

TERMODINAMIKA LUBANG HITAM: HUKUM PERTAMA DAN KEDUA SERTA PERSAMAAN ENTROPI

¹Ruben Cornelius Siagian*, ²Lulut Alfaris, ³Arip Nurahman, ⁴Eko Pramesti Sumarto

¹Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan, Medan, Sumatera Utara, Indonesia,

²Departemen Teknologi Kelautan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Pangandaran, Pangandaran, Jawa Barat, Indonesia,

³Department of Physics Education, Faculty of Applied Science and Science, Indonesian Institute of Education, Garut, West Java Indonesia,

⁴SMA Muhammadiyah 3 Genteng Banyuwangi, Indonesia.

e-mail korespondensi^{*1}: rubensiagian775@gmail.com,

Diterima 12 Maret 2023

Disetujui 5 Mei 2023

Dipublikasikan 11 Mei 2023

<https://doi.org/10.33369/jkf.6.1.1-10>

ABSTRAK

Artikel ini membahas konsep termodinamika yang berlaku pada Lubang Hitam, yaitu hukum termodinamika pertama dan kedua. Hukum pertama termodinamika menghubungkan perubahan massa dengan perubahan entropi dan kerja, memungkinkan Lubang Hitam diperlakukan sebagai sistem termodinamika dengan suhu dan entropi. Hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa entropi suatu sistem terisolasi dalam kesetimbangan termodinamika selalu meningkat atau tetap konstan, termasuk untuk Lubang Hitam. Metode penulisan yang digunakan dalam artikel ini melibatkan derivasi matematis untuk entropi Lubang Hitam, dengan menggabungkan hukum kedua termodinamika dan konsep termodinamika Lubang Hitam, di mana entropi dapat dinyatakan sebagai fungsi luas cakrawala peristiwa. Artikel ini menyoroti pentingnya konsep entropi dan termodinamika Lubang Hitam dalam memahami alam semesta, serta penerapannya di berbagai bidang sains.

Kata kunci—Lubang Hitam, Termodinamika, Entropi, Hukum pertama termodinamika, Hukum kedua termodinamika

ABSTRACT

This article delves into the concepts of thermodynamics that apply to Lubang Hitams, namely the first and second laws of thermodynamics. The first law of thermodynamics connects changes in mass with changes in entropy and work, allowing Lubang Hitams to be treated as thermodynamic systems with temperature and entropy. The second law of thermodynamics states that the entropy of an isolated system in thermodynamic equilibrium always increases or remains constant, including for Lubang Hitams. The writing approach employed in this article involves mathematical derivations for Lubang Hitam entropy, combining the second law of thermodynamics with the concept of Lubang Hitam thermodynamics, where entropy can be expressed as a function of the event horizon's surface area. This article highlights the significance of entropy and Lubang Hitam thermodynamics in understanding the universe, as well as their applications in various scientific fields.

Keywords—Lubang Hitam, Thermodynamics, Entropy, First law of thermodynamics, Second law of thermodynamics

I. PENDAHULUAN

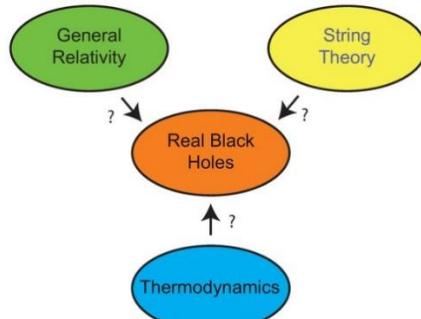
Lubang Hitam adalah suatu objek astronomi yang memiliki massa yang sangat besar dan sangat padat, sehingga gravitasi yang dihasilkan sangat kuat, sehingga bahkan cahaya tidak dapat lepas dari tarikan gravitasinya (1,2). Lubang Hitam terbentuk ketika bintang yang sangat besar mengalami ledakan supernova, yang mengakibatkan inti bintang yang tersisa menjadi sangat padat dan menghasilkan gravitasi yang sangat kuat (3,4).

Perlu dipelajari termodinamika Lubang Hitam karena termodinamika memungkinkan untuk memahami sifat-sifat fisika dari Lubang Hitam. Melalui konsep termodinamika dapat menggambarkan Lubang Hitam sebagai suatu sistem termodinamika yang memiliki entropi, temperatur, dan energi (5). Dalam konteks Lubang Hitam, termodinamika memungkinkan untuk memperkirakan suhu dan entropi Lubang Hitam, serta mengeksplorasi konsep-konsep seperti hukum kedua termodinamika dan kerapatan entropi.

Selain itu, melalui kajian termodinamika Lubang Hitam dapat mempelajari hubungan antara termodinamika dan gravitasi, yang dapat membantu memperdalam pemahaman tentang sifat-sifat gravitasi dan struktur alam semesta (6). Oleh karena itu, mempelajari termodinamika Lubang Hitam penting untuk memahami sifat-sifat fisika yang mendasar dari objek paling misterius dan paling menarik di alam semesta.

Dalam *paper* ini membahas mengenai termodinamika Lubang Hitam, yaitu sebuah bidang studi yang mempelajari hubungan antara termodinamika dan Lubang Hitam. Dalam *paper* ini, akan menjelaskan konsep-konsep termodinamika yang digunakan dalam termodinamika Lubang Hitam, serta memberikan tinjauan singkat tentang penelitian terkait yang telah dilakukan dalam bidang ini. Selain itu, *paper* ini juga akan membahas implikasi dari temuan-temuan termodinamika Lubang Hitam terhadap pemahaman tentang sifat-sifat dasar alam semesta, seperti hukum kedua termodinamika dan hukum gravitasi.

Dalam *paper* ini, akan dibahas secara mendalam tentang konsep entropi Lubang Hitam dan bagaimana konsep ini muncul dalam kaitannya dengan termodinamika. Selain itu, hukum termodinamika Lubang Hitam yang penting dalam memahami sifat-sifat Lubang Hitam juga akan dijelaskan secara detail dalam *paper* ini. Tujuan dari *paper* ini adalah untuk memberikan pemahaman yang lebih jelas dan komprehensif tentang hubungan antara termodinamika dan Lubang Hitam, serta pentingnya memahami sifat-sifat Lubang Hitam dalam konteks termodinamika.



Gambar 1. Hubungan Relativitas umum, Teori string, dan Termodinamika dalam domain Lubang hitam
Sumber: Ruppeiner (7)

Teori string adalah salah satu teori fisika yang mencoba untuk memahami dan menyatukan semua fenomena fisika yang terjadi di alam semesta, termasuk juga gravitasi yang dijelaskan oleh teori relativitas umum Einstein (8). Dalam konteks Lubang Hitam, teori relativitas umum dan teori termodinamika juga diperlukan untuk memahami sifat-sifat termodinamika Lubang Hitam seperti entropi dan temperatur (9–11).

Dalam fisika, terdapat dua teori besar yang saling bertentangan: teori relativitas umum dan mekanika kuantum (12). Namun, ketika diterapkan pada Lubang Hitam, kedua teori ini saling melengkapi dan menghasilkan beberapa aspek yang menarik seperti hukum kedua termodinamika dan sifat-sifat termodinamika Lubang Hitam seperti entropi, temperatur, dan radiasi Hawking. Dalam penelitian ini, teori string juga dipelajari sebagai alternatif untuk menggabungkan teori relativitas umum dan mekanika kuantum (13).

Pemahaman tentang termodinamika Lubang Hitam dapat memberikan wawasan yang lebih baik tentang sifat-sifat Lubang Hitam, seperti entropi dan suhu, yang dapat membantu dalam memahami bagaimana Lubang Hitam berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya (6). Selain itu, pemahaman tentang termodinamika Lubang Hitam dapat membantu dalam mempelajari hubungan antara Lubang Hitam dan fisika kuantum, yang pada akhirnya dapat memberikan kontribusi besar dalam

pemahaman cara kerja alam semesta secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian termodinamika Lubang Hitam sangat penting untuk memperdalam pemahaman tentang alam semesta.

Research gap dalam *paper* ini adalah bahwa meskipun termodinamika Lubang Hitam telah menjadi subjek yang cukup populer dalam fisika teoritis, masih ada banyak aspek yang belum sepenuhnya dipahami dan diteliti secara mendalam. Beberapa penelitian terkait termodinamika Lubang Hitam telah dilakukan sebelumnya, tetapi masih banyak yang harus dijelaskan dan dipelajari, seperti aspek-aspek termodinamika yang lebih kompleks dan implikasi teori fisika kuantum pada Lubang Hitam. Oleh karena itu, *paper* ini bertujuan untuk memberikan pemahaman sebagai pondasi tentang termodinamika Lubang Hitam dan memperdalam pemahaman tentang alam semesta melalui artikel ini.

Paper ini membahas sejumlah inovasi dalam termodinamika Lubang Hitam. Salah satu konsep utama yang dibahas adalah penggambaran Lubang Hitam sebagai sistem termodinamika. Dalam paper ini, akan dijelaskan konsep-konsep termodinamika yang digunakan untuk menggambarkan Lubang Hitam sebagai sistem termodinamika yang memiliki entropi, temperatur, dan energi. Konsep ini memberikan pemahaman yang lebih luas tentang sifat-sifat fisik Lubang Hitam dan interaksi Lubang Hitam dengan lingkungan sekitarnya. Selain itu, paper ini membahas secara mendalam tentang konsep entropi Lubang Hitam, yang merupakan konsep termodinamika penting dalam memahami Lubang Hitam. Entropi Lubang Hitam terkait erat dengan area permukaan event horizon, yang merupakan batas di mana cahaya tidak dapat lepas dari tarikan gravitasi Lubang Hitam. Konsep ini memberikan pemahaman baru tentang bagaimana Lubang Hitam memiliki entropi dan bagaimana entropi ini terkait dengan sifat-sifat Lubang Hitam lainnya.

Paper ini juga membahas hukum termodinamika Lubang Hitam, yang sangat penting dalam memahami sifat-sifat Lubang Hitam. Salah satu hukum termodinamika yang dibahas adalah hukum kedua termodinamika, yang mengaitkan peningkatan entropi dengan peningkatan area permukaan event horizon Lubang Hitam. Pemahaman tentang hukum termodinamika Lubang Hitam dapat membantu dalam memahami perubahan energi, suhu, dan entropi Lubang Hitam dalam berbagai proses fisik yang terjadi di sekitarnya.

Selain itu, paper ini juga membahas implikasi temuan-temuan termodinamika Lubang Hitam terhadap pemahaman tentang alam semesta. Pemahaman tentang termodinamika Lubang Hitam dapat memberikan wawasan baru tentang bagaimana Lubang Hitam berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya dan bagaimana Lubang Hitam mempengaruhi struktur alam semesta secara keseluruhan. Hal ini sangat penting untuk memahami sifat dasar alam semesta, seperti hukum kedua termodinamika dan hukum gravitasi. Oleh karena itu, paper ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan ilmu pengetahuan tentang Lubang Hitam dan alam semesta secara keseluruhan.

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam *paper* ini adalah penelitian deskriptif. Penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data dari berbagai sumber, termasuk jurnal ilmiah, buku, dan artikel terkait termodinamika Lubang Hitam. Penelitian ini akan mencoba untuk memahami konsep-konsep termodinamika yang berkaitan dengan Lubang Hitam dan melihat bagaimana teori fisika kuantum dapat diterapkan pada Lubang Hitam. Selain itu, penelitian ini juga akan membahas implikasi temuan termodinamika Lubang Hitam terhadap pemahaman tentang sifat-sifat dasar alam semesta. Hal ini akan dilakukan dengan merujuk pada penelitian terkait termodinamika Lubang Hitam yang telah dilakukan sebelumnya dan mengevaluasi kontribusi mereka dalam memperdalam pemahaman tentang sifat-sifat Lubang Hitam dalam konteks termodinamika dan fisika kuantum.

Dalam penelitian ini, penulis akan menggunakan pendekatan kualitatif dalam menganalisis data dan membahas temuan-temuan. Penelitian ini akan mengumpulkan data dari berbagai sumber dan melakukan analisis kritis untuk memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang termodinamika Lubang Hitam dan implikasi teori fisika kuantum pada Lubang Hitam (14). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan pemahaman yang lebih lengkap dan komprehensif tentang termodinamika Lubang Hitam dan pentingnya memahami sifat-sifat Lubang Hitam dalam konteks termodinamika

dan fisika kuantum untuk memperdalam pemahaman tentang alam semesta secara keseluruhan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

3.1.1 Hukum Termodinamika Pertama

Persamaan termodinamika pertama untuk Lubang Hitam dapat dijelaskan secara matematis sebagai berikut (15):

$$dM = TdS + W \quad (1)$$

dalam persamaan ini, dM adalah perubahan massa Lubang Hitam, T adalah suhu Lubang Hitam, dS adalah perubahan entropi Lubang Hitam, dan W adalah kerja yang dilakukan pada Lubang Hitam. Kerja W yang dilakukan pada Lubang Hitam dapat dinyatakan sebagai (16):

$$W = FdR = \left(\frac{c^4}{4G} \right) AdR \quad (2)$$

di mana F adalah gaya, R adalah jarak dari horizon peristiwa, dan A adalah luas permukaan horizon peristiwa Lubang Hitam. Persamaan ini dapat dihasilkan dengan mengintegrasikan gaya pada jarak R dari horizon peristiwa, dan menggunakan rumus area permukaan Lubang Hitam $A = 4\pi R^2$. Selanjutnya, dS , perubahan entropi Lubang Hitam dapat dinyatakan sebagai (17):

$$dS = \left(\frac{dM}{T} \right) - \left(\frac{W}{T} \right) \quad (3)$$

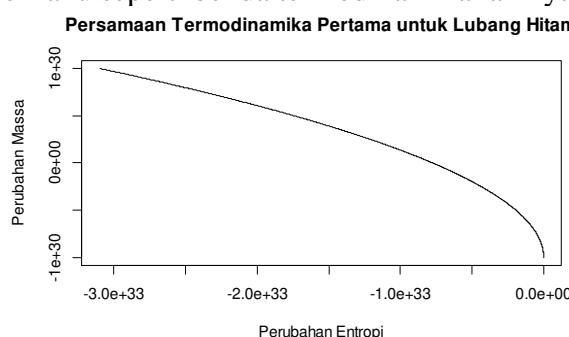
dengan menggunakan persamaan sebelumnya untuk W dan persamaan suhu Lubang Hitam $T = \frac{(\hbar c^3)}{(8\pi GMk)}$. Menggabungkan persamaan-persamaan ini menghasilkan:

$$dM = TdS + W \quad (4)$$

Atau

$$dM = \left(\frac{\hbar c^3}{8\pi GMk} \right) dS + \left(\frac{c^4}{4G} \right) AdR \quad (5)$$

Ini adalah persamaan termodinamika pertama untuk Lubang Hitam, yang menghubungkan perubahan massa dengan perubahan entropi dan kerja. Persamaan ini menunjukkan bahwa Lubang Hitam dapat diperlakukan sebagai sistem termodinamika yang memiliki suhu dan entropi, dan bahwa Lubang Hitam berperilaku seperti benda termodinamika lainnya (15).



Gambar 2. Simulasi grafik persamaan termodinamika pertama untuk Lubang Hitam (Skala adalah contoh)

Sumber: Ruben siagian dalam pemrograman R, 2023

3.1.2 Hukum termodinamika kedua

Hukum termodinamika kedua menyatakan bahwa entropi dari sebuah sistem terisolasi yang berada dalam kesetimbangan termodinamika tidak akan pernah berkurang (18). Dalam konteks Lubang Hitam, entropi dapat dianggap sebagai ukuran dari banyaknya informasi atau ketidakpastian tentang kondisi di dalam Lubang Hitam (19). Secara matematis, hukum termodinamika kedua dapat dinyatakan sebagai:

$$dS \geq 0 \quad (6)$$

di mana dS adalah perubahan dalam entropi sistem. Artinya, perubahan entropi selalu tidak negatif atau sama dengan nol, yang berarti entropi selalu meningkat atau tidak berkurang. Dalam hal Lubang Hitam, hal ini berarti bahwa jika menambahkan massa atau energi ke Lubang Hitam, entropi akan meningkat atau setidaknya tetap sama (20). Hukum termodinamika kedua memiliki implikasi penting dalam pemahaman tentang alam semesta, karena ini menunjukkan bahwa ada batas pada berapa banyak energi yang dapat digunakan untuk melakukan kerja berguna. Konsep entropi juga terkait dengan konsep probabilitas dan informasi, dan digunakan dalam banyak bidang ilmu, termasuk fisika, kimia, dan ilmu komputer.

3.1.3 Entropi Lubang Hitam

Penurunan matematis untuk mendapatkan persamaan Entropi Lubang Hitam dimulai dengan hukum termodinamika kedua dan konsep termodinamika Lubang Hitam (21). Hukum termodinamika kedua menyatakan bahwa entropi sistem terisolasi selalu meningkat atau setidaknya tidak berkurang (22). Konsep termodinamika Lubang Hitam mengasumsikan bahwa Lubang Hitam memiliki entropi dan suhu. Dimulai dengan suhu Lubang Hitam pada persamaan (7), yaitu sebagai berikut:

$$T = \frac{(\hbar c^3)}{(8\pi GMk)} \quad (7)$$

Dapat diketahui bahwa entropi dapat dinyatakan sebagai fungsi dari luas permukaan horizon peristiwa Lubang Hitam:

$$S = f(A) \quad (8)$$

Adapun persamaan S sebagai fungsi dari variabel lain yang terkait dengan Lubang Hitam. Pertama, dengan menggunakan rumus suhu dan rumus massa Lubang Hitam untuk mengekspresikan suhu sebagai fungsi dari variabel lain:

$$M = \frac{c^2 R_s}{2G} \quad (9)$$

$$T = \frac{(\hbar c^3)}{(8\pi GMk)} = \frac{\hbar c^3}{16\pi G^2 M k} \quad (10)$$

Kemudian, dilakukan dengan melakukan diferensiasi terhadap massa Lubang Hitam untuk menemukan perubahan entropi:

$$dS = \left(\frac{1}{T} \right) dM \quad (11)$$

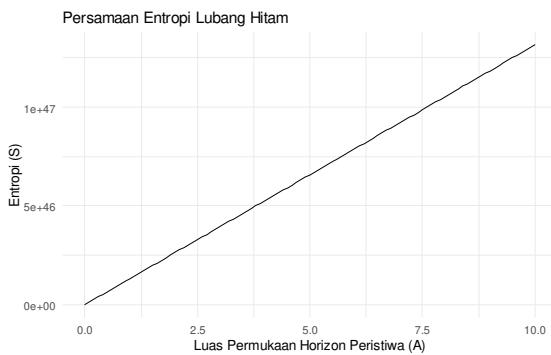
Selanjutnya dapat dilakukan proses integrasikan persamaan di atas untuk menemukan persamaan entropi (23):

$$S = \int \left(\frac{1}{T} \right) dM \quad (12)$$

Dengan mengganti nilai T dan M dari persamaan suhu dan massa Lubang Hitam, maka didapatkan ekspresikan persamaan entropi sebagai fungsi dari luas permukaan horizon peristiwa Lubang Hitam:

$$S = \frac{kA}{4I_p^2} \quad (13)$$

di mana k adalah konstanta Boltzmann, A adalah luas permukaan horizon peristiwa Lubang Hitam, dan I_p adalah panjang Planck. Ini adalah persamaan entropi Lubang Hitam yang terkenal, yang menunjukkan bahwa entropi Lubang Hitam sebanding dengan luas permukaan horizon peristiwa Lubang Hitam.



Gambar 3. Simulasi grafik Entropi vs Luas permukaan horizon peristiwa (A) untuk Lubang Hitam (Skala adalah contoh)

Sumber: Ruben siagian dalam pemrograman R, 2023

3.1.4 Suhu Lubang Hitam

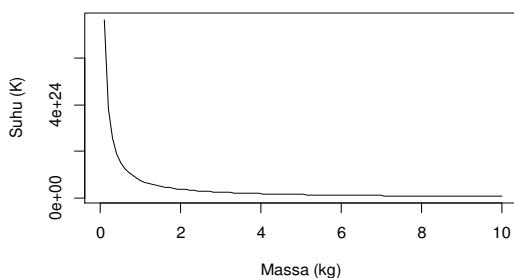
Suhu Lubang Hitam ditemukan melalui kajian termodinamika Lubang Hitam. Konsep termodinamika Lubang Hitam mengasumsikan bahwa Lubang Hitam memiliki entropi dan suhu seperti sistem termodinamika pada umumnya (24). Pertama, dimulai dengan hukum termodinamika kedua, yang menyatakan bahwa entropi sistem terisolasi selalu meningkat atau setidaknya tidak berkurang. Dalam hal ini, Lubang Hitam dianggap sebagai sistem terisolasi.

Selanjutnya, dengan memperhatikan fakta bahwa luas permukaan horizon peristiwa Lubang Hitam meningkat seiring dengan peningkatan massa Lubang Hitam. Dalam hal ini dapat mengasumsikan bahwa entropi Lubang Hitam sebanding dengan luas permukaan horizon peristiwa Lubang Hitam. Mengekspresikan suhu Lubang Hitam sebagai fungsi dari variabel lain yang terkait dengan Lubang Hitam, dengan memulai dengan rumus massa Lubang Hitam seperti persamaan (9). di mana R_s adalah jari-jari Schwarzschild Lubang Hitam. Kemudian, dengan menggunakan rumus suhu untuk menggantikan M berdasarkan persamaan (7). Dengan menggabungkan kedua persamaan di atas untuk mengekspresikan suhu sebagai fungsi dari jari-jari Schwarzschild:

$$T = \frac{(\hbar c^3)}{\left\{8\pi G \left(\frac{c^2 R_s}{2G}\right) k\right\}} = \frac{(\hbar c)}{8\pi k R_s} \quad (14)$$

Dengan mengganti nilai R_s dengan persamaan jari-jari Schwarzschild dalam koordinat bola Schwarzschild, maka dapat mengekspresikan suhu sebagai fungsi dari massa Lubang Hitam seperti persamaan (9) (23).

Suhu Lubang Hitam sebagai Fungsi dari Massa



Gambar 4. Simulasi grafik Suhu vs Massa untuk Lubang Hitam berdasarkan perhitungan matematis (Skala adalah contoh)

Sumber: Ruben siagian dalam pemrograman R, 2023

3.1.5 Analisis dalam termodinamika Lubang Hitam menggunakan persamaan untuk Mini riset

Salah satu aplikasi penting dari persamaan entropi Lubang Hitam adalah untuk memahami sifat termodinamika Lubang Hitam. Sebagai contoh, dapat menggunakan persamaan untuk memeriksa hubungan antara suhu dan entropi Lubang Hitam.

Misalkan Lubang Hitam dengan massa $M = 10^9$ Matahari dan radius Schwarzschild $R_s = \frac{2GM}{c^2} = 2 \cdot 10^9$ km. Dengan menggunakan persamaan suhu untuk menghitung suhu Lubang Hitam:

$$T = \frac{(\hbar c^3)}{(8\pi GMk)} = (1.23 \cdot 10^{-7}) K \quad (15)$$

Di mana: T_H adalah suhu Hawking dari Lubang Hitam. \hbar adalah konstanta Planck yang dikurangi, memiliki nilai sekitar 1.05457×10^{-34} J·s. c adalah kecepatan cahaya dalam vakum, memiliki nilai sekitar 2.998×10^8 m/s. G adalah konstanta gravitasi, memiliki nilai sekitar 6.674×10^{11} N·m 2 /kg 2 . M adalah massa Lubang Hitam. k adalah konstanta Boltzmann, memiliki nilai sekitar 1.381×10^{-23} J/K.

Persamaan suhu Hawking menyatakan bahwa suhu Lubang Hitam tergantung pada konstanta fisika seperti konstanta Planck, kecepatan cahaya, konstanta gravitasi, massa Lubang Hitam, dan konstanta Boltzmann (25). Suhu Hawking merupakan suhu yang sangat rendah dan semakin rendah saat massa Lubang Hitam semakin besar. Makna dari persamaan suhu Hawking adalah bahwa Lubang Hitam dapat dipandang sebagai sistem termodinamika yang memiliki suhu. Suhu ini dikaitkan dengan radiasi Hawking, yang adalah radiasi elektromagnetik yang dikeluarkan oleh Lubang Hitam akibat efek kuantum di sekitar horison peristiwa (26). Radiasi Hawking menyatakan bahwa Lubang Hitam dapat kehilangan energi dan massa melalui proses radiasi, dan suhu Hawking menyatakan seberapa "panas" Lubang Hitam tersebut dalam hal suhu termodinamika (27). Kemudian, maka dengan menggunakan persamaan entropi untuk menghitung entropi Lubang Hitam sebagai fungsi dari luas permukaan horison peristiwa A:

$$S = \frac{kA}{4l_p^2} \quad (16)$$

Di sini dapat menggunakan panjang Planck $l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.6 \cdot 10^{-35}$ m. Selanjutnya perlu

menemukan nilai luas permukaan horison peristiwa A. Untuk Lubang Hitam Schwarzschild, luas permukaan horison peristiwa $A = 4\pi R_s^2$. Oleh karena itu,

$$A = 4\pi R_s^2 = 5.03 \cdot 10^{19} m^2 \quad (17)$$

Selanjutnya dapat menggunakan nilai A ini untuk menghitung entropi Lubang Hitam:

$$S = \frac{kA}{4l_p^2} = 1.4 \cdot 10^{80} \quad (18)$$

Di mana: S adalah entropi Lubang Hitam A adalah luas permukaan horison kejadian Lubang Hitam l_p adalah panjang Planck, yang merupakan konstanta fundamental dalam fisika dan dinyatakan sebagai $L_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$, di mana \hbar adalah konstanta Planck, G adalah konstanta gravitasi Newton, dan c adalah kecepatan cahaya dalam vakum. Persamaan ini menunjukkan bahwa entropi Lubang Hitam berbanding lurus dengan luas permukaan horison kejadian Lubang Hitam, dengan faktor skala $L_p/4$. Artinya, semakin besar luas permukaan horison kejadian Lubang Hitam, semakin besar pula entropinya.

Makna dari persamaan area-entropi Lubang Hitam adalah bahwa entropi Lubang Hitam dihubungkan dengan luas permukaan horison kejadian Lubang Hitam. Ini menunjukkan bahwa Lubang Hitam memiliki entropi yang berkaitan dengan banyaknya mikrokonfigurasi yang mungkin terdapat pada horison kejadian, meskipun Lubang Hitam dianggap sebagai objek yang sangat sederhana secara fisik (28). Persamaan ini juga mengindikasikan bahwa Lubang Hitam dapat diperlakukan sebagai sistem termodinamika, yang memiliki entropi, temperatur, dan energi, sesuai dengan konsep termodinamika. Dalam penelitian termodinamika Lubang Hitam, persamaan area-entropi ini digunakan untuk menghitung entropi Lubang Hitam dan mempelajari sifat-sifat

termodinamika dari Lubang Hitam, seperti suhu dan kerapatan entropi. Hal ini membantu dalam pemahaman tentang bagaimana Lubang Hitam berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya dan bagaimana sifat-sifat dasar alam semesta dapat dipahami melalui konsep termodinamika. Penelitian lebih lanjut dalam termodinamika Lubang Hitam juga dapat melibatkan implikasi teori fisika kuantum pada entropi Lubang Hitam dan memperdalam pemahaman tentang sifat-sifat Lubang Hitam dan alam semesta secara keseluruhan.

3.2 Pembahasan

Hukum Pertama Termodinamika untuk Lubang Hitam secara matematis dapat dinyatakan sebagai $dM = TdS - W$, di mana dM adalah perubahan massa Lubang Hitam, T adalah suhu Lubang Hitam, dS adalah perubahan entropi hitam lubang, dan W adalah kerja yang dilakukan pada Lubang Hitam. Kerja W yang dilakukan pada Lubang Hitam dapat dinyatakan sebagai $W = F \cdot R \cdot dA$, di mana F adalah gaya, R adalah jarak dari horizon peristiwa, dan dA adalah perubahan luas horizon peristiwa.

Persamaan tersebut dapat diperoleh dengan mengintegrasikan gaya pada jarak R dari horizon peristiwa dan menggunakan rumus luas horizon peristiwa $A = 4\pi R^2$. Selanjutnya, dS , perubahan entropi Lubang Hitam, dapat dinyatakan sebagai $dS = 2\pi k dM$, di mana k adalah konstanta Boltzmann. Menggabungkan persamaan ini menghasilkan hukum pertama termodinamika untuk Lubang Hitam, yang menghubungkan perubahan massa dengan perubahan entropi dan kerja. Persamaan ini menunjukkan bahwa Lubang Hitam dapat diperlakukan sebagai sistem termodinamika dengan temperatur dan entropi, dan berperilaku seperti objek termodinamika lainnya.

Hukum Kedua Termodinamika menyatakan bahwa entropi suatu sistem terisolasi dalam kesetimbangan termodinamika tidak akan pernah berkurang. Dalam konteks Lubang Hitam, entropi dapat dianggap sebagai ukuran jumlah informasi atau ketidakpastian tentang kondisi di dalam Lubang Hitam. Secara matematis, Hukum Kedua Termodinamika dapat dinyatakan sebagai $dS \geq 0$, dimana dS adalah perubahan entropi sistem. Ini berarti entropi selalu meningkat atau tetap konstan. Dalam kasus Lubang Hitam, ini berarti jika menambahkan massa atau energi ke Lubang Hitam, entropinya akan meningkat atau setidaknya tetap sama. Hukum Kedua Termodinamika memiliki implikasi penting bagi pemahaman tentang alam semesta, karena menunjukkan bahwa ada batasan berapa banyak energi yang dapat digunakan untuk melakukan pekerjaan yang berguna.

Persamaan entropi Lubang Hitam yang ditemukan melalui derivasi matematis dalam narasi ini adalah: $S = 4\pi k M^2$ Di mana: S adalah entropi Lubang Hitam, k adalah konstanta Boltzmann, M adalah massa Lubang Hitam. Persamaan ini menunjukkan bahwa entropi Lubang Hitam berhubungan langsung dengan kuadrat dari massa Lubang Hitam. Artinya, semakin besar massa Lubang Hitam, semakin besar pula entropinya.

Derivasi dimulai dengan Hukum Kedua Termodinamika, yang menyatakan bahwa entropi suatu sistem terisolasi selalu bertambah atau tetap konstan. Kemudian, konsep termodinamika Lubang Hitam digunakan untuk mengasumsikan bahwa Lubang Hitam memiliki entropi dan temperatur. Rumus suhu Lubang Hitam $T = \hbar c^3 / 8\pi G M k$ digunakan untuk menyatakan suhu sebagai fungsi variabel lain, yaitu jari-jari Schwarzschild R . Selanjutnya, massa Lubang Hitam didefinisikan sebagai $M = R/2G$, dan diferensiasi massa Lubang Hitam digunakan untuk mencari perubahan entropi. Integrasi dari perubahan entropi tersebut menghasilkan persamaan entropi Lubang Hitam sebagai fungsi dari massa Lubang Hitam. Persamaan entropi ini menunjukkan bahwa entropi Lubang Hitam dapat dinyatakan sebagai fungsi dari variabel lain yang terkait dengan Lubang Hitam, yaitu massa Lubang Hitam.

Hal ini menggambarkan bagaimana entropi Lubang Hitam terkait erat dengan sifat-sifat termodinamika Lubang Hitam, seperti massa dan suhu (29). Persamaan entropi ini juga memberikan pemahaman lebih lanjut tentang bagaimana entropi Lubang Hitam berkembang seiring perubahan massa Lubang Hitam, dan bagaimana massa Lubang Hitam berkontribusi terhadap entropi Lubang Hitam. Penelitian lebih lanjut dalam termodinamika Lubang Hitam dan penggunaan persamaan ini dapat memberikan wawasan lebih dalam tentang sifat-sifat termodinamika dan fisika dari Lubang Hitam dalam kerangka teori relativitas umum dan fisika kuantum.

IV. SIMPULAN DAN SARAN

4.1 Simpulan

Kesimpulan dari dua konsep termodinamika yang dibahas di atas adalah bahwa Lubang Hitam dapat diperlakukan sebagai sistem termodinamika yang memiliki entropi dan suhu. Hukum pertama termodinamika untuk Lubang Hitam menunjukkan hubungan antara perubahan massa, entropi, dan kerja yang dilakukan pada Lubang Hitam. Hukum kedua termodinamika menunjukkan bahwa entropi sistem selalu meningkat atau setidaknya tetap konstan, termasuk pada Lubang Hitam. Pengurangan entropi dalam sistem terisolasi dalam kesetimbangan termodinamika tidak mungkin terjadi. Derivasi matematis untuk entropi Lubang Hitam melibatkan hukum kedua termodinamika dan konsep termodinamika Lubang Hitam, di mana entropi dapat diungkapkan sebagai fungsi luas permukaan horizon peristiwa. Entropi Lubang Hitam dapat dihitung sebagai fungsi dari massa, luas permukaan horizon peristiwa, dan konstanta fisika seperti konstanta Boltzmann dan Planck. Konsep entropi dan termodinamika Lubang Hitam penting untuk pemahaman tentang alam semesta, dan dapat diterapkan pada bidang ilmu lain seperti fisika, kimia, dan ilmu komputer.

4.2 Saran

Artikel ini adalah pengantar dalam membahas termodinamika Lubang Hitam, dengan tujuan untuk membangkitkan semangat para fisikawan muda Indonesia. Oleh karena itu, penulis memberikan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya, antara lain: Pertama, melakukan investigasi lebih lanjut mengenai perhitungan entropi Lubang Hitam pada jenis-jenis Lubang Hitam yang berbeda, seperti Lubang Hitam putih dan Lubang Hitam berputar. Kedua, menganalisis perbedaan antara hasil perhitungan entropi yang berasal dari teori gravitasi klasik dan teori gravitasi kuantum, serta menguji apakah teori gravitasi kuantum dapat menjelaskan sifat termodinamika Lubang Hitam secara lebih baik. Ketiga, membahas implikasi termodinamika Lubang Hitam pada kosmologi, seperti bagaimana entropi Lubang Hitam mempengaruhi evolusi alam semesta dan pertumbuhan struktur kosmik. Keempat, mempelajari efek termodinamika pada proses pembentukan dan penghancuran Lubang Hitam, dan mengeksplorasi bagaimana proses tersebut dapat dijelaskan melalui sifat-sifat termodinamika. Dan kelima, menghubungkan teori termodinamika Lubang Hitam dengan teori string, serta mempelajari apakah ada hubungan antara kedua teori tersebut yang dapat membantu menjelaskan sifat termodinamika Lubang Hitam secara lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada para penulis yang telah berkolaborasi dalam mendiskusikan pembahasan artikel ini serta memberikan dukungan finansial untuk penulisan *paper* ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Alfaris L, Siagian RC, Sumarto EP. Study Review of the Speed of Light in Space-Time for STEM Student. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. 2023;9(2):509–19.
2. Barceló C, Liberati S, Sonego S, Visser M. Black stars, not holes. *Scientific American*. 2009;301(4):38–45.
3. Fryer C, Woosley S, Heger A. Pair-instability supernovae, gravity waves, and gamma-ray transients. *The Astrophysical Journal*. 2001;550(1):372.
4. Planet B. A. Pendahuluan. *ILMU DASAR ASTRONOMI*. 2022;70.
5. Ghosh A, Perez A. Black hole entropy and isolated horizons thermodynamics. *Physical review letters*. 2011;107(24):241301.
6. Kubizňák D, Mann RB, Teo M. Black hole chemistry: thermodynamics with Lambda. *Classical and Quantum Gravity*. 2017;34(6):063001.

7. Ruppeiner G. Thermodynamic black holes. *Entropy*. 2018;20(6):460.
8. Boi L. Topological Quantum Field Theory and the Emergence of Physical Space–Time from Geometry. *New Insights into the Interactions Between Geometry and Physics*. Dalam: *From Electrons to Elephants and Elections: Exploring the Role of Content and Context*. Springer; 2022. hlm. 403–23.
9. Jawad A, Fatima SR. Thermodynamic geometries analysis of charged black holes with barrow entropy. *Nuclear Physics B*. 2022;976:115697.
10. Simovic F, Fusco D, Mann RB. Thermodynamics of de Sitter black holes with conformally coupled scalar fields. *Journal of High Energy Physics*. 2021;2021(2):1–19.
11. Budiman Nasution, Ruben Cornelius Siagian, Arip Nurahman, Lulut Alfaris. EXPLORING THE INTERCONNECTEDNESS OF COSMOLOGICAL PARAMETERS AND OBSERVATIONS: INSIGHTS INTO THE PROPERTIES AND EVOLUTION OF THE UNIVERSE. *SPEKTRA* [Internet]. 29 April 2023 [dikutip 1 Mei 2023];8(1). Tersedia pada: <https://journal.unj.ac.id/unj/index.php/spektra/article/view/34133>
12. Allori V. What is It Like to be a Relativistic GRW Theory? Or: Quantum Mechanics and Relativity, Still in Conflict After All These Years. *Foundations of Physics*. 2022;52(4):79.
13. Bena I, Martinec EJ, Mathur SD, Warner NP. Snowmass White Paper: Micro-and Macro-Structure of Black Holes. *arXiv preprint arXiv:220304981*. 2022;
14. Azizi A, Camblong H, Chakraborty A, Ordóñez C, Scully M. Quantum optics meets black hole thermodynamics via conformal quantum mechanics: II. Thermodynamics of acceleration radiation. *Physical Review D*. 2021;104(8):084085.
15. Hawking SW, Page DN. Thermodynamics of black holes in anti-de Sitter space. *Communications in Mathematical Physics*. 1983;87:577–88.
16. Chandrasekhar S, Chandrasekhar S. *Selected Papers, Volume 6: The Mathematical Theory of Black Holes and of Colliding Plane Waves*. Vol. 6. University of Chicago Press; 1991.
17. Cheung C, Liu J, Remmen GN. Entropy bounds on effective field theory from rotating dyonic black holes. *Physical Review D*. 2019;100(4):046003.
18. Yi-Fang C. Possible decrease of entropy due to internal interactions in isolated systems. *Apeiron*. 1997;4(4):97–9.
19. Bekenstein JD. Black-hole thermodynamics. *Physics Today*. 1980;33(1):24–31.
20. Hawking SW. Black holes and thermodynamics. *Physical Review D*. 1976;13(2):191.
21. Wald RM. The thermodynamics of black holes. *Living reviews in relativity*. 2001;4:1–44.
22. Chang YF. Entropy Decrease in Isolated Systems: Theory, Fact and Tests: Physics. *International Journal of Fundamental Physical Sciences*. 2020;10(2):16–26.
23. MISBAH M. *Teori Relativitas*. 2023;
24. Dougherty J, Callender C. Black hole thermodynamics: More than an analogy? 2016;
25. Hooft G. On the quantum structure of a black hole. *Nuclear Physics B*. 1985;256:727–45.
26. Guo S, Pan S, Li X, Shi L, Zhang P, Guo P, dkk. A system on chip-based real-time tracking system for amphibious spherical robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2017;14(4):1729881417716559.
27. Auffinger J. Primordial black hole constraints with Hawking radiation—a review. *Progress in Particle and Nuclear Physics*. 2023;104040.
28. Prester PD. Alpha'-corrections and heterotic black holes. *arXiv preprint arXiv:10011452*. 2010;
29. Sinaga GHD, Panjaitan MB, Siagian RC, Siahaan KWA. MEMAHAMI INDAHNYA SEMESTA DENGAN DASAR TEORI KOSMOLOGI DAN ASTRONOMI FISIKA SERTA SEJARAHNYA [Internet]. Penerbit Widina; Tersedia pada: <https://books.google.co.id/books?id=BKtwEAAAQBAJ>