjelajahi kompleksitas gerak proyektil dengan landasan teoritis yang kokoh, memberikan kontribusi berharga dalam pemahaman kita tentang mekanika gerak peluru dalam bidang fisika.

3. Pemodelan dan Analisis Gerak Parabola Dua Dimensi dengan Menggunakan Aplikasi GUI MATLAB

Mitra Pilar: Jurnal Pendidikan, Inovasi, dan Terapan Teknologi menerbitkan ulasan yang meninjau berbagai metode pembelajaran impuls dan momentum, termasuk metode Lagrange dan Hamilton (Kusairoh et al., 2022). Pemodelan gerak parabola dua dimensi sering digunakan dalam fisika untuk menggambarkan pergerakan benda yang diluncurkan dengan sudut tertentu terhadap medan gravitasi. Gerak parabola ini dapat dipecah menjadi gerak horizontal dan vertikal yang saling terkait. Dalam analisis gerak parabola, terdapat beberapa parameter yang biasanya diamati, seperti jarak tempuh horizontal, ketinggian maksimum, waktu terbang, dan sudut lemparan. Analisis ini membantu dalam pemahaman tentang karakteristik gerak parabola dan prediksi pergerakan benda. Dengan menggunakan Graphical User Interface (GUI) MATLAB, pengguna dapat membuat antarmuka yang interaktif untuk memasukkan parameter awal gerak parabola, mengamati visualisasi gerak, dan menganalisis hasilnya dengan lebih mudah. Dengan menggunakan aplikasi GUI MATLAB, pengguna dapat dengan mudah mengubah parameter awal gerak parabola, melihat visualisasi gerak secara langsung, dan melakukan analisis data dengan

cepat. Hal ini memudahkan dalam eksplorasi berbagai kondisi gerak parabola dan memperoleh pemahaman yang lebih baik.

4. Exploring Isomerization Dynamics on a Potential Energy Surface with an Index-2 Saddle using Lagrangian Descriptors

Untuk melihat dinamika isomerisasi pada permukaan energi potensial, García-Garrido, Agaoglou, dan Wiggins menggunakan lagrangian descriptors. Mereka melakukan ini dengan menggunakan *saddle* indeks-2 (Kusairoh et al., 2022). Studi ini menggali dinamika isomerisasi pada permukaan energi potensial dengan titik saddle indeks-2 menggunakan deskriptor Lagrangian, sebuah pendekatan matematis yang memungkinkan pemahaman mendalam tentang perubahan struktur molekul dan reaksi kimia. Dengan menganalisis titik saddle kritis dan energi potensial sistem molekuler, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh wawasan yang lebih baik dalam merancang strategi kontrol reaksi kimia dan memprediksi perilaku molekuler secara efisien.

5. New Ultrahigh-Resolution Picture of Earth's Gravity Field

Untuk menghasilkan gambaran medan gravitasi bumi dengan resolusi sangat tinggi, Hirt, Claessens, Fecher, Kuhn, Pail, dan Rexer menggunakan metode Lagrangian (Kusairoh et al., 2022). Penjelasan mengenai "*New Ultrahigh-Resolution Picture of Earth's Gravity Field*" merujuk pada pengembangan citra resolusi ultra tinggi dari medan gravitasi Bumi. Dalam konteks ini, teknologi pemetaan gravitasi digunakan untuk menghasilkan gambaran yang lebih detail dan presisi tentang distribusi massa di Bumi. Informasi ini penting dalam pemahaman tentang geodinamika, perubahan iklim, dan geologi Bumi secara keseluruhan. Dengan citra resolusi ultra tinggi ini, para ilmuwan dapat melakukan analisis yang lebih mendalam terhadap fenomena geofisika dan memperoleh wawasan baru tentang struktur internal dan evolusi planet kita.

Dalam contoh lain misalnya pada topik optika analisis propagasi cahaya dan desain sistem optik menggunakan prinsip mekanika analitik, pada elektromagnetisme medan elektromagnetik dan interaksinya dengan materi dipelajari menggunakan mekanika analitik, dan pada mekatronika mekanika analitik digunakan untuk menggabungkan mekanika, elektronik, dan kontrol untuk merancang sistem mekatronik.

KESIMPULAN

Mekanika analitik, sebagai cabang penting dalam fisika modern, memberikan kontribusi yang signif dalam pengembangan teori fisika modern. Melalui formulasi Lagrangian dan Hamiltonian, mekanika analitik telah memainkan peran kunci dalam pemahaman perilaku partikel elementer seperti dalam teori relativitas khusus dan kuantum. Dampaknya juga terlihat dalam formulasi Medan Kuantum dan Prinsip Operasi Hamilton yang menjadi landasan bagi perkembangan mekanika kuantum serta relativitas umum Einstein, mengilhami teori-teori seperti Teori Kacau untuk analisis sistem dinamik nonlinier.

Sementara itu, dalam penerapan teknologi, mekanika analitik telah menjadi landasan untuk banyak inovasi praktis. Dari pengembangan komputer kuantum hingga aplikasi kriptografi kuantum, mekanika analitik memberikan kerangka kerja yang mendukung perkembangan teknologi kuantum. Integrasi numerik sistem Hamilton juga digunakan dalam simulasi dinamika

molekul dan sistem fisik lainnya, sementara inovasi seperti pemodelan dua dimensi dengan MATLAB dan studi gerak peluru dengan persamaan Lagrangian menunjukkan betapa formulasi mekanika analitik turut mendorong kemajuan dalam berbagai bidang teknologi modern..

Dengan demikian, mekanika analitik memengaruhi perkembangan fisika modern dan telah memberikan kontribusi yang besar terhadap perkembangan fisika modern yaitu dengan menyediakan konsep teoritis yang kuat, membantu dalam penelitian secara teoretis, mampu menganalisis fenomena fisika yang kompleks serta aplikasi praktis dalam berbagai bidang ilmu pengetahuan. Mekanika analitik tidak hanya menjadi fondasi teoritis yang kokoh dalam fisika modern, tetapi juga berperan sebagai katalisator dalam mendorong eksplorasi ilmiah. Dengan menyediakan kerangka kerja yang terstruktur dan matematis untuk memahami fenomena kompleks, mekanika analitik memungkinkan pengembangan teori yang mendalam dan aplikasi praktis yang luas dalam berbagai disiplin ilmu. Kontribusinya yang beragam terhadap pemahaman kita tentang alam semesta dan kemampuannya untuk memberikan solusi terhadap tantangan ilmiah mendefinisikan peranan yang penting dalam evolusi fisika modern serta aplikasinya dalam teknologi maju yang merintis jalan bagi inovasi masa depan.

REFERENSI

- Aini, N. R., Irianto, I. D., Hamid, A. A., & Thompson, B. B. (2020). Sejarah Perkembangan Fisika (Kuantum) Dari Klasik Hingga Modern. *Diktat Kuliah Termodinamika*, 4 (3), 22–32.
- Anastopoulos, C. (2020). *Particle or wave: The evolution of the concept of matter in modern physics*. Princeton University Press.
- Barzanjeh, S., Xuereb, A., Gröblacher, S., Paternostro, M., Regal, C. A., & Weig, E. M. (2022). Optomechanics for quantum technologies. *Nature Physics*, 18(1), 15–24.
- Belyaev, A., & Ross, D. A. (2021). *The basics of nuclear and particle physics*. Springer.
- Bhushan, S. (2024). Quantum System Dynamics: Harnessing Constructive Resonance for Technological Advancements, Universal Matter Creation and Exploring the Paradigm of Resonance-induced Gravity. *INTERNATIONAL JOURNAL*, 2766, 2748.
- Brewer, W. D., Tolmasquim, A. T., Brewer, W. D., & Tolmasquim, A. T. (2020). *A New World of Subatomic Particles: A Summary of the Physics*. Springer.
- Jagielski, B. (2009). *Elements of the wave-particle duality of light*.
- Kusairoh, E. N., Rahmawati, R., Sari, N., & Setiaji, B. (2022). Pengembangan Media Pembelajaran Berbasis Video Tutorial pada Mata Kuliah Mekanika Analitik. *Jurnal Pendidikan Matematika Dan Sains*, 10(2), 121–126.
- Putri, E. E., Salma, R., Sutantri, C., Supriadi, B., & Dewi, N. M. (2024). Kajian Gerak Peluru Dengan Persamaan Lagrangian. *Eduproxima (Jurnal Ilmiah Pendidikan Ipa)*, 6(1), 145–149.
- Sanjuán, M. A. F. (2021). A modern approach to teaching classical mechanics: A review of Modern classical mechanics by TM Helliwell and VV Sahakian, Cambridge, Cambridge University Press, 2020, 704 pp.,£ 56.00,(hardback), ISBN 978-1-10-883497-1. Scope: textbook, reference. Level: undergraduate, advanced undergraduate, postgraduate, teacher,

scientist, engineers. *Contemporary Physics*, 62(1), 46–49.

Tokasi, S., & Pickl, P. (2022). Symplectic reduction of classical mechanics on shape space. *Foundations of Physics*, 52(5), 106.

Yusuf, Y. H. M. (2023). Sejarah Perkembangan Fisika. *Tanggung Denara Jaya Publisher*.