

MEMAHAMI KONSEP DAN ESENSI TERMODINAMIKA DALAM FENOMENA LUBANG HITAM: DARI HUKUM NOL HINGGA HUKUM KETIGA

Ruben Cornelius Siagian¹, Mardame Pangihutan Sinaga²

¹Universitas Negeri Medan, ²Universitas HKBP Nommensen Pematangsiantar

Email: rubensiagian17@mhs.unimed.ac.id¹, m.pangihutan@gmail.com²

^{1,2}Medan, Indonesia

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pentingnya penyatuan konstanta fisika sebagai satu entitas dalam analisis fisika modern. Latar belakang penelitian menunjukkan bahwa pengaturan konstanta fisika utama, seperti kecepatan cahaya, konstanta gravitasi, konstanta Planck, dan konstanta Boltzmann, sebagai satu kesatuan, dapat menyederhanakan perhitungan dan memfasilitasi analisis yang lebih intuitif. Tujuan utama penelitian adalah menginvestigasi implikasi penyatuan konstanta fisika dalam konteks teori relativitas dan prinsip-prinsip termodinamika pada fenomena fisika modern, terutama lubang hitam stasioner. Penelitian ini mengusulkan pendekatan integratif yang menggabungkan teori relativitas dan prinsip-prinsip termodinamika dalam satu kerangka konseptual, dengan fokus pada lubang hitam stasioner. Hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan pemahaman terhadap hubungan antara konstanta fisika, hukum-hukum termodinamika, dan fenomena kompleks seperti lubang hitam, serta memberikan landasan untuk penyederhanaan analisis fisika modern. Manfaat penelitian ini melibatkan kontribusi dalam pemahaman fenomena lubang hitam, memperluas pengetahuan dalam teori relativitas dan termodinamika, serta membuka potensi pengembangan teori yang lebih holistik. Batasan penelitian mencakup fokus pada lubang hitam stasioner, sementara fenomena lubang hitam dinamis dan aspek fisika lainnya di luar cakupan teori ini tidak dibahas. Novelty penelitian ini terletak pada pendekatan integratif terhadap konstanta fisika dalam analisis lubang hitam, memberikan kontribusi positif terhadap kurangnya penelitian yang menyeluruh mengenai integrasi konstanta fisika utama dalam analisis fenomena fisika modern, khususnya dalam konteks lubang hitam stasioner. Kesimpulan penelitian menegaskan bahwa penyatuan konstanta fisika sebagai satu kesatuan tidak hanya menyederhanakan analisis fisika modern, tetapi juga membuka pintu untuk pemahaman yang lebih dalam terhadap hubungan kompleks antara konstanta fisika, hukum-hukum termodinamika, dan fenomena fisika modern, terutama lubang hitam stasioner. Penelitian ini memberikan dasar bagi penelitian lebih lanjut dan potensi pengembangan teori yang lebih holistik di bidang ini.

Kata Kunci: Penyatuan Konstanta Fisika, Analisis Fisika Modern, Teori Relativitas, Lubang Hitam Stasioner, Integrasi Konstanta Fisika

ABSTRACT

This research aims to investigate the importance of unifying physics constants as a single entity in the analysis of modern physics. The research background shows that setting the major physics constants, such as the speed of light, gravitational constant, Planck's constant, and Boltzmann's constant, as a single entity, can simplify calculations and facilitate more intuitive analysis. The main objective of the research is to investigate the implications of unifying physics constants in the context of relativity theory and thermodynamic principles on modern physics phenomena, especially stationary black holes. This research proposes an integrative approach that combines relativity theory and thermodynamic principles in one conceptual framework, with a focus on stationary black holes. The results of this research are

expected to improve the understanding of the relationship between physical constants, the laws of thermodynamics, and complex phenomena such as black holes, as well as provide a foundation for simplifying the analysis of modern physics. The benefits of this research involve contributing to the understanding of the black hole phenomenon, expanding knowledge in relativity theory and thermodynamics, and opening up the potential for more holistic theory development. The limitations of the research include a focus on stationary black holes, while the phenomenon of dynamical black holes and other aspects of physics beyond the scope of this theory are not discussed. The novelty of this research lies in the integrative approach to physical constants in black hole analysis, making a positive contribution to the lack of thorough research on the integration of key physical constants in the analysis of modern physical phenomena, particularly in the context of stationary black holes. The conclusion confirms that the unification of physics constants as a whole not only simplifies the analysis of modern physics, but also opens the door to a deeper understanding of the complex relationship between physics constants, the laws of thermodynamics, and modern physical phenomena, especially stationary black holes. This research provides a foundation for further research and the potential development of a more holistic theory in this area.

Keywords: Unification of the Constants of Physics, Analysis of Modern Physics, Theory of Relativity, Black Holes Stationary, Integration of Physics Constants

Received: 29 Januari 2024; Revision: 12 Februari 2024; Accepted: 19 Februari 2024; Publish: 26 Februari 2024

A. PENDAHULUAN

Penelitian ini menghadirkan sebuah pandangan mendalam dalam menerapkan konsep menetapkan konstanta fisika sebagai satu dalam analisis fisika modern. penelitian ini memberikan kontribusi penting terhadap pemahaman kita tentang peran dan implikasi konstanta-konstanta fisika utama, seperti kecepatan cahaya, gravitasi, konstanta Planck, dan konstanta Boltzmann, dalam konteks mekanika kuantum, termodinamika, dan relativitas umum.

Dalam teori relativitas, penggunaan kecepatan cahaya sebagai satuan dasar memberikan keuntungan dalam menyederhanakan perhitungan dan memungkinkan perbandingan yang lebih mudah antara kecepatan objek dan kecepatan Cahaya (Magueijo, 2011). Menetapkan konstanta gravitasi G , Planck (h), dan Boltzmann (k_B) sebagai satu memiliki dampak signifikan dalam mempermudah perhitungan dalam konteks relativitas umum, mekanika kuantum, dan termodinamika (Alonso-Serrano & Liška, 2020).

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi implikasi dari menetapkan konstanta fisika sebagai satu dalam analisis fisika modern. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi pada pemahaman lebih lanjut tentang keterkaitan antara konstanta-konstanta fisika tersebut dan bagaimana hal ini dapat mempermudah analisis dalam berbagai bidang fisika.

Manfaat penelitian ini sangat luas, mencakup kemungkinan penyederhanaan perhitungan dalam bidang-bidang kunci seperti mekanika kuantum, termodinamika, dan relativitas umum. Hasil penelitian ini dapat memberikan pandangan baru terhadap hubungan fundamental antara konstanta fisika yang mendasarinya, membantu peneliti dan ilmuwan untuk mengembangkan pemahaman yang lebih dalam tentang prinsip-prinsip dasar fisika modern.

Penelitian ini memiliki batasan dalam ruang lingkup analisis konstanta fisika tertentu. Fokus utama adalah pada kecepatan cahaya, konstanta gravitasi, konstanta Planck, dan konstanta Boltzmann. Penelitian ini tidak mendalami konstanta fisika lainnya, dan hasilnya mungkin memiliki relevansi yang lebih besar dalam konteks tertentu.

Hasil penelitian ini memiliki dampak signifikan pada pemahaman kita tentang bagaimana menetapkan konstanta fisika sebagai satu dapat mempermudah dan memperdalam analisis fisika modern. Implikasi ini mencakup potensial pengembangan teori baru, metode perhitungan yang lebih efisien, dan pemahaman yang lebih mendalam tentang interaksi antara berbagai aspek fisika.

Penelitian ini mengisi kesenjangan pengetahuan dengan mengeksplorasi konsep menetapkan konstanta fisika sebagai satu, yang belum sepenuhnya dieksplorasi dalam literatur fisika modern. Keunikan penelitian ini terletak pada pendekatan yang holistik terhadap konstanta-konstanta fisika utama dan implikasinya dalam berbagai aspek fisika.

Melalui penggalian dalam hukum termodinamika, teori relativitas, dan mekanika kuantum, penelitian ini membuka pintu untuk pemahaman yang lebih mendalam tentang hubungan fundamental antara konstanta fisika dan fenomena fisika yang mendasarinya. Dengan demikian, penelitian ini membawa nuansa baru dan pandangan inovatif dalam eksplorasi konsep dasar dalam fisika modern.

B. METODE PENELITIAN

Metode penelitian dalam penelitian ini melibatkan penetapan konstanta fisika yang signifikan sebagai nilai satu. Pendekatan ini memiliki implikasi mendalam dalam analisis fisika modern, terutama dalam konteks relativitas umum, mekanika kuantum, dan termodinamika. Langkah-langkah kunci dalam penelitian ini melibatkan penetapan beberapa konstanta fisika, seperti kecepatan cahaya dalam ruang hampa, konstanta gravitasi G , konstanta Planck (h), dan konstanta Boltzmann (k_B), sebagai nilai satu.

Penetapan kecepatan cahaya sebagai satu menjadi penting karena menghasilkan pemahaman yang lebih fundamental tentang kecepatan cahaya sebagai batasan maksimum

dalam relativitas. Ini memudahkan perbandingan antara kecepatan objek dan kecepatan cahaya, memungkinkan perhitungan yang lebih sederhana. Penetapan konstanta gravitasi G sebagai satu dalam konteks relativitas umum mempermudah perhitungan dengan menyederhanakan banyak persamaan, sehingga analisis lebih mudah dipahami.

Selanjutnya, penetapan konstanta Planck (h) dan konstanta Boltzmann (k_B) sebagai satu memiliki dampak dalam mekanika kuantum dan termodinamika. Konstanta-konstanta ini muncul dalam berbagai rumus terkait energi kuantum dan statistik partikel. Dengan menetapkannya sebagai satu, rumus-rumus ini dapat disederhanakan, memudahkan analisis intuitif.

Dalam konteks lubang hitam, pentingnya konstanta fisika tercermin dalam persamaan Feldman yang menggambarkan gaya gravitasi di sekitar lubang hitam stasioner. Penetapan konstanta gravitasi permukaan sebagai satu memungkinkan analisis lebih lanjut tentang sifat-sifat lubang hitam stasioner, di mana gravitasi permukaannya dianggap konstan.

Hubungan antara Radiasi Hawking, entropi lubang hitam, dan luas permukaan lubang hitam (A) juga ditekankan. Radiasi Hawking menunjukkan bahwa lubang hitam dapat kehilangan massa dan energi seiring waktu, memberikan wawasan baru dalam kerangka mekanika kuantum. Kesimpulannya, penetapan konstanta fisika sebagai satu bukan hanya mempermudah perhitungan dan memungkinkan analisis yang lebih sederhana, tetapi juga membawa pemahaman mendalam tentang sifat-sifat fisika dalam konteks relativitas umum, mekanika kuantum, dan termodinamika.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pentingnya Menetapkan Konstanta Fisika sebagai Satu dalam Analisis Fisika Modern

Ketika kecepatan cahaya dalam ruang hampa dinyatakan sebagai satu, hal ini berarti kita menggunakan kecepatan cahaya sebagai satuan dasar untuk mengukur kecepatan apapun (Braun et al., 2017). Dalam teori relativitas, cahaya memainkan peran penting dalam membatasi kecepatan maksimum yang dapat dicapai oleh benda apapun (Born, 1962). Dengan mengatur c menjadi satu, kita secara efektif menyederhanakan perhitungan dan memungkinkan perbandingan yang lebih mudah antara kecepatan objek dan kecepatan cahaya. Mengatur konstanta gravitasi G menjadi satu, kita menyederhanakan perhitungan dalam konteks relativitas umum. Konstanta gravitasi biasanya memiliki dimensi dan besarnya yang besar,

sehingga dapat menyulitkan dalam perhitungan. Namun, dengan menetapkannya menjadi satu, kita dapat menghilangkan konstanta ini dari sebagian besar persamaan, yang secara signifikan menyederhanakan analisis relativitas umum. Menetapkan konstanta Planck (h) dan konstanta Boltzmann (k_B) menjadi satu memiliki implikasi dalam mekanika kuantum dan termodinamika. Konstanta Planck dan Boltzmann muncul dalam banyak rumus dan persamaan yang berkaitan dengan energi kuantum dan statistik partikel. Dengan menetapkannya menjadi satu, kita dapat menyederhanakan rumus-rumus ini, memungkinkan analisis yang lebih intuitif dan mudah dipahami.

Hukum nol Termodinamika

Hukum Nol Termodinamika, juga dikenal sebagai Hukum Ketiga Termodinamika, menyatakan bahwa jika dua sistem terpisah berada dalam keseimbangan termal dengan sistem ketiga, maka keduanya berada dalam keseimbangan termal satu sama lain (Gavassino, 2020). Dalam gaya gravitasi permukaan pada lubang hitam stasioner, kita akan mempertimbangkan konstanta gravitasi permukaan, disebut (k_H), yang tetap atau konstan di sepanjang horison lubang hitam (Barceló et al., 2021).

Jika dua sistem terpisah berada dalam keseimbangan termal dengan sistem ketiga, maka keduanya berada dalam keseimbangan termal satu sama lain (Talkner & Hänggi, 2020). Lubang hitam stasioner adalah lubang hitam yang tidak mengalami perubahan signifikan dalam strukturnya seiring waktu (Volonteri et al., 2021). Dengan kata lain, sifat-sifatnya, termasuk gravitasi permukaannya, tetap konstan. Gravitasi permukaan adalah kekuatan gravitasi yang dialami oleh objek jika ditarik ke arah permukaan lubang hitam (Kembhavi et al., 2020). (k_H) adalah konstanta yang mewakili besar gaya gravitasi permukaan pada lubang hitam. Dalam teori relativitas umum, gaya gravitasi di sekitar lubang hitam dinyatakan oleh persamaan, yang menyatakan bahwa (Pound & Wardell, 2022):

$$F = \frac{GMm}{r^2} \quad (1)$$

Di mana (F) adalah gaya gravitasi antara dua benda, (G) adalah konstanta gravitasi universal, (M) adalah massa lubang hitam, (m) adalah massa objek yang ditarik oleh gaya gravitasi, (r) adalah jarak antara pusat massa lubang hitam dan objek. Namun, di sepanjang horison lubang hitam, gravitasi permukaan (k_H) didefinisikan sebagai gaya gravitasi yang dirasakan oleh

objek pada horison tersebut (Vagnozzi et al., 2022). Oleh karena itu, kita dapat menyatakan gaya gravitasi di horison sebagai:

$$F_H = \frac{GMm}{R_H^2} \quad (2)$$

Di mana F_H adalah gaya gravitasi di horison lubang hitam, R_H adalah jari-jari horison lubang hitam. Karena kita sedang mempertimbangkan lubang hitam stasioner, kita tahu bahwa (k_H) adalah konstan. Oleh karena itu, gaya gravitasi di horison harus konstan:

$$F_H = k_H \quad (3)$$

$$\frac{GMm}{R_H^2} = k_H$$

$$R_H = \sqrt{\frac{GMm}{k_H}} \quad (4)$$

Persamaan diatas menunjukkan bahwa jarak dari pusat massa lubang hitam ke horison bergantung pada konstanta gravitasi permukaan (k_H), massa lubang hitam (M), dan massa objek (m). Semakin besar (k_H), semakin kecil jarak ke horison, menunjukkan kekuatan gravitasi yang lebih besar di dekat horison lubang hitam (Psaltis, 2024).

Hukum Pertama Termodinamika

Hukum Pertama Termodinamika adalah sebuah pernyataan tentang konservasi energi dalam fisika, yang dinyatakan dalam konteks lubang hitam sebagai berikut (Bokulić et al., 2021):

$$dM = \frac{1}{8\pi} \kappa_H dA + \Omega_H dJ + \Phi_H dQ \quad (5)$$

Di mana (dM) adalah perubahan total massa lubang hitam, $\{(1/8\pi)\kappa_H dA\}$ adalah perubahan energi karena perubahan luas area horison peristiwa lubang hitam, $(\Omega_H dJ)$ adalah perubahan energi karena perubahan momentum sudut total, $(\Phi_H dQ)$ adalah perubahan energi karena perubahan muatan listrik total, (κ_H) adalah gravitasi permukaan lubang hitam, (Ω_H) adalah kecepatan sudut horison lubang hitam, (Φ_H) adalah potensial listrik horison lubang hitam, (A)

adalah luas area horison peristiwa lubang hitam, (M) adalah massa total lubang hitam, (J) adalah momentum sudut total lubang hitam, dan (Q) adalah muatan listrik total lubang hitam. Luas area horison peristiwa lubang hitam, (A), adalah fungsi dari (M), (J), dan (Q). Kita dapat menyatakan ($A = A(M, J, Q)$).

Karena kita ingin memahami perubahan energi dalam konteks perubahan massa, area, momentum sudut, dan muatan listrik lubang hitam, kita akan menggunakan diferensial parsial untuk mengekspresikan perubahan ini.

$$dM = \frac{1}{8\pi} \kappa_H dA + \Omega_H dJ + \Phi_H dQ \quad (6)$$

Kita dapat melakukan penurunan eksak dalam hal (M), (A), (J), dan (Q). Perubahan massa total lubang hitam, (dM):

$$dM = \frac{\partial M}{\partial A} dA + \frac{\partial M}{\partial J} dJ + \frac{\partial M}{\partial Q} dQ \quad (7)$$

Perubahan luas area horison peristiwa lubang hitam, (dA):

$$dA = \frac{\partial A}{\partial M} dM + \frac{\partial A}{\partial J} dJ + \frac{\partial A}{\partial Q} dQ \quad (8)$$

Perubahan momentum sudut total, (dJ):

$$dJ = \frac{\partial J}{\partial M} dM + \frac{\partial J}{\partial A} dA + \frac{\partial J}{\partial Q} dQ \quad (9)$$

Perubahan muatan listrik total, (dQ):

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial M} dM + \frac{\partial Q}{\partial A} dA + \frac{\partial Q}{\partial J} dJ \quad (10)$$

Kita dapat menggabungkan persamaan di atas dengan persamaan hukum pertama termodinamika. Dengan melakukan substitusi, penggabungan, dan penyelesaian, kita dapat memperoleh persamaan lengkap untuk perubahan energi dalam konteks lubang hitam.

Hukum Kedua Termodinamika

Teorema ini menyatakan bahwa luas area horison peristiwa sebuah lubang hitam, dilambangkan dengan (A), tidak pernah berkurang, atau dapat dirumuskan sebagai (Zhao & Xu, 2023):

$$\delta A \geq 0 \quad (11)$$

Di mana (δA) adalah perubahan luas area dan (≥ 0) menunjukkan bahwa luas area tidak pernah berkurang. Syarat energi lemah harus terpenuhi. Dalam termodinamika konvensional, entropi sebuah sistem, dilambangkan dengan (S), tidak pernah berkurang (Floerchinger & Haas, 2020). Dari teorema Hawking dan hukum entropi, terdapat identifikasi yang kuat antara luas kawah (A) dengan entropi (S) (Caceres et al., 2022). Terdapat hubungan antara entropi dan informasi. Kita dapat menyatakan bahwa satu bit informasi per partikel subatomik dengan massa (m) setara dengan (k_B) (konstanta Boltzmann), di mana (k_B) adalah konstanta Boltzmann (Vopson, 2022).

Kita dapat menyatakan bahwa entropi (S) dari sistem terkait dengan luas area horison peristiwa lubang hitam (A). Kita juga memiliki hubungan antara entropi dan informasi. Dari teorema Hawking, kita tahu bahwa luas area horison lubang hitam tidak berkurang. Sementara itu, kita tahu bahwa entropi sistem tidak berkurang:

$$\delta S \geq 0 \quad (12)$$

Hubungan antara entropi dan informasi adalah:

$$S = k_B \times \ln(W) \quad (13)$$

Di mana (W) adalah jumlah kemungkinan mikro (jumlah keadaan mikroskopis) sistem. Kemudian, kita bisa merumuskan kembali sebagai:

$$\delta S = k_B \times \ln(W) \quad (14)$$

Jadi, untuk kedua sistem (luas area horison dan entropi), perubahan entropi tidak pernah negatif. Diberikan bahwa entropi (S_{bh}) dari lubang hitam dengan massa (M) diberikan oleh:

$$S_{bh} \sim \frac{Mk_B}{m} \quad (15)$$

di mana (k_B) adalah konstanta Boltzmann dan (m) adalah massa partikel yang membentuk lubang hitam. Batas bawah entropi saat massa (M) mendekati nol ($M \rightarrow 0$) dapat ditemukan dengan mempertimbangkan bahwa panjang gelombang Compton dari partikel penyusun harus kurang dari atau sama dengan radius lubang hitam (r_g). Panjang gelombang Compton (λ) dari sebuah partikel dengan massa (m) diberikan oleh:

$$\lambda = \frac{h}{mc} \quad (16)$$

di mana (h) adalah konstanta Planck, dan (c) adalah kecepatan cahaya dalam vakum. Radius Schwarzschild (r_g) dari lubang hitam dengan massa (M) diberikan oleh rumus:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} \quad (17)$$

di mana (G) adalah konstanta gravitasi Newton. Dalam hal ini, kita akan menggunakan hubungan antara panjang gelombang Compton dan radius Schwarzschild untuk menemukan batas bawah entropi. Dari definisi, kita tahu bahwa panjang gelombang Compton harus kurang dari atau sama dengan radius Schwarzschild:

$$\lambda \leq r_g \quad (18)$$

Substitusi (λ) dan (r_g), serta definisi entropi ke dalam persamaan. Memperhitungkan semua informasi di atas, kita bisa menyusun perhitungan matematis lebih lanjut untuk memperkirakan entropi minimum dari lubang hitam saat massa mendekati nol. Dari persamaan panjang gelombang Compton:

$$\lambda = \frac{h}{mc} \quad (19)$$

Dan persamaan radius Schwarzschild:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} \quad (20)$$

Kita ingin ($\lambda \leq r_g$), sehingga:

$$\frac{h}{mc} \leq \frac{2GM}{c^2} \quad (21)$$

Kita bisa membagi kedua sisi dengan (h) dan mengalikan dengan (mc), sehingga:

$$mc^2 \leq \frac{2GMh}{c} \quad (22)$$

Kita tahu (mc^2) adalah energi total dari partikel. Sekarang, kita bisa menggunakan relasi Einstein ($E = mc^2$) dan mengganti (mc^2) dengan (E), sehingga:

$$E \leq \frac{2GMh}{c} \quad (23)$$

Entropi minimum dari lubang hitam adalah (S_{min}), dengan substitusi kita mendapatkan:

$$S_{min} = \frac{E}{T} \leq \frac{2GMh}{c^3 T} \quad (24)$$

Di mana (T) adalah suhu lubang hitam. Karena $S_{bh} \sim (Mk_B / m)$, dan kita ingin menemukan batas bawah entropi saat ($M \rightarrow 0$), kita bisa menggunakan hubungan ini untuk mencari batas bawah entropi. Kita mendapatkan bahwa batas bawah entropi lubang hitam saat ($M \rightarrow 0$) adalah:

$$S_{min} \sim \frac{Mk_B}{m} \leq \frac{2GMh}{c^3 T} \quad (25)$$

Ini adalah pendekatan untuk menghitung entropi minimum dari lubang hitam saat massa mendekati nol dengan mempertimbangkan panjang gelombang Compton dan radius Schwarzschild (Spallucci & Smailagic, 2021). Bekenstein menemukan bahwa entropi maksimum dari lubang hitam dapat dinyatakan sebagai:

$$S_{\max} \approx \frac{M^2 k_B}{\hbar} \quad (26)$$

di mana (S_{\max}) adalah entropi maksimum lubang hitam. (M) adalah massa lubang hitam. (k_B) adalah konstanta Boltzmann. (\hbar) adalah konstanta Planck yang direduksi. Bekenstein juga mengajukan konsep bahwa entropi lubang hitam berhubungan dengan luas permukaan lubang hitam, dengan (A) merupakan luas permukaan lubang hitam. Oleh karena itu, (S_{\max}) juga dapat diekspresikan sebagai ($k_B A$).

Pada tahun 1975, Stephen Hawking dan Bryce DeWitt mengembangkan mekanika kuantum lubang hitam (Christensen, 2022). Salah satu temuan terpenting Hawking adalah bahwa lubang hitam dapat mengeluarkan radiasi termal yang dikenal sebagai Radiasi Hawking (Almeida, 2021). Radiasi ini menyiratkan bahwa lubang hitam bukanlah "objek hitam" yang sepenuhnya menyerap segala sesuatu, tetapi sebaliknya, lubang hitam dapat memancarkan energi dan kehilangan massa seiring waktu (Andrews, 2023).

Untuk menghitung entropi maksimum lubang hitam, kita dapat menggunakan rumus yang diberikan oleh Bekenstein (Bousso, 2020). Sementara Hawking dan DeWitt menunjukkan bahwa lubang hitam memiliki entropi, radiasi, dan perilaku mekanika kuantum yang kompleks (Giddings, 2023). Mereka menemukan bahwa radiasi Hawking dari lubang hitam menyiratkan bahwa lubang hitam memiliki suhu tertentu dan bahwa lubang hitam memiliki entropi (Hollowood et al., 2020). Kemudian, entropi lubang hitam dapat dihubungkan dengan luas permukaan lubang hitam melalui konsep yang diperkenalkan oleh Bekenstein, yaitu ($S_{\max} = k_B A$). Entropi lubang hitam dapat dinyatakan dalam dua bentuk, tergantung pada bagaimana luas permukaan lubang hitam (A) diungkapkan. Misalkan kita menggunakan luas permukaan lubang hitam (A) yang diekspresikan dalam bentuk:

$$A = 4\pi r^2 \quad (27)$$

di mana (r) adalah radius lubang hitam. Maka kita bisa menulis ulang rumus entropi lubang hitam menjadi:

$$S_{bh} = \frac{1}{4} k_B \frac{c^3 \cdot 4\pi r^2}{G\hbar} \quad (28)$$

$$S_{bh} = \frac{k_B \pi c^3 r^2}{G \hbar} \quad (29)$$

Suhu lubang hitam dinyatakan dalam bentuk percepatan gravitasi pada horison lubang hitam (κ_H). Percepatan gravitasi pada horison lubang hitam dapat dihubungkan dengan suhu lubang hitam melalui rumus:

$$\kappa_H = \frac{1}{2} \frac{dA}{dr} \Big|_{r=r_H} \quad (30)$$

di mana (r_H) adalah radius horison lubang hitam. Jika ($A = 4\pi r_H^2$), maka $dA/dr = 8\pi r_H$. Sehingga, kita dapat menulis:

$$\kappa_H = \frac{1}{2} \times 8\pi r_H = 4\pi r_H \quad (31)$$

Kemudian, suhu lubang hitam (T_{bh}) dapat dituliskan sebagai:

$$T_{bh} = \frac{\hbar \cdot 4\pi r_H}{2\pi c k_B} = \frac{\hbar \kappa_H}{2\pi c k_B} \quad (32)$$

Jadi, entropi lubang hitam diwakili oleh (S_{bh}) dan suhu lubang hitam diwakili oleh (T_{bh}) seperti yang telah dijelaskan di atas. Perhitungan tersebut melibatkan konstanta fisika yang penting seperti konstanta Boltzmann (k_B), kecepatan cahaya (c), konstanta gravitasi Newton (G), dan konstanta Planck yang direduksi (\hbar). Perhitungan ini memperkuat hubungan antara fenomena lubang hitam dan konsep-konsep penting dalam fisika modern. Adapun $\delta S_{bh} \geq 0$, adalah dari kedua hukum termodinamika yang penting:

Pertama, bahwa dalam setiap proses alamiah, entropi sebuah sistem terisolasi atau tertutup akan meningkat atau setidaknya tetap konstan ($\delta S_{\text{universe}} \geq 0$), dan kedua, bahwa perubahan entropi dari lubang hitam (δS_{bh}) selalu non-negatif (Etesi, 2024). Kita dapat mengekspresikan entropi dari sebuah lubang hitam dalam termologi termodinamika sebagai:

$$S_{bh} = \frac{kA}{4l_p^2} \quad (32)$$

di mana (S_{bh}) adalah entropi lubang hitam, (k) adalah konstanta Boltzmann, (A) adalah luas permukaan lubang hitam, dan (l_p) adalah panjang Planck. Kita dapat mengekspresikan perubahan entropi dari lubang hitam sebagai:

$$\delta S_{bh} = \frac{k}{4l_p^2} \delta A \quad (33)$$

di mana (δA) adalah perubahan area lubang hitam. Kemudian, kita ingin menunjukkan bahwa ($\delta S_{bh} \geq 0$), yang menunjukkan bahwa entropi lubang hitam selalu non-negatif. Karena (δA) adalah perubahan area, kita bisa menyatakan (δA) dalam term-perubahan massa (δM) menggunakan rumus Hawking, yang menyatakan bahwa lubang hitam bisa menyusut karena efek quantum di mana mereka mengeluarkan partikel. Rumusnya adalah:

$$\delta M = \frac{\hbar}{2c^2} \delta A \quad (34)$$

di mana (\hbar) adalah konstanta Planck tereduksi, dan (c) adalah kecepatan cahaya dalam vakum. Kemudian, kita bisa tuliskan ulang (δS_{bh}) menggunakan rumus Hawking sebagai:

$$\delta S_{bh} = \frac{k}{4l_p^2} \frac{2c^2}{\hbar} \delta M \quad (35)$$

Karena ($k / 4l_p^2$), ($2c^2 / \hbar$), dan (δM) semuanya adalah nilai positif, maka (δS_{bh}) akan non-negatif, atau ($\delta S_{bh} \geq 0$). Ini mengkonfirmasi bahwa lubang hitam tidak bisa kehilangan entropi, yang sesuai dengan hukum kedua termodinamika. Entropi materi biasa dapat dihitung menggunakan rumus termodinamika umum:

$$S_m = -k \sum_i P_i \ln(P_i) \quad (36)$$

Di mana (k) adalah konstanta Boltzmann. (P_i) adalah probabilitas keadaan ke- i . Entropi lubang hitam dinyatakan oleh rumus Bekenstein-Hawking:

$$S_{bh} = \frac{A}{4G} \quad (37)$$

Di mana (A) adalah luas permukaan lubang hitam. (G) adalah konstanta gravitasi. Entropi total adalah jumlah entropi materi biasa dan entropi lubang hitam:

$$S_{\text{tot}} = S_m + S_{\text{bh}} \quad (38)$$

Hukum Ketiga Termodinamika

Hukum ketiga termodinamika menyatakan bahwa "saat suhu suatu sistem mendekati nol mutlak (0 K), entropi sistem tersebut mendekati nilai minimumnya yang dapat dicapai" (Hsiang & Hu, 2021). Dengan kata lain, hukum ini menyatakan bahwa tidak mungkin mencapai suhu mutlak nol dengan cara apapun selain dengan menghabiskan waktu tak terbatas (Taranto et al., 2021). Secara simbolis, hukum ini dapat dirumuskan sebagai:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0 \quad (39)$$

di mana (S) adalah entropi sistem dan (T) adalah suhu dalam kelvin. Entropi adalah ukuran ketidakteraturan atau kekacauan dalam suatu sistem. Semakin tinggi entropi, semakin besar ketidakteraturan sistem tersebut. Suhu adalah ukuran rata-rata energi kinetik partikel-partikel dalam suatu sistem. Suhu diukur dalam kelvin. Sekarang, kita akan menjelaskan mengapa hukum ketiga termodinamika menyatakan bahwa tidak mungkin mencapai suhu mutlak nol (0 K) secara fisik dengan cara apapun selain melalui waktu tak terbatas.

Pertama-tama, kita akan memperkenalkan konsep "Fungsi Partisi" (Z), yang digunakan dalam mekanika statistik untuk menggambarkan distribusi energi di antara partikel-partikel sistem. Fungsi partisi didefinisikan sebagai:

$$Z = \sum_i e^{-\beta E_i} \quad (40)$$

di mana (E_i) adalah energi partikel ke-(i), dan ($\beta = 1/k_B T$) dengan (k_B) adalah konstanta Boltzmann. Dengan menggunakan fungsi partisi, kita dapat mengekspresikan entropi sebagai:

$$S = k_B \ln(Z) + \frac{U}{T} \quad (41)$$

di mana (U) adalah energi internal sistem. Sekarang, kita dapat melihat bagaimana entropi mendekati nol saat suhu mendekati nol mutlak:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = \lim_{T \rightarrow 0} k_B \ln(Z) + \lim_{T \rightarrow 0} \frac{U}{T} \quad (42)$$

Ketika suhu mendekati nol, suhu di denominatormu mendekati nol, dan menyebabkan entropi mendekati nol. Namun, proses ini hanya dapat dicapai dalam batas tak terhingga waktu, sehingga hukum ketiga termodinamika menyatakan bahwa hal ini "fisik tidak mungkin" dilakukan. Dengan kata lain, tidak mungkin mencapai suhu mutlak nol dalam jumlah waktu yang terbatas menggunakan proses fisik alamiah.

D. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, penyatuan konstanta fisika sebagai satu entitas terbukti krusial dalam menyederhanakan analisis fisika modern. Melalui pengaturan kecepatan cahaya, konstanta gravitasi, konstanta Planck, dan konstanta Boltzmann menjadi satu, perhitungan menjadi lebih sederhana, memungkinkan pendekatan analisis yang lebih intuitif. Dalam teori relativitas, penggunaan kecepatan cahaya sebagai satuan dasar mempermudah perbandingan kecepatan objek dengan kecepatan cahaya, sementara penyatuan konstanta gravitasi G menyederhanakan perhitungan dalam relativitas umum.

Penelitian ini mengaplikasikan prinsip-prinsip termodinamika, seperti Hukum Nol, Hukum Pertama, Hukum Kedua, dan Hukum Ketiga, dalam konteks lubang hitam stasioner. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan konstanta gravitasi permukaan pada horison lubang hitam menjadikan gaya gravitasi di horison tersebut konstan, sesuai dengan Hukum Nol Termodinamika. Dengan menerapkan Hukum Pertama Termodinamika, penelitian ini menggambarkan perubahan energi lubang hitam sehubungan dengan massa, area horison, momentum sudut, dan muatan listrik, menghasilkan persamaan matematis yang melibatkan konstanta-konstanta fisika utama.

Penelitian ini mengaitkan Hukum Kedua Termodinamika dengan lubang hitam, menunjukkan bahwa entropi lubang hitam selalu non-negatif. Dengan merumuskan entropi lubang hitam dalam kaitannya dengan luas permukaan lubang hitam, penelitian ini memperkuat hubungan antara fenomena lubang hitam dan konsep-konsep termodinamika. Terakhir, melalui penerapan Hukum Ketiga Termodinamika, penelitian ini membahas mengapa mencapai suhu mutlak nol (0 K) dalam jumlah waktu yang terbatas adalah fisik tidak mungkin, dengan mendalam mengintegrasikan konsep fungsi partisi, energi internal sistem, dan entropi.

D. DAFTAR PUSTAKA

- Almeida, C. R. (2021). The thermodynamics of black holes: From Penrose process to Hawking radiation. *The European Physical Journal H*, 46(1), 20.
- Alonso-Serrano, A., & Liška, M. (2020). Quantum phenomenological gravitational dynamics: A general view from thermodynamics of spacetime. *Journal of High Energy Physics*, 2020(12), 1–31.
- Andrews, S. S. (2023). Thermal Radiation. In *Light and Waves: A Conceptual Exploration of Physics* (pp. 307–328). Springer.
- Barceló, C., Boyanov, V., Carballo-Rubio, R., & Garay, L. J. (2021). Black hole inner horizon evaporation in semiclassical gravity. *Classical and Quantum Gravity*, 38(12), 125003.
- Bokulić, A., Smolić, I., & Jurić, T. (2021). Black hole thermodynamics in the presence of nonlinear electromagnetic fields. *Physical Review D*, 103(12), 124059.
- Born, M. (1962). *Einstein's theory of relativity*. Courier Corporation.
- Bousso, R. (2020). Black hole entropy and the Bekenstein bound. In *JACOB BEKENSTEIN: The Conservative Revolutionary* (pp. 139–158). World Scientific.
- Braun, D., Schneider, F., & Fischer, U. R. (2017). Intrinsic measurement errors for the speed of light in vacuum. *Classical and Quantum Gravity*, 34(17), 175009.
- Caceres, E., Kundu, A., Patra, A., & Shashi, S. (2022). Page curves and bath deformations. *SciPost Physics Core*, 5(2), 033.
- Christensen, S. M. (2022). Working with Mike. *Proceedings of the Royal Society A*, 478(2259), 20220168.
- Etesi, G. (2024). A Set-Theoretic Analysis of the Black Hole Entropy Puzzle. *Foundations of Physics*, 54(1), 10.
- Floerchinger, S., & Haas, T. (2020). Thermodynamics from relative entropy. *Physical Review E*, 102(5), 052117.
- Gavassino, L. (2020). The zeroth law of thermodynamics in special relativity. *Foundations of Physics*, 50(11), 1554–1586.
- Giddings, S. B. (2023). A 'black hole theorem,' and its implications. *Classical and Quantum Gravity*, 40(8), 085002.
- Hollowood, T. J., Kumar, S. P., & Legramandi, A. (2020). Hawking radiation correlations of evaporating black holes in JT gravity. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 53(47), 475401.

- Hsiang, J.-T., & Hu, B.-L. (2021). Zeroth law in quantum thermodynamics at strong coupling: In equilibrium, not at equal temperature. *Physical Review D*, *103*(8), 085004.
- Kembhavi, A., Khare, P., Kembhavi, A., & Khare, P. (2020). Gravity: The Force that Governs the Universe. *Gravitational Waves: A New Window to the Universe*, 33–54.
- Magueijo, J. (2011). *Faster than the speed of light: The story of a scientific speculation*. Random House.
- Pound, A., & Wardell, B. (2022). Black hole perturbation theory and gravitational self-force. *Handbook of Gravitational Wave Astronomy*, 1–119.
- Psaltis, D. (2024). Black holes in classical general relativity and beyond. In *The Encyclopedia of Cosmology: Set 2: Frontiers in Cosmology Volume 3 Black Holes* (pp. 1–25). World Scientific.
- Spallucci, E., & Smailagic, A. (2021). Horizons and the wave function of Planckian quantum black holes. *Physics Letters B*, *816*, 136180.
- Talkner, P., & Hänggi, P. (2020). Colloquium: Statistical mechanics and thermodynamics at strong coupling: Quantum and classical. *Reviews of Modern Physics*, *92*(4), 041002.
- Taranto, P., Bakhshinezhad, F., Bluhm, A., Silva, R., Friis, N., Lock, M. P., Vitagliano, G., Binder, F. C., Debarba, T., & Schwarzhans, E. (2021). Landauer vs. Nernst: What is the true cost of cooling a quantum system? *arXiv Preprint arXiv:2106.05151*.
- Vagnozzi, S., Roy, R., Tsai, Y.-D., Visinelli, L., Afrin, M., Allahyari, A., Bambhaniya, P., Dey, D., Ghosh, S. G., & Joshi, P. S. (2022). Horizon-scale tests of gravity theories and fundamental physics from the Event Horizon Telescope image of Sagittarius A. *Classical and Quantum Gravity*.
- Volonteri, M., Habouzit, M., & Colpi, M. (2021). The origins of massive black holes. *Nature Reviews Physics*, *3*(11), 732–743.
- Vopson, M. M. (2022). Experimental protocol for testing the mass–energy–information equivalence principle. *AIP Advances*, *12*(3).
- Zhao, L., & Xu, Z. (2023). Destroying the event horizon of a rotating black-bounce black hole. *The European Physical Journal C*, *83*(10), 938.