

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Studi mengenai alam semesta selalu menjadi topik penelitian menarik, terutama dalam bidang relativitas umum dan mekanika kuantum. Salah satu konsep penelitian paling populer adalah relativitas umum. Relativitas umum merupakan topik penelitian yang dikembangkan oleh Albert Einstein pada tahun 1915. Relativitas umum memiliki peran penting untuk menjelaskan berbagai fenomena yang berkaitan dengan gravitasi. Teori ini memperluas pandangan teori klasik Newton dalam kajian yang lebih kompleks. Melalui teori ini, berbagai fenomena fisika seperti pergeseran perihelion orbit merkurius, prediksi pembelokan cahaya oleh medan gravitasi dan bahkan eksistensi lubang hitam berhasil dijelaskan (Wang dkk, 2018; Will, 2014).

Eksistensi lubang hitam dapat dimanfaatkan untuk sumber energi melalui proses Penrose. Proses Penrose merupakan mekanisme ekstraksi energi dari lubang hitam dengan memanfaatkan gaya tarik luar biasa dari efek kelengkungan waktu dan efek rotasi dari lubang hitam. Dalam proses ini, suatu objek akan berada pada wilayah luar horizon peristiwa lubang hitam (ergosfer) memanfaatkan rotasi lubang hitam untuk memperbesar energinya. Energi yang disimpan oleh suatu objek inilah yang dapat dimanfaatkan menjadi sumber energi (Lasota dkk, 2014).

Lubang hitam sebagai salah satu prediksi utama dari relativitas umum telah teramati melalui data yang dikumpulkan menggunakan *event horizon telescope* (EHT). EHT menggunakan jaringan teleskop radio global yang tersebar di berbagai wilayah untuk mendapatkan citra lengkap pusat galaksi Messier-87 (M-87) yang diambil pada tahun 2018. Citra M-87 teramati berupa cakrawala peristiwa dan piringan akresi. Singularitas yang merupakan wilayah di mana gravitasi diprediksi sangat kuat dan struktur ruang-waktu melengkung dengan sangat tajam ditunjukkan oleh wilayah yang terlihat berwarna hitam pada bagian tengah cakrawala peristiwa. Pengamatan lubang hitam secara langsung ini mengantarkan Roger Penrose, Reinhard Genzel, dan Andrea M. Ghez mendapatkan hadiah Nobel fisika tahun

2020 (Akiyama dkk, 2024; Grumiller dan Sheikh-Jabbari, 2022; Palumbo dan Wong, 2022; The Nobel Prize in Physics, 2020).

Singularitas dan horizon peristiwa merupakan penggambaran dari persamaan medan Einstein. Solusi terkenal dari persamaan medan Einstein adalah solusi Schwarzschild. Lubang hitam Schwarzschild merupakan lubang hitam statis dan tidak memiliki momentum sudut serta memiliki horizon peristiwa yang terletak pada radius Schwarzschild (R_S) (Bambi, 2018; Carroll, 2019). Metrik pada lubang hitam Schwarzschild memprediksi bahwa lubang hitam ini mempunyai singularitas. Singularitas terletak pada bagian terdalam lubang hitam, yaitu pada radius $R_S = 0$ di mana pada batas ini metrik ruang waktu kehilangan makna fisis (Charles W dkk, 1973; Frolov dkk, 2000; Grumiller dan Sheikh-Jabbari, 2022).

Penelitian yang dilakukan oleh Bardeen (1968) menemukan upaya untuk menghilangkan singularitas dengan inti materi bermuatan dalam lubang hitam sebagai pengganti singularitasnya. Singularitas dianggap sebagai masalah dalam teori relativitas umum karena pada titik tersebut, nilai-nilai fisik dan hukum fisika menjadi sangat berbeda. Solusi ini bertepatan dengan solusi Schwarzschild pada jarak yang jauh, dan untuk jarak kecil berperilaku selayaknya solusi de Sitter, namun solusi ini tidak secara langsung dapat menjelaskan bagaimana parameter nonsingular dapat memengaruhi lubang hitam khususnya pada paradoks informasi (Dymnikova, 1992; Frolov, 2018).

Hayward (2006) berpendapat bahwa parameter kuantum berskala panjang dapat menggantikan singularitas pada jarak yang sangat kecil di lubang hitam. Lubang hitam yang singularitasnya digantikan oleh suatu parameter kuantum akan memiliki ruang-waktu yang datar secara asimtotik dan memiliki simetri bola. Koreksi kuantum ini akan dapat menjelaskan bagaimana paradoks informasi dapat dicegah dalam lubang hitam, namun solusi Hayward (2006) masih memiliki kekurangan yang mana solusi ini mempunyai struktur halus pada horizon dalam yang berupa horizon Cauchy (Bonanno dkk, 2021; Frolov, 2016; Hayward, 2006).

Poisson dan Israel (1990) mengungkapkan bahwa terdapat pergeseran biru tak terbatas dari kepadatan energi yang terjadi dalam horizon Cauchy yang berimbas pada inflasi parameter massa gravitasi internal lubang hitam. Inflasi

massa pada horizon Cauchy menyebabkan divergensi eksponensial dari massa Misner-Sharp atau massa gravitasi yang akan membuat massa lubang hitam meningkat setiap saat (Bonanno dkk, 2021).

Penelitian terbaru oleh Bonanno dkk. (2021) mendapatkan bahwa pada geometri lubang hitam nonsingular tertentu seperti pada metrik Hayward, efek inflasi massa dapat ditekan dengan menerapkan model grup renormalisasi yang disempurnakan karena sifat non-linearitas dari fungsi massanya. Pertumbuhan massa yang tidak terkendali dari lubang hitam juga dapat diatur dengan melakukan pengaturan pada radiasi Hawking.

Studi metrik grup renormalisasi oleh Bonanno dapat diimplementasikan dalam melakukan pemodelan efektif lubang hitam nonsingular. Penelitian Cadoni dkk. (2022) memodelkan lubang hitam tanpa singularitas dan mempertahankan perilaku Schwarzschild pada jarak yang sangat jauh dengan menggunakan parameter fungsi metrik. Fungsi metrik ini dapat menentukan profil materi yang membentuk lubang hitam yang pada gilirannya memengaruhi kelengkungan ruang-waktu dan sifat-sifat lubang hitam. Penelitian yang dilakukan oleh Mandal dan Gangopadhyay (2022) mendapatkan termodinamika metrik grup renormalisasi dengan pendekatan berbeda, nilai kopling yang ada pada metrik grup renormalisasi bergantung pada nilai koreksi kuantum berskala energi. Konoplya (2023) mengkaji lubang hitam grup renormalisasi dengan pendekatan faktor *cutoff* berskala panjang yang meliputi temperatur Hawking, skalar Kretschmann, dan intensitas radiasi Hawking, namun belum mendalami studi terkait frekuensi kuasinormal dari metrik grup renormalisasi.

Penelitian ini berfokus pada implementasi pemodelan lubang hitam efektif dengan fungsi metrik grup renormalisasi yang diusulkan oleh Bonanno dan Reuter (2000) yang mana solusi ini dapat memperkecil peluang inflasi massa pada lubang hitam. Efek inflasi massa yang diperkecil melalui solusi yang menerapkan konstanta kopling kritis α_c yang bertujuan untuk membuat model menjadi lebih stabil di mana ketidakstabilan horizon Cauchy dapat ditekan. Implementasi pemodelan lubang hitam dengan fungsi metrik grup renormalisasi (RG) dapat diterapkan seperti pada penelitian Cadoni dkk. (2022). Penerapan ini akan

menghasilkan berbagai aspek penting terkait lubang hitam nonsingular seperti kondisi energi, termodinamika lubang hitam, transisi fasa, orbit foton, dan mode kuasinormal.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memahami dan mengeksplorasi aspek penting pada lubang hitam nonsingular dengan metrik grup renormalisasi (RG). Aspek penting dalam hal ini meliputi persamaan keadaan dan kondisi energi, termodinamika lubang hitam, transisi fasa, geodesik *null*, orbit foton, dan mode kuasinormal. Penentuan kondisi energi bertujuan untuk menentukan perilaku energi dalam lubang hitam nonsingular serta bertujuan untuk memverifikasi model lubang hitam nonsingular. Pembahasan termodinamika lubang hitam bertujuan untuk menguji dan mempelajari perilaku termodinamika klasik, transisi fasa bertujuan untuk memprediksi stabilitas termodinamika lubang hitam. Tujuan menentukan orbit foton adalah memprediksi lintasan foton pada geodesik *null* dan mode kuasinormal bertujuan untuk memahami perilaku lubang hitam ketika adanya gangguan. Semua aspek penting ini secara umum digunakan untuk membuktikan stabilitas dari lubang hitam nonsingular yang telah dimodifikasi.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah memperdalam pengetahuan mengenai gravitasi dan struktur ruang-waktu pada kondisi ekstrem. Penelitian ini juga bermanfaat sebagai memperdalam pengetahuan terhadap pencegahan efek paradoks informasi yang terjadi pada lubang hitam. Mengembangkan teori gravitasi yang lebih lengkap, diharapkan berkontribusi pada penyatuan teori kuantum dan relativitas atau teori unifikasi. Selain itu, penelitian ini juga membuka jalan pada pengamatan lubang hitam nonsingular melalui *gravitational lensing* secara langsung di masa depan.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Bonano dan Reuter (2000) serta Cadoni dkk. (2022). Penelitian ini akan berfokus pada penerapan metrik grup renormalisasi (RG) untuk mempelajari dengan komprehensif model lubang hitam nonsingular. Verifikasi model nonsingular dapat

ditentukan dengan menentukan kondisi energi yang terbatas hanya pada kondisi energi *null* dan kondisi energi kuat. Termodinamika dan transisi fasa lubang hitam yang terbatas pada penentuan temperatur Hawking, massa total lubang hitam, entropi lubang hitam, energi bebas Helmholtz, dan kapasitas panas lubang hitam. Geodesik *null* yang terbatas pada penentuan potensial efektif dan jalur atau orbit foton, dan mode kuasinormal yang terbatas pada penentuan frekuensi kuasinormal riil dan imajiner.

1.5 Hipotesis

Model metrik grup renormalisasi (RG) dan model metrik Hayward memiliki kesamaan di mana keduanya akan mendekati nilai Schwarzschild pada jarak (r) yang sangat besar. Namun, secara fisis pada kedua model ini memiliki perbedaan pada jarak yang kecil menuju ke inti lubang hitam ($r \rightarrow 0$) di mana pada model Hayward, fungsi metrik model ini dipengaruhi oleh massa lubang hitam berskala jarak ($M(r)$), dan pada model RG fungsi metrik dipengaruhi oleh konstanta gravitasi Newton berskala jarak ($G(r)$). Hal ini akan memberikan dampak dan dapat terlihat pada kondisi energi, termodinamika dan transisi fasa lubang hitam, orbit foton, dan frekuensi mode kuasinormal, sehingga dikarenakan metrik RG memiliki kemiripan sifat dengan metrik Hayward, perilaku kondisi energi, termodinamika dan transisi fasa lubang hitam, orbit foton, dan frekuensi mode kuasinormal juga dapat diterapkan pada model metrik RG.